

УДК 539.3
© 2006

*Горик О.В., доктор технічних наук, професор,
Полтавська державна аграрна академія,*

*Толстопятов Р.В., кандидат технічних наук,
Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка,*

Шулянський Г.А., інженер, м. Полтава

АНАЛІЗ РОЗПОДІЛУ ДОТИЧНИХ НАПРУЖЕНЬ У БРУСАХ ЗАМКНУТОЇ СИМЕТРИЧНОЇ СТРУКТУРИ

Постановка проблеми. У зв'язку з широким застосуванням нових сучасних композиційних матеріалів виникає проблема розробки таких методів визначення напружено-деформованого стану, які враховували б особливості деформування стержневих елементів анізотропної та дискретно-неоднорідної замкнутої структури. Це можливо тільки при відмові від гіпотези плоских перерізів, тобто при врахуванні згинної депланації перерізів, як, наприклад, це зроблено в (2).

Аналіз основних досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання проблеми. У стержнях з криволінійним симетричним контуром перерізу або похилими бічними гранями поряд із вертикальною складовою τ_{xz} повних дотичних напружень τ , яка паралельна лінії дії навантаження (лінії симетрії), виникає перпендикулярна до неї горизонтальна складова τ_{xy} (рис.1). Дослідження повних дотичних напружень в однорідних брусах круглого й еліптичного перерізу, із точки зору визначення їх найбільших значень, наведено в (3). Щоб урахувати їх вплив на двонаправлену згинну депланацію перерізів, необхідно мати аналітичні вирази для компонентів дотичних напружень. Окремі аспекти цієї проблеми розглянуті в (1).

Мета досліджень та методика їх проведення. Метою проведеної роботи було встановлення залежності між нормальними σ_x і дотичними τ напруженнями та, на її підставі, аналіз розподілу компонент τ_{xz} та τ_{xy} дотичних напружень у деяких брусах із перерізами замкнутої симетричної структури, в тому числі й композитної.

Теоретичні співвідношення. Розглянемо брус із криволінійним симетричним контуром перері-

Установлено в задачі згину зв'язок нормальних напружень із складовими повних дотичних напружень у поперечному перерізі з криволінійним симетричним контуром. Отримано теоретичні передумови для визначення вертикальних і горизонтальних складових дотичних напружень у перерізах однорідної симетричної замкнутої структури. Подано результати розрахунку трикутного та еліптичного перерізів.

зу (рис. 1). З'ясуємо характер розподілу напружень $\tau_{xy}(x, y)$ уздовж горизонтальної лінії з постійною координатою z .

Візьмемо до уваги, що в межах гіпотез, які використовувалися в теорії брусів, напруження σ_x та τ_{xz}

не залежать від координати y , тобто

$$\sigma_x = \sigma_x(x, z); \tau_{xz} = \tau_{xz}(x, z) \quad (1)$$

Для аналізу повних дотичних напружень і їх компонент використаємо диференціальне рівняння рівноваги

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0. \quad (2)$$

Нормальні напруження σ_x , відповідно до (1), можна визначити через функцію переміщень

$$w(x) \text{ так: } \sigma_x = \frac{d^2 w(x)}{dx^2} f_\sigma(z) \quad (3)$$

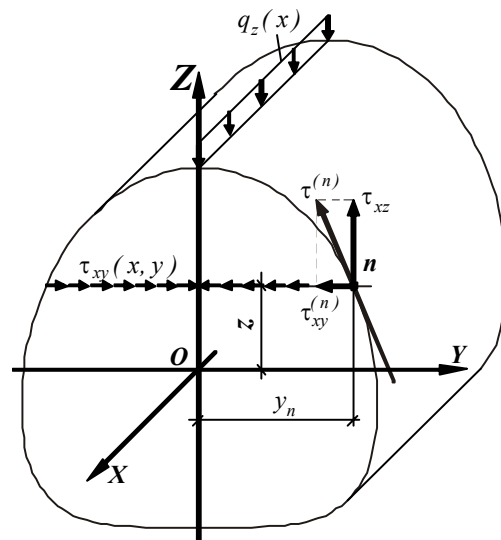


Рис. 1. До визначення дотичних напружень у поперечному перерізі бруса

де $f_{\sigma}(z)$ – деяка узагальнена функція розподілу нормальних напружень, яка залежить від вихідних теоретичних передумов.

Введемо допоміжну функцію $T(y, z)$ – функцію повних дотичних напружень $\tau(x, y, z)$, за допомогою якої компоненти дотичних напружень визначаються таким чином:

$$\begin{aligned} \tau_{xz} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial^3 w(x)}{\partial x^3} \frac{\partial T(y, z)}{\partial y}; \\ \tau_{xy} &= -\frac{1}{2} \frac{\partial^3 w(x)}{\partial x^3} \frac{\partial T(y, z)}{\partial z}. \end{aligned} \quad (4)$$

Із урахуванням (3) і (4), диференціальне рівняння рівноваги (2) набуде вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^3 w(x)}{\partial x^3} f_{\sigma}(z) - \frac{1}{2} \frac{\partial^3 w(x)}{\partial x^3} \frac{\partial^2 T(y, z)}{\partial y \partial z} - \\ - \frac{1}{2} \frac{\partial^3 w(x)}{\partial x^3} \frac{\partial^2 T(y, z)}{\partial y \partial z} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Після зведення подібних і деяких перетворень одержуємо вираз

$$\frac{\partial^3 w(x)}{\partial x^3} \left(f_{\sigma}(z) - \frac{\partial^2 T(y, z)}{\partial y \partial z} \right) = 0, \quad (6)$$

із якого рівняння для визначення функції дотичних напружень $T(y, z)$ за умови $(\partial/\partial x)^3 w(x) \neq 0$ буде мати вигляд

$$\frac{\partial^2 T(y, z)}{\partial y \partial z} - f_{\sigma}(z) = 0. \quad (7)$$

Взагалі умова $(\partial/\partial x)^3 w(x) \neq 0$ відповідає поперечному згину. При чистому згині $(\partial/\partial x)^3 w(x) = 0$. Але тоді дотичні напруження відсутні.

Одним із можливих розв'язків рівняння (7) є такий:

$$T(y, z) = T_1(z) \cdot y. \quad (8)$$

Якщо підставимо його у (7), то отримаємо

$$\frac{\partial T_1(z)}{\partial z} = f_{\sigma}(z). \quad (9)$$

Тобто розв'язок (8) придатний, коли значення нормальних напружень σ_x не залежить від координати y . Це відповідає гіпотезам (1), які використовуються в даній роботі.

Підставимо (8) у перше із рівнянь (4), отримаємо

$$\tau_{xz} = -\frac{1}{2} \frac{\partial^3 w(x)}{\partial x^3} T_1(z), \quad (10)$$

тобто напруження τ_{xz} також не залежать від координати y і залишаються постійними на лінії $z = const$, що відповідає гіпотезі (1).

Підставивши розв'язок (8) у другу із залежностей (4), отримаємо лінійну функцію відносно координати y .

$$\tau_{xy} = -\frac{1}{2} \frac{\partial^3 w(x)}{\partial x^3} \frac{\partial T_1(z)}{\partial z} y. \quad (11)$$

Отже, коли нормальні напруження σ_x залишаються постійними на лінії з координатою $z = const$, вертикальні дотичні напруження τ_{xz} також постійні, а горизонтальні дотичні напруження τ_{xy} на цій лінії змінюються в напрямку координати y за лінійним законом.

Слід зауважити, що наведений висновок справедливий для однорідних брусів. У випадку дискретно неоднорідної структури потрібні уточнення з відповідним обґрунтуванням та введенням додаткових гіпотез.

Величину вертикальних дотичних напружень $\tau_{xz}(x, z)$ залежно від координати z визначаємо так:

$$\tau_{xz} = \frac{d^3 w(x)}{dx^3} f_{\tau}(z). \quad (12)$$

Функція $f_{\tau}(z)$ розподілу вертикальних дотичних напружень за висотою перерізу визначається за будь-якою відомою моделлю. Вона може бути прийнятою відповідно до концепції Журавського за законом зміни статичного моменту відсіченої частини площі, тобто:

$$f_{\tau}(z) = ES_y^* / b_z \quad (13)$$

або, наприклад, за теорією депланації перерізів (1). У (13), крім статичного моменту S_y^* , входить ширина поперечного перерізу на рівні координати z – "матеріальна" ширина $b_z = b(z)$.

Горизонтальні дотичні напруження $\tau_{xy}(x, y)$ визначимо при умові їх зміни за лінійним законом і рівності нулю в точках, розташованих на осі симетрії. Тобто, якщо у точці n на контурній поверхні бруса навантаження $\tau_{xy}^{(n)}(x, y_n, z)$ відомі з граничної умови, то в довільних точках перерізу дотичні напруження $\tau_{xy}(x, y, z)$ будуть визначатися з умови рівності їх нулю в точці на осі Z за залежністю

$$\tau_{xy}(x, y, z) = \frac{y}{y_n} \tau_{xy}^{(n)}(x, y_n, z). \quad (14)$$

Як бачимо, співвідношення (14) для визначення складової $\tau_{xy}(x, y, z)$ відповідає умові лінійності за будь-якого значення координати y й одночасно є самоврівноваженою кососиметричною системою горизонтальних дотичних напру-

жень. У загальному вигляді формула для визначення горизонтальної складової згідно з (3) при відомій вертикальній буде мати вигляд

$$\tau_{xy}(x, y, z) = \frac{y}{y_n} \cdot \frac{1}{dz_n / dy} \tau_{xz}(x, z), \quad (15)$$

де dz_n / dy – функція кута нахилу дотичної до контурної лінії перерізу.

Вираз (15) подамо таким чином:

$$\tau_{xy}(x, y, z) = t(y, z) \tau_{xz}(x, z), \quad (16)$$

де введена функція

$$t(y, z) = \frac{y}{y_n} \frac{1}{df_n(y) / dy} = \frac{y}{y_n} \frac{1}{dz_n / dy}, \quad (17)$$

що враховує вплив форми контуру перерізу на характер розподілення горизонтальних дотичних напружень. Напрямок дії напружень $\tau_{xy}(x, y, z)$ визначається напрямком напружень $\tau_{xz}(x, z)$ і знаком похідної від функції лінії контуру поперечного перерізу, а саме, коли похідна від'ємна, то складові напружень мають протилежні знаки й навпаки.

Повні дотичні напруження визначаються за правилами векторної алгебри

$$\tau_{xy}(x, y, z) = \sqrt{\tau_{xy}^2(x, y, z) + \tau_{xz}^2(x, z)}. \quad (18)$$

Повні напруження, як і горизонтальні, є функцією трьох змінних x, y, z ; вертикальні – двох x та z , а функція t – також двох змінних, але вже y та z . При розгляді конкретного перерізу для фіксованої координати x переходимо до двовимірної задачі: $\tau_{xy}(y, z), t(y, z), \tau_{xz}(z)$.

Результати розрахунку. Для прямокутного перерізу та деяких інших, внаслідок того, що функції бічних ліній контуру, паралельних осі OZ , не залежать від координати y , функція $t(y, z) = 0$. Тому в таких перерізах при поперечному згині $\tau_{xy} = 0$, а вертикальні напруження τ_{xz} є повними – $\tau_{xz}(x, z) = \tau(x, z)$.

Однак коли розглядаємо переріз, наприклад, у формі рівнобічного трикутника з початком системи координат ZOY в центрі ваги, то маємо лінійне рівняння контурної лінії одного з бічних ребер трикутника (правого) $z_n = -2hy_n / b + 2h / 3$, похідна від якого $dz_n / dy = -2h / b = const$.

Функція розподілу горизонтальних дотичних напружень (17) буде такою:

$$t(y, z) = \frac{2h \cdot y}{b(2h / 3 - z)} (-b / 2h) = -\frac{y}{2h / 3 - z}, \quad (19)$$

а самих напружень –

$$\tau_{xy}(x, y, z) = t(y, z) \tau_{xz}(x, z) = -\frac{y}{2h / 3 - z} \tau_{xz}(x, z) \quad (20)$$

Залежно від величини вертикальних дотичних напружень $\tau_{xz}(x, z)$ одержуємо відповідну лінійну функцію розподілу горизонтальних дотичних напружень $\tau_{xy}(x, y, z)$, які мають найбільші значення на контурі перерізу і дорівнюють нулю на осі симетрії OZ . Напруження $\tau_{xy}(x, y, z)$ безпосередньо не залежать від вихідних гіпотез деформування в площині XOZ і є функцією форми поперечного перерізу й напружень $\tau_{xz}(x, z)$. Саме при визначенні останніх ураховуються постановочні теоретичні передумови. Виходячи з таких міркувань, для простоти аналізу визначаємо дотичні вертикальні напруження за принципом Журавського. Так, положення горизонтальної лінії дії найбільших вертикальних дотичних напружень у трикутному перерізі залежить від закону зміни ширини перерізу $b(z)$ за висотою і визначається координатою точок $z = h / 6$

$$\tau_{xz, max} \left(x, \frac{h}{6} \right) = -\frac{d^3 w(x) E h^2}{dx^3 \cdot 12} = 1,5 \frac{Q(x)}{A}. \quad (21)$$

Епюра контурних горизонтальних дотичних напружень повторює епюру вертикальних напружень $\tau_{xz}(x, z)$ із коефіцієнтом $(\pm b / (2h))$.

Горизонтальні дотичні напруження $\tau_{yx}(x, y, z)$ змінюються лінійно від значення $\pm(b / (2h)) \tau_{xz}(x, z)$ на контурі до нуля на осі симетрії OZ і мають один знак по всій висоті перерізу.

У поперечному перерізі бруса у формі рівнобічного трикутника з прямим кутом у вершині ($y = 0$), для якого виконується умова $b / (2h) = 1$, складові дотичних контурних напружень $\tau_{xy}(x, y_n, z)$ і $\tau_{xz}(x, z)$ рівні між собою, а найбільше повне напруження, – спрямоване по лінії бічних ребер, незважаючи на знак, буде таким:

$$\begin{aligned} \tau_{max}^{(n)}(x, y_n, z) &= \sqrt{\left[\tau_{xy}^{(n)}(x, y_n, z) \right]^2 + \left[\tau_{xz}(x, z) \right]^2} = \\ &= 1,414 \tau_{xz}(x, z) = 2,12 \frac{Q(x)}{A} \end{aligned}$$

Рівність вертикальних та горизонтальних проєкцій повних дотичних напружень впливає також із умови геометрії трикутника, коли кути нахилу бічних ребер дорівнюють 45° , що збігається з результатами, які можна одержати за (2). Факт такого розподілу дотичних напружень значно впливає на напружено-деформований стан брусьвів. Подальше зменшення висоти трикутного

перерізу збільшує вплив горизонтальних напружень $\tau_{yx}(x, y, z)$ і, як наслідок, значення і напрямків повних напружень $\tau_{yx}(x, y, z)$. Для порівняння, в прямокутному перерізі, згідно з наведеною моделлю, горизонтальні дотичні напруження $\tau_{yx}(x, y, z)$ при згині у площині XZ дорівнюють нулю.

Таким же чином аналізуємо розподіл дотичних напружень і в інших формах поперечних перерізів. Зокрема, в еліптичному перерізі найбільші вертикальні дотичні напруження при $z = 0$ мають значення

$$\tau_{xz}(x, z) = \frac{4}{3} \frac{Q(x)}{A}, \quad (22)$$

а найбільші контурні горизонтальні

$$\tau_{xy}^n = \pm \frac{2}{3} \frac{Q b}{A a} = \pm 0,667 \frac{Q(x) b}{A a},$$

де a – вертикальна, а b – горизонтальна півосі еліпса. Епюри повних дотичних напружень та їх компонентів представлені на рис. 2.

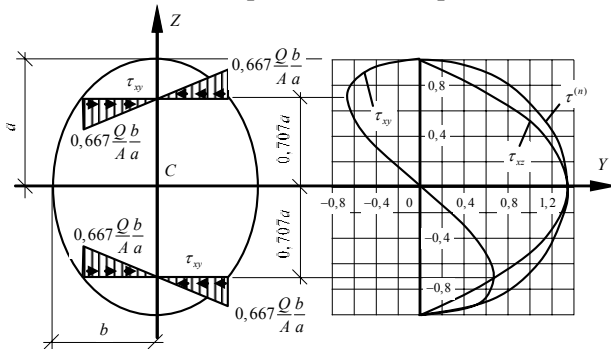


Рис. 2. Розподіл дотичних напружень у еліптичному перерізі бруса

Співвідношення найбільших складових (горизонтальних і вертикальних) повних дотичних напружень буде залежати від відношення значень півосей еліпса, а саме

$$\tau_{xy, max}^n / \tau_{xz, max}^n = 0,5b / a.$$

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Горик О.В., Толстопятов Р.В. Дотичні напруження в симетричному перерізі композитного бруса при згині // Опір матеріалів і теорія споруд. – 2000. – Вип.68. – С. 65-73.
2. Пискунов В.Г., Горик А.В., Чередников В.Н. Моделирование поперечных сдвигов дискретно-однородных композитных брусев на основе итерационного процесса с учетом тангенциальных нарузок. 1. Построение модели // Механика

Якщо переріз має горизонтальну піввісь "b", більшу за вертикальну "a", то горизонтальні напруження $\tau_{xy}(x, y, z)$ можуть досягати значення максимальних вертикальних напружень $\tau_{xz, max}(x, z)$ і бути навіть більшими від них.

Так, якщо $b = 2a$, то $\tau_{xy, max} = \tau_{xz, max}$, а якщо $b = 4a$, що наближає форму перерізу до традиційного прямокутника (плита), $\tau_{xy, max} = 2\tau_{xz, max}$. Ця обставина є досить важливою при виборі форми поперечного перерізу брусів, виходячи з опору його матеріалу дотичним напруженням в умовах згинання.

Таким чином, отримані вихідні гіпотези та теоретичні співвідношення для описання повних дотичних напружень у перерізах призматичних брусів.

Висновки. Отримані вище результати (залежності) справедливі, коли функція нормальних напружень $f_\sigma(z)$ не залежить від координати y , що достатньо обґрунтовано для суцільних перерізів (3). Однак у випадку поперечних перерізів у формі багатокомпонентних областей (наприклад, переріз з отворами, багат шаровий концентричний композит та інше) визначення цих залежностей ускладнюється наявністю особливих точок, величина напружень у яких суперечить гіпотезам. Наприклад, у кільцевому перерізі в точках перетину внутрішнього контуру із вертикальною віссю симетрії складова τ_{xz} повинна дорівнювати нулю, що обумовлено законом парності дотичних напружень. У той же час за концепцією Журавського на горизонтальній лінії, що проходить через цю точку, дотичні напруження існують. Це вимагає дещо іншого підходу до побудови теоретичних передумов визначення дотичних напружень у таких перерізах.

- компози́тных материалов. – Латвия, Рига. – 2000. – №4. – С. 487-500.
2. Разрешающие уравнения и результаты // Механика компози́тных материалов. – Латвия, Рига. – 2000. – Т.36. – №6. – С.743-756.
3. Филін А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. – Том 2. – М.–Л.: Наука, 1978. – 616 с.

УДК 631.316
© 2006

*Манчинський Ю.О., доктор технічних наук, професор,
Падалка В.В., асистент,*

Полтавська державна аграрна академія

ЗАСТОСУВАННЯ РОБОЧОГО ОРГАНА ҐРУНТООБРОБНОЇ МАШИНИ З МОЖЛИВІСТЮ ВІЛЬНО-ОБЕРТОВОГО РУХУ В ГОРИЗОНТАЛЬНІЙ ПЛОЩИНІ

Постановка проблеми.

Робота сучасних ґрунто-
обробних машин спрямо-
вана на підготовку посів-
ного шару до отримання

найкращої структури ґрунту для вегетації рос-
лин. При проектуванні робочих органів машин
прийнято вважати, що ґрунт у горизонтальній
площині є рівномірним за щільністю, а прикла-
дене зусилля йде безпосередньо на роботу від-
риву шару ґрунту та його переміщення з подріб-
ненням. Особливі вимоги до конструкції робо-
чих органів та конструкції кріплення набувають
при використанні робочих органів в енергозбері-
гаючих технологіях ведення землеробства, для
передпосівного обробітку ґрунту під сільського-
сподарські культури на задану глибину з якнай-
меншим відхиленням від запланованої (5), що
розробляється в Полтавській державній аграрній
академії за темою “Пошук та дослідження енер-
гозберігаючих технологій у рослинництві.”

**Аналіз основних досліджень і публікацій, у
яких започатковано розв’язання проблеми.**
Більшість наукових робіт, пов’язаних із ґрунто-
обробними машинами, присвячені розробці рі-
жучих елементів, зокрема культиваторних та
плоскоріжучих симетричних лап, їх геометрич-
них параметрів та конфігурації, пружної та жор-
сткої підвісок (3-4). У реальних умовах ґрунту,
як підтвердили наші попередні досліди, зусилля,
направлене на руйнацію шару ґрунту, в симет-
ричних робочих органах на кожній різальній ча-
стині неоднорідне за частотними та амплітудни-
ми характеристиками і, в більшості випадків, є
випадковою функцією.

Для жорстко закріплених до стійок робочих
органів, під впливом такої резонансної несталості
навантаження, відбувається “вимілювання”
руху (у пружних підвісках). Конструкція робо-
чого органу не враховує різниці зусиль, веде до
налипання ґрунту та накопичення непідрізаних
рослин, що погіршує якість виконання техноло-
гічного процесу.

*Обґрунтовано можливість використання
симетричного робочого органу землеобро-
блюючої машини з обмеженим вільним рухом у
горизонтальній площині для передпосівної
обробки ґрунту.*

Одним із шляхів поліп-
шення робочого процесу
обробітку ґрунту є запро-
поновані та досліджені
академіком О.Б. Верняє-

вим та іншими (1), використання активних робо-
чих органів, що рухаються в горизонтальній
площині під дією зовнішнього примусового зу-
силля. Проте сам автор неодноразово наголошу-
вав, що зменшення тягового зусилля не завжди
компенсує витрати енергії на коливальний рух.

Матеріали і методика досліджень. Проаналі-
зувавши попередні роботи, існуючі вітчизняні та
закордонні конструкції робочих органів і врахо-
вуючи неоднорідність та несталість ґрунту в го-
ризонтальному горизонті, виникла гіпотеза ство-
рення та дослідження конструкції вільно-коли-
вального робочого органу, яка б враховувала:

- нерівномірність навантаження на протилежні
різальні частини симетричного робочого органу;
- корегування кута різання в залежності від
навантаження для якісного підрізання рослин;
- налипання ґрунту та його виділення з робо-
чої поверхні;
- вивільнення робочого органу від рослинних
решток.

Такі властивості культиваторний робочий ор-
ган симетричної форми може отримати, на нашу
думку, якщо надати можливість вільно-
обертового руху на обмежений кут у горизонтал-
ьній площині.

Проаналізуємо зазначену гіпотезу, надавши
симетричному робочому органу обмежений ві-
льний рух у горизонтальній площині.

1. *Нерівномірність навантаження.* Жорстко
закріпленій робочий орган у горизонтальній
площині реагує на нерівномірний характер опо-
ру ґрунту внутрішньою пружністю елементів
підвіски, що призводить до перевантаження
конструкції або “вимілювання” ходу робочого
органу. Вільно-обертовий рух у горизонтальній
площині дає змогу підтримувати більш рівномі-
рне навантаження за рахунок збільшення дов-

жини фронту обробки на частині з меншим навантаженням опору ґрунту, що компенсує та вирівнює пружно-коливальний рух підвіски. До рівномірного різального руху додається ударне навантаження, що полегшує робочий процес перерізання бур'янів та кришіння ґрунту. Науковцями доведений факт зменшення зусилля руйнування ґрунту при дії ударного навантаження (1). Попередніми дослідженнями підтверджено самостійне зрівноваження зусиль на протилежних різальних елементах симетричних робочих органах.

2. Так, В.П. Горячкін (2) та інші науковці у своїх фундаментальних роботах, присвячених процесу різання, неодноразово звертали увагу на те, що різання значно полегшується, якщо *кут різання* збільшити. Проте до максимально можливого цей кут у реальних конструкціях робочого органу збільшувати недоцільно, оскільки зменшується довжина фронту обробки та збільшується металоемність конструкції. Досить складно підібрати цей параметр робочого органу для кожного типу ґрунту зі своїми відмінними агрофізичними властивостями. У конструкції жорстко фіксованого в горизонтальній площині робочого органу враховані більш типові властивості ґрунтів, хоча різноманітність властивостей простежується не лише в розрізі окремих регіонів, але й у розрізі одного реального поля. Запропонована конструкція робочого органу дозволяє автоматично змінювати цей кут різання не лише для агрофізичного фону поля, а й кожного конкретного метра оброблюваної поверхні.

Досліджуючи різання рослини, що закріплене тільки в одному місці, В.П. Горячкін довів доцільність збільшення кута різання. Провівши аналогію, можна констатувати, що різання рослини переходить, у більшості випадків, від різання-рубки до різання-перерізання, що якісно впливає на роботу при значній кількості рослин та їх великому перерізі. Доцільно підкреслити, що в момент першого контакту леза з рослиною в разі недостатності сили удару, відбувається огинання леза навколо рослини з плавним переходом до перерізання.

3. Науковці стверджують, що *налипання ґрунту на робочі органи* ґрунтообробної машини відбувається внаслідок кількох причин: фізико-технологічних властивостей ґрунту; недосконалості конструкції робочого органу. Налипання ґрунту створюється, як показали попередні дослідження, в місцях, де недостатня або взагалі відсутня бокова складова сили опору, тобто відсутня така сила, яка б змусила за рахунок сили тертя ґрунту по скупчених на робочому органі залишках відірвати їх від

ріжучого леза. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є застосування спеціального покриття робочого органа для зменшення сили тертя ґрунту по лезу, проте в такому випадку збільшується вартість його виготовлення.

Надання вільного коливання в горизонтальній площині робочого органа дає можливість змінювати напрямок нормальної складової зусилля в залежності від випадкової нерівномірності агрофізичних властивостей ґрунту. Така можливість, за результатами попередніх досліджень, значно зменшує налипання ґрунту. Утворення налипання попереду стояка зменшується також за рахунок тангенціального напрямку дії сили опору: за рахунок тертя ґрунт зсовує накопичення.

4. Основною з причин порушення технологічного процесу є *накопичення на робочих органах бур'янів та пожнивних решток*. Особливо гостра ця проблема постає при поверхневому обробітку, при якому залишається велика кількість пожнивних решток та незначна нормальна складова зусилля. Жорстко закріплені симетричні робочі органи в горизонтальній площині в більшості випадків не мають властивостей самоочищення, так як утворене рослинне скупчення попереду стійки має значні розміри в довжину відносно напрямку руху і може вимірюватися розмірами стерні або висотою бур'яну.

Робочий орган із вільно-обертливим рухом намагається зсунути рештки в бік найбільшого зусилля. Попередні дослідження, проведені авторами, підтвердили, що робочий орган із такими коливаннями менше забивається рослинними рештками і здатен до самоочищення.



Рис. Польова установка для дослідження технічних характеристик ґрунтообробного робочого органу з обмеженим вільно-обертливим рухом у горизонтальній площині

Для підтвердження припущень розроблена польова дослідна установка (рис. 1), що дозволяє фіксувати у вигляді математичних масивів даних навантаження на робочий орган при зміні: швидкості руху, кута повороту в горизонтальній площині, глибини обробки, кута повороту та агрофізичних властивостей польового фону. Запис і обробка даних проводилася за допомогою переносного ПСОМ та блоку перетворювачів електричного сигналу.

Результати досліджень. Виконавши дослідження роботи запропонованої схеми кріплення робочого органу та провівши математичну обробку статистичними методами масивів даних, доведено:

1. Виконане тарування лабораторної установки та підтверджена лінійна закономірність частот генерованих хвиль у залежності від повороту робочого органу та сили тяги, що прикладається до нього. Розраховані регресійні залежності показників, а саме:

для сигналу при дослідженні кута повороту робочого органу

$$Y = -53,0911 + 0,038X;$$

та сигналу при прикладеній силі тяги:

$$Y = -672,552 + 1,3251X,$$

що при довірчому інтервалі 99% мають похибку 0,56%. Такі розрахунки підтвердили можливість використання обладнання з достатньою точністю отриманої інформації.

3. Визначені умови проведення польових досліджень. Користуючись попередніми дослідженнями та спостереженнями, вибрані параметри значень полігону двофакторного експерименту. Отримані оптимальні значення зміни повороту робочого органу $\pm 15^\circ$ та відстані від осі обертання до носка симетричного робочого органу – 120мм.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. *Верняев О.В.* Активные рабочие органы культиваторов. – М.: Машиностроение, 1983. – 56 с.
2. *Горячкин В.П.* Собрание сочинений в 3-х томах. – М.: Машиностроение. – 1965. – Т1. – С. 24.
3. *Гуков Я.С.* Обробіток ґрунту. Технологія і техніка. Механіко-технологічне обґрунтування енергозберігаючих засобів для механізації обробітку ґрунту в умовах України. – К.: Нора-принт, 1999. – 31 с.
4. *Кушнарьов С.А.* Обґрунтування енергозберігаючого технологічного процесу обробітку ґрун-

Отримана суттєва кореляційна залежність, що становить 90% між силою тяги й кутом вільного обертання, а також (79%) – між силою тяги та відстанню від осі обертання, що вказує на суттєвість закономірностей.

4. Досліджений вплив конструктивних параметрів запропонованого робочого органу на якість підрізання рослинних решток та бур'янів. Отриманий поліном залежності між конструктивними факторами та якістю підрізання.

Отримана суттєва кореляційна залежність зміни конструктивних параметрів на якість підрізання рослин на рівні 80-90%.

5. Досліджений вплив параметрів робочого органу на накопичення рослинних решток та ґрунту. Визначені оптимальні параметри кута обмеження $\pm 15^\circ$, при якому відбувається покращання самоочищення на 30-45%.

6. Досліджена можливість роботи запропонованого робочого органу за умов перезволоження та пересушення ґрунтів.

Із цього робимо висновок, що за умов збільшення вологості до 25% зменшується сила тяги, в порівнянні з існуючою конструкцією, на 11%, а при вологості 15% – сила тяги зменшується на 15%.

Висновок. Запропонований симетричний робочий орган із вільно-обмеженим рухом у горизонтальній площині зменшує питомий опір в умовах підвищеної вологості та насиченості пожнивними рештками (6). Слід застосовувати обмежений обертаний рух у горизонтальній площині в межах $\pm 15^\circ$. Використання такого підходу до кріплення симетричних робочих органів у поверхневому передпосівному обробітку веде до зниження енергетичних витрат та підвищення якості виконання роботи.

ту та параметрів пружних робочих органів для умов степової зони України // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Глеваха, 1999. – 17 с.

5. *Ярошенко П.П., Падалка В.В., Антоненко С.С. та ін.* Комбінований ґрунтообробний агрегат // Деклараційний патент України №60879А, кл. А01В49/02. пріоритет від 23.03.2003, опубл. 15.10.2003, бюл №10.

6. *Ярошенко П.П., Падалка В.В.* Робочий орган ґрунтообробного знаряддя // Деклараційний патент України №63234А, кл. А01В35/20. пріоритет від 11.03.2003, опубл. 15.01.2004, бюл №1.

УДК 621.436

© 2006

Харак Р.М., Арендаренко В.М., кандидати технічних наук,
Полтавська державна аграрна академія

ДО ПИТАННЯ АНАЛІЗУ УНІВЕРСАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ШВИДКОСТІ МЕТОДОМ ВЕКТОРНИХ КОНТУРІВ

Постановка проблеми.

У поліпшенні паливної економічності та зниженні шкідливої дії відпрацьованих газів на довколишнє середовище й здоров'я людини важливу роль відіграють розробки і дослідження перспективних конструкцій паливної апаратури із застосуванням сучасних методів і технологій. Одним із резервів економії палива є удосконалення систем автоматичного регулювання частоти обертання автотракторних двигунів.

За нових соціально-економічних умов реформування аграрного сектора економіки і жорсткої конкуренції технологій та необхідної для її здійснення сільськогосподарської техніки знаходять широкого застосування вітчизняні орно-просапні трактори ХТЗ-120/121 і ХТЗ-160, ЮМЗ-8280 і ЮМЗ-10280 "Дніпро", енергонасичені трактори загального призначення ХТЗ-170 із різними моделями двигунів вітчизняного і зарубіжного виробництва.

Протягом року ці колісні трактори застосовуються для виконання різних польових робіт і тракторних перевезень. Досвід експлуатації показує, що 70-80% вантажоперевезень у сільському господарстві виконується тракторним агрегатом, причому перевезення вантажів на незначні відстані тракторним транспортом економічніший, ніж автомобільним.

Аналіз основних досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання проблеми. Аналіз розподілу навантажень на колісні трактори за видами робіт, режимами роботи та характером зовнішнього навантаження, які діють на МТА, показує, що одним з ефективних напрямів покращання експлуатаційної паливної економічності тракторних агрегатів, зниження токсичності і димності відпрацьованих газів дизеля є правильний вибір засобу регулювання частоти обертання в залежності від умов експлуатації.

Для енергонасичених колісних тракторів роз-

Розроблений аналітичний та експериментальний методи визначення переміщень якорів електромагнітів системи автоматичного переключення режимів регулювання.

роблений універсальний регулятор з автоматизованим механізмом переключення швидкісного режи-

му дизеля: забезпечується всережимне регулювання при виконанні польових робіт, де потрібне точне підтримання швидкості руху машинно-тракторного агрегату і дворезимне – на транспортних роботах, де швидкість змінюється в широкому діапазоні (3-4).

Незважаючи на великий обсяг дослідно-конструкторських напрацювань щодо створення універсальних регуляторів для тракторних дизелів, невирішеним залишається питання стосовно переключення режимів регулювання, яке відбувається вручну.

Мета – розробити методику дослідження кінематики універсального регулятора паливного насоса розподільчого типу з автоматичним переключенням режимності роботи трактора ХТЗ-150К-03.

Результати досліджень. Для забезпечення автоматичного переключення із всережимного регулювання на дворезимне необхідно виконати операції в такій послідовності: 1) якорем електромагніта 9 (рис. 1) встановити двоплечий важіль регулятора 10 у положення, що відповідає подачі палива, необхідного для роботи двигуна на холостому ході за мінімальною частотою обертання; 2) притиснути внутрішній важіль керування подачі палива 7 до гвинта 4 якорем електромагніта 3 ; 3) якорем електромагніта 5 встановити поворотний упор 6 навпроти блоку пружин 8. Для визначення раціональних параметрів ланок механізму автоматизованого переключення режимності роботи тракторного двигуна необхідно дослідити кінематику універсального регулятора. Кінематичний аналіз проводимо методом векторних контурів (1). Універсальні регулятори вже досліджувалися вищезгаданим методом (2), але без елементів автоматизованого переключення режимності регулювання.

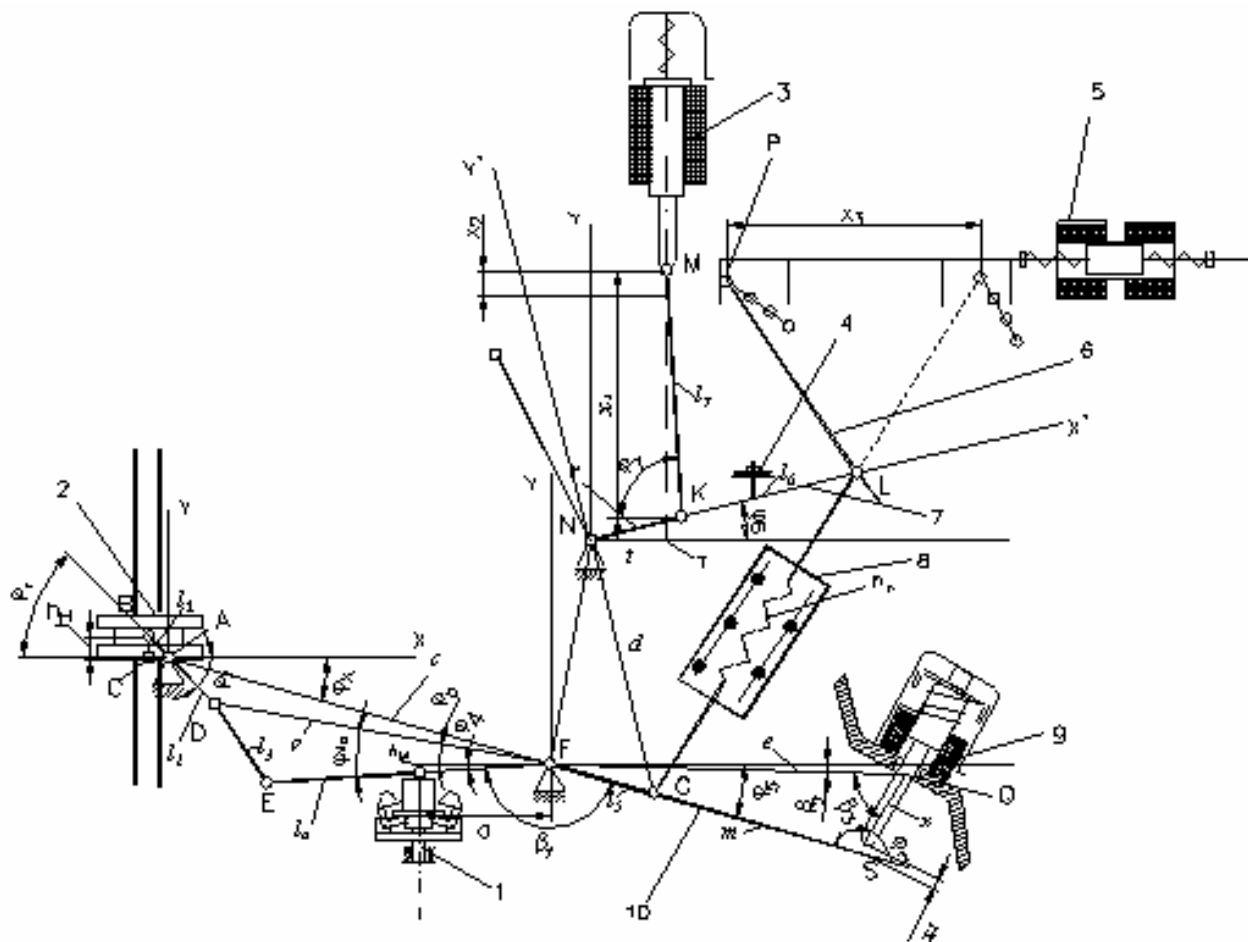


Рис. 1. Кінематична схема універсального регулятора паливного насоса НД 22/6Б4 з системою автоматичного переключення режимності регулювання: 1 – механічний чутливий елемент; 2 – дозатор; 3, 5, 9 – електромагніти; 4 – упорний гвинт; 6 – поворотний упор; 7 – внутрішній важіль керування паливним насосом; 8 – блок пружин регулятора; 10 – двоплечий важіль регулятора

Для контуру $ABCA$ вхідною є координата дозатора h_H , а вихідною – кут φ_1 , який рівний

$$\varphi_1 = \arcsin \frac{h_H}{l_1} \quad (1).$$

Розбиваємо замкнутий контур $CDEFC$ на два трикутники CDF і DEF , векторні рівняння яких будуть мати вигляд:

$$\text{для контуру } CDF \quad l_3 + p - x = 0, \quad (2)$$

$$\text{для контуру } DEF \quad l_3 + l_4 - p = 0, \quad (3)$$

де p – перемінний по модулю вектор, який визначає положення точок D і F .

Проектуючи векторне рівняння (2) на вісі Ax і Ay , отримаємо

$$l_2 \cos \varphi_1 + p \cos \varphi_p - c \cos \varphi_x = 0 \quad (4)$$

$$l_2 \sin \varphi_1 + p \sin \varphi_p - c \sin \varphi_x = 0 \quad (5).$$

Із рівнянь (4) та (5) знаходимо кут φ_p

$$\varphi_p = \arctg \frac{c \sin \varphi_x - l_2 \sin \varphi_1}{c \cos \varphi_x - l_2 \cos \varphi_1} \quad (6).$$

Вектор p визначаємо із трикутника ADF за теоремою косинусів:

$$p = \sqrt{l_2^2 + x^2 - 2l_2x \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (7).$$

Із трикутника DEF знаходимо кут φ_{4p}

$$\varphi_{4p} = \arccos \frac{p^2 + l_4^2 - l_3^2}{2l_4p} \quad (8).$$

Кут нахилу вектора l_4 до вісі Ax φ_4 буде рівний

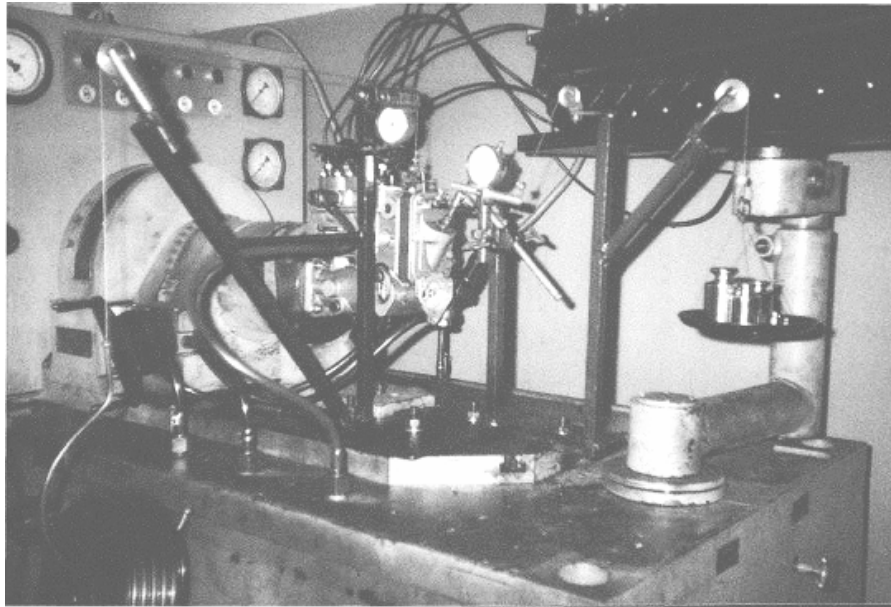
$$\varphi_4 = \varphi_{4p} - \varphi_p \quad (9).$$

Для знаходження переміщення x_1 якоря електромагніта 9 розглядаємо трикутник FSQ , використовуючи теорему синусів,

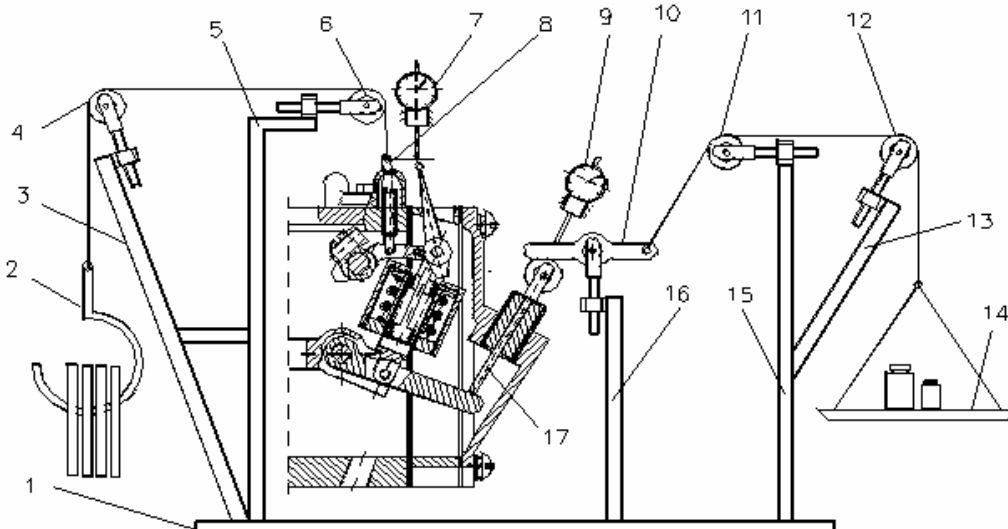
$$\frac{x + x_1}{\sin(\varphi_5 - \beta_2)} = \frac{e}{\sin \varphi_m} \quad (10)$$

де x – довжина упора електромагніту.

Кут φ_5 рівний



а) загальний вигляд



б) принципова схема

Рис. 2. Лабораторна установка з визначення переміщення електромагнітів системи автоматичного переключення режимів регулювання універсального регулятора

$$\varphi_5 = 180^\circ - \beta_1 - \varphi_4 \quad (11).$$

Кут φ_m дорівнює

$$\varphi_m = 180^\circ - \beta_3 + \beta_2 - \varphi_5 \quad (12).$$

Із рівняння (10), враховуючи вирази (9), (11), (12), знаходимо величину переміщення x_1 :

$$x_1 = \frac{e \sin(180^\circ - \beta_1 - \beta_2 - \varphi_{4p} + \varphi_5)}{\sin(\beta_1 + \beta_2 + \varphi_{4p} - \beta_3 - \varphi_p)} - x \quad (13).$$

Підставляючи значення координати дозатора h_H на холостому ході за мінімальної частоти обертання, отримуємо переміщення якоря електромагніта 9 $x_1 = 3,4 \dots 3,5$ мм.

Для визначення переміщення якоря електромагніта 3 розглянемо контур $TNKMT$, векторне

рівняння замкнутості якого має вигляд:

$$t + r + l_7 - x_M = 0 \quad (14).$$

Проектуємо рівняння (14) на вісі Nx і Ny . Маємо

$$t + r \cos \varphi_6 + l_7 \cos \varphi_7 = 0 \quad (15)$$

$$r \sin \varphi_6 + l_7 \sin \varphi_7 = x_M \quad (16).$$

Із рівняння (15) знаходимо кут φ_7

$$\cos \varphi_7 = -\frac{t + r \cos \varphi_6}{l_7} \quad (17).$$

Із рівняння (16), з урахуванням рівняння (17), визначимо величину переміщення x_M :

$$x_M = r \sin \varphi_6 + l_7 \sqrt{1 - \left(\frac{t + r \cos \varphi_6}{l_7} \right)^2} \quad (18).$$

Так як кут φ_6 коливається в межах $9^\circ-13^\circ 6'$, x_M становитиме 32,4-36,5 мм, а значить, переміщення x_2 якоря електромагніту 3 дорівнює 4,62 мм.

При знаходженні переміщення x_3 якоря електромагніта 5 складаємо систему лінійних рівнянь для визначення положень ланок плоского незамкнутого кінематичного ланцюга. В якості узагальненої координати прийемо кут φ_6 . Систему координат $Nx'u'$ отримуємо із системи Nxu шляхом повороту на кут φ_6 навколо початку координат N . Точка P має координати $(x_0; y_0)$ відносно системи Nxu та координати $(x'_0; y'_0)$ – відносно $Nx'u'$. Координати точки в системах Nxu і $Nx'u'$ зв'язані формулами:

$$\begin{cases} x_0 = x'_0 \cos \varphi_6 - y'_0 \sin \varphi_6 \\ y_0 = x'_0 \sin \varphi_6 + y'_0 \cos \varphi_6 \end{cases} \quad (19).$$

При максимальному положенні внутрішнього важеля керування подачею палива 7 точка P в системі $Nx'u'$ при всережимному регулюванні має координати (18,2; 38,7), при дворежимному – (47,3; 38). При підстановці значень у рівняння (19) отримаємо переміщення $x_3 = 28,4$ мм.

Для перевірки адекватності розрахунку параметрів дослідного регулятора розроблена лабораторна установка для вимірювання зусилля та переміщення, з якими якорі електромагнітів повинні діяти на деталі універсального регулятора (рис. 2).

Установка складається з плити 1, стійок 3, 5, 13, 14, 15 та 16, направляючих блоків 4, 6, 11 і 12, гака 2, тарілочки 14, індикаторів годинникового типу 7 і 9, коромисла 10.

Визначення сили та переміщення якорів електромагнітів за допомогою установки проводилося за наступною методикою: замість серійного коректора вкручувалася втулка зі штоком 17. Гак

2 з'єднаний сталевим канатом через ланку 8 із внутрішнім важелем керування регулятора. Тарілочка 14 з'єднана сталевим канатом з одним плечем коромисла 10, друге плече тиснуло на шток 17. Навантаження на гаку 2 створювалося до тих пір, доки внутрішній важіль керування регулятором не торкнеться гвинта регулювання максимальної частоти обертання. При цьому фіксувалося переміщення ланки 8 індикатором 7. Потім за допомогою гирь на тарілочки 14 навантаження створювалося на важіль коректора, при якому він встановлювався в положення, що відповідає мінімальній частоті обертання холостого ходу. При цьому визначалася циклова подача палива.

За результатами лабораторних досліджень встановлено, що автоматичне переключення режимів відбувається при переміщенні якоря електромагніту важеля коректора 3,5...3,6 мм, внутрішнього важеля керування подачі палива – 4,5...4,7 мм, поворотного упора – 27...28 мм.

Розбіжність розрахункових результатів з експериментальними не перевищує 4%, що свідчить про правильність розробленої методики.

Висновки: 1. У результаті кінематичного розрахунку отримані аналітичні рівняння, що дозволяють дослідити характер взаємодії електромагнітів на деталі універсального регулятора та визначити конструктивні параметри ланок механізму автоматизованого переключення режимності роботи тракторного двигуна. Розроблений спосіб, методика та обладнання для перевірки адекватності математичної моделі.

2. Запропонована система автоматичного переключення режимності дизеля колісного трактора ХТЗ серії 150 дає змогу спростити процес управління двигуном, зменшивши експлуатаційну витрату палива на 4-6% при виконанні транспортних робіт.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. *Артоболевский И.И.* Теория механизмов и машин. – М.: Наука, 1988. – 640 с.
2. *Говорун А.Г., Самусь Н.И., Головчук А.Ф.* Статический расчёт ограничителя дымления для топливных насосов НД 22/6Б4 // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: Изд-во ХТУ, 1981. – Вып 33. – С. 125-130.
3. *Головчук А.Ф., Харак Р.М.* Автоматизация переключения все режимного и дворежимного регулирования универсального регулятора колёсных тракторов // Вісник ХДТУСГ. Зб. наук. праць

“Підвищення надійності відновлюємих деталей машин”. – Харків, 2001. – Вип. 8. – Т.2. – С.178-182.

4. *Головчук А.Ф., Харак Р.М., Левчук В.И.* Разработка и исследование универсальных регуляторов топливных насосов НД-22/6 для колёсных тракторов ХТЗ // Вестник Национального технического университета “ХПИ”. Тематический сборник научных работ “Двигатели внутреннего сгорания”. Харьков, НТУ “ХПИ” – 2001. – №2. – С.10-19.

УДК 613.4:631.51

© 2007

*Удовиченко Г.А., кандидат технічних наук,
Полтавський інститут АПВ ім. М.І. Вавилова*

КОНСТРУКТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ПРИЧЕПА 1-ПТСМ-9 ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ РУЛОНІВ СІНА ТА СОЛОМИ

Постановка проблеми.

Проблема зниження затрат при перевезенні рулонів сіна та соломи залишається актуальною.

Вирішення цієї проблеми можливе за умов впровадження причепа 1-ПТСМ-9, розробленого, виготовленого й успішно випробуваного інженерно-технічним персоналом ДП ДГ "Степне" Полтавського ІАПВ.

Незважаючи на очевидні переваги причепа 1-ПТСМ-9, в порівнянні з 2-ПТС-4, впровадження цієї розробки в господарствах області ще недостатнє.

Аналіз основних досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання проблеми. Традиційна технологія перевезення рулонів сіна передбачає причеп 2-ПТС-4 в агрегаті з тракторами 1,4 т.с. В один причеп завантажується лише два рулони. Трактор МТЗ чи ЮМЗ можуть агрегувати максимум два причепа з чотирма рулонами сіна або соломи.

Впровадження нової технології перевезення рулонів сіна та соломи сприяє зниженню вартості перевезення вантажу.

Нині на підприємствах України ще не освоєно виробництво причепа 1-ПТСМ-9, розробленого в ДП ДГ "Степне" Полтавського інституту АПВ.

У зв'язку з цим заслуговують на увагу результати сертифікаційних випробувань в УкрЦВТ тракторного напівпричепа НС-17 "ГОЛЕМ" виробництва чеської фірми "ЗДТ" (1).

Незважаючи на те, що напівпричеп виготовляють у модифікації кузов-самоскид із тристороннім перекиданням, конструктивні параметри причепа не відповідають компактному завантаженню п'ятисоткілограмових рулонів сіна.

Важливою умовою успішної реалізації технічної політики в аграрному секторі є проектування та реалізація перспективної системи машин, яка забезпечить створення та освоєння виробництва сільськогосподарської техніки, у тому числі й транспортування засобів для перевезення різних видів вантажу (2).

Значний асортимент транспортної техніки для перевезення різних видів вантажу виробляють вітчизняні та зарубіжні фірми: Джанківський,

Викладені конструктивні особливості та результати експлуатаційних випробувань причепа 1-ПТСМ-9 для перевезення рулонів сіна та соломи.

Красноградський заводи, ООО Нове Весели та багато інших.

Мета досліджень та

методика їх проведення. Розробка, виготовлення і випробування причепа 1-ПТСМ-9 для перевезення рулонів сіна та соломи проводилися у ДП ДГ "Степне" Полтавського інституту АПВ ім. М.І. Вавилова. Для виконання програми досліджень використали загальновідомі методи і показники оцінки технологій, технічних засобів та організаційних форм використання техніки.

Результати досліджень. Виникнення нових вдосконалених знарядь праці, технічних новинок стало традицією в ДП ДГ „Степне” Полтавського інституту АПВ ім. М.І. Вавилова. Найкраще спрацьовує колектив винахідників і раціоналізаторів, коли у процесі праці виникають проблеми, а фінансування обмежене, придбання ж нових технічних пристроїв за сучасними розцінками – занадто дороге навіть для сильних господарств.

Щороку тут виникали проблеми з перевезенням рулонів сіна та соломи. Інженерно-технічна служба сприймала від раціоналізаторів всі ідеї та пропозиції із вдосконалення механізації транспортування вантажу, що стало запорукою створення причепа 1-ПТСМ-9.

Директор ДП ДГ „Степне” Сокирко П.Г. доклав чимало зусиль, аби причеп не тільки успішно пройшов випробування, але й був задіяний у виробництві.

Застосували оригінальний механізм відкриття і закривання бокових бортів та їх фіксації, який складається з чотирьох силових циліндрів, тросів та шківів діаметром 255 мм. Принцип роботи механізму простий: при висуненні штоків силових циліндрів бокові борта відкриваються; після розвантаження рулонів штоки витягуються; бокові борта закриваються і фіксуються. Для полегшення процесу розвантаження 500-кілограмових рулонів, права і ліва половини дна платформи причепа мають кут нахилу 35°.

При відкритих бокових бортах рулони (без втручання робітників) без сторонньої допомоги скочуються з похилої платформи причепа на місце їх зберігання.

За рахунок добудови платформи ширину причепа збільшено на 1 м, загальну площу платформи – на 5 м². Висота середнього і заднього бортів становить 1,4 м, бокових – 0,7 м, об'єм кузова – 30 м³. Вантажопідйомність удосконаленого причепа становить 4,5-5 тис. кг.

Причеп 1-ПТСМ-9 агрегується з тракторами класу 1, 4 т. с. і обслуговується одним трактористом.

Використовуючи два переобладнані причепа, заготівля високоякісного сіна в дослідному господарстві проходить в стислі агротехнічні терміни.

Конструкція причепа надійна в роботі й проста в обслуговуванні. Конструктивно переобладнаний причеп 1-ПТСМ-9 нескладний, – його

БІБЛІОГРАФІЯ

1. *Гуков Я.С., Грицишин М.І.* Наукові основи технічної політики в аграрному секторі України // Механізація та електрифікація сільського господарства. – 2006. – Вип. №90. – С. 11.

можна виготовити в умовах механічних майстерень будь-якого господарства. Нові технології та технічні пристрої економлять кошти господарства, поновлюють місцевий бюджет.

Висновки. Від застосування удосконаленого причепа 1-ПТСМ-9 річний економічний ефект становить 3,8 тис. гривень. За допомогою причепа можна одночасно перевозити 9 рулонів сіна, тоді як трактор МТЗ-80 з двома причепами 2-ПТС-4 за один рейс перевозить лише 4 рулони. Таким чином, при більшій у 2-2,2 разу продуктивності праці витрати пального зменшуються на 30-40%. Вивільняється один трактор, механізатор і робітники, які мали розвантажувати рулони. Крім того, ефективніше використовується завантажувач рулонів на причепах.

2. *Ясенецький В., Шевченко В.* Високопродуктивним кормозбиральним комбайнам – високовантажний транспорт // Техніка АПК. – 2000. – №10. – с 24.

УДК 581.132
© 2006

Велит І.А., викладач,
Полтавська державна аграрна академія

ЗАСТОСУВАННЯ НАТРІЄВИХ ЛАМП ВИСОКОГО ТИСКУ З ВИПРОМІНЮЮЧИМИ ДОБАВКАМИ ДЛЯ ВИРОЩУВАННЯ ТОМАТІВ В УМОВАХ ЗАКРИТОГО ҐРУНТУ

Постановка проблеми. Використання оптичного випромінювання (ОВ) у технологічних процесах сільського господарства є одним із важливіших резервів підвищення продуктивності основної галузі сільськогосподарського виробництва – рослинництва.

Найбільш розповсюдженими сільськогосподарськими культурами, що вирощуються в умовах захищеного ґрунту, є рослини томатів і огірків, під які відводиться 98% площі теплиць (14). Оптимізація основних параметрів ОВ у процесі вирощування цих культур – найважливіша задача досягнення їх рентабельного виробництва.

Аналіз основних досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання проблеми. Зміна інтенсивності та спектрального складу ОВ впливає на формування структурно-функціональної організації фотосинтетичного апарату, спрямованість метаболічних реакцій і морфогенез рослин (8). Енергетичний обмін потребує великої кількості пігментів, що поглинають значну частину випромінювання у фотосинтетично активній ділянці спектру. На відміну від енергетичного обміну, реакції фоторегулювання можуть здійснюватися за допомогою дуже малої кількості пігменту, який поглинає незначну частину світла. Тому велике значення має комплексна оцінка впливу ОВ як окремих, так і різноманітних комбінацій спектральних ділянок фотосинтезно-активної радіації (ФАР) (4) на фотосинтетичну активність ценозів протягом усього вегетаційного періоду з використанням світлових режимів опромінення з тими спектральними й енергетичними характеристиками, що реально придатні для умов формування повноцінного врожаю (20).

На сьогоднішній день для світлокультури рослин застосовують широкий асортимент джерел світла: лампи розжарювання, розрядні лампи низького тиску, розрядні лампи високого тиску.

Розглянуто особливості використання різних типів джерел штучного освітлення для світлокультури рослин. Наведені результати досліджень дії випромінювання натрієвих ламп високого тиску з добавками цезію у порівнянні з іншими джерелами світла. Встановлені відмінності в реакціях рослин томатів сортів Де Барао і Гібрид Тарасенка на накопичення пігментів та їх співвідношення.

Кожне джерело має свій спектр випромінювання і по-різному впливає на розвиток рослин.

Лампи розжарювання через свою низьку світлову ефективність не знаходять широкого використання (17), але для збіль-

шення долі червоного випромінювання можуть використовуватися за умов сумісної експлуатації з іншими джерелами світла. Спектр ламп наведений на рис. 1а.

Розрядні лампи низького тиску (люмінесцентні лампи) мають відносно високу світлову ефективність і широкі можливості регулювання спектрального складу випромінювання за рахунок застосування різних люмінофорів. Термін експлуатації ламп у 10-15 разів перевищує цей показник для ламп розжарювання і складає 12000-15000 год. Головний недолік ламп цього типу – низька одинична потужність, що потребує застосування великої кількості ламп (1, 17). Спектри випромінювання деяких типів люмінесцентних ламп наведені на рис. 1в.

Розрядні лампи високого тиску (ксенонові, ртутні, металогалогенні, натрієві). Ці лампи завдяки високій світловій ефективності, довговічності набули найбільш широкого застосування.

Ксенонові лампи високої інтенсивності мають спектр випромінювання, який найближче із всіх джерел нагадує сонячний (рис. 1б). Головний недолік цих ламп – відносно низький коефіцієнт корисної дії (ККД); він лише у 1,5-2 рази перевищує ККД ламп розжарювання. Лампи мають невеликий термін експлуатації – від 500 до 2000 годин (2, 21).

Ртутні лампи високого тиску з люмінофорним покриттям на колбі. Лампи мають лінійчатий спектр із великими інтервалами між лініями. Максимальне випромінювання приходить на зелену та синю області спектру. Через відсутність у спектрі цих ламп випромінювання в червоній (640-680 нм) області спектру вони мало придатні для

виращування рослин за штучного опромінення. Дослідження показали, що при опроміненні лампою рослини пшениці не наливають зерно, спостерігається стерильність пилку, погано росте люцерна, овес, томати, перець та ін. (12). Але ж ці лампи широко використовуються для освітлення розсади огірків і томатів у теплицях як джерело синьо-фіолетової радіації, якої недостатньо в сонячному спектрі у зимову пору року (17). Розсада, вирощена із застосуванням цих ламп, має короткі стебла і черешки, збільшену пластину листа з високим вмістом хлорофілу. Лампи мають низький ККД по ФАР-12% (1, 15, 19). Лампи типу ДРЛФ надійні – термін їх експлуатації становить близько 10000-12000 год, мають досить високу стабільність, спектр випромінювання суттєво не змінюється при зміні типового режиму, напруги мережі та терміну експлуатації. Спектр цих ламп наведений на рис. 1б.

Металогалогенні лампи (МГЛ) високого тиску мають виключно широкі можливості регулювання спектру випромінювання за рахунок введення в розряд різних елементів. На сьогодні розроблені й виробляються майже всіма провідними фірмами МГЛ для рослинництва. ККД цих ламп в області ФАР сягає 20-25% за достатньо ефективного спектрального складу випромінювання (рис. 1г). Головний недолік цих ламп – низька стабільність світлових параметрів у процесі експлуатації, залежність ККД і спектрального складу випромінювання від напруги мережі живлення (від спожитої потужності, яка визначає тепловий режим і, відповідно, тиск парів випромінюючих елементів у розрядній трубці). МГЛ мають відносно невеликий, як для розрядних ламп, термін роботи – 4000-6000 год. Найтиповіші МГЛ, які виробляються в промислових

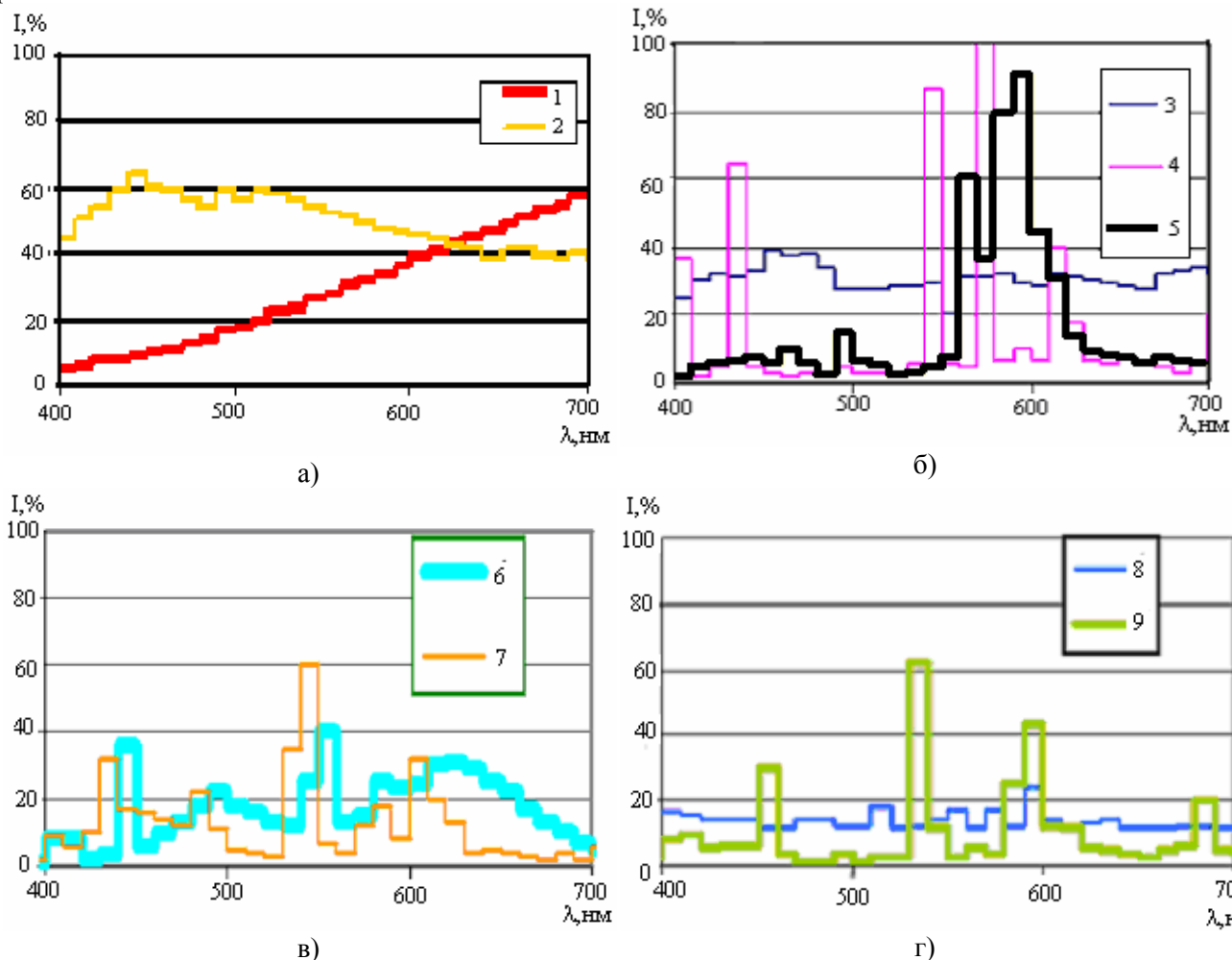


Рис. 1. Спектр випромінювання: а) 1 – лампи розжарювання, 2 – денний; б) розрядні лампи: 3 – ксенонова лампа, 4 – ртутна лампа з люмінофорним покриттям на колбі, 5 – натрієва лампа високого тиску; в) люмінесцентні лампи: 6 – «білого» світла, 7 – «денного» світла; г) металогалогенні лампи з добавками галогенідів: 8 – Na, Sc, Th, 9 – Na, Tl, In

обсягах, мають наповнення галогенідів металів трьох типів: Na, Tl, In, Na, Sc та галогенідів рідкоземельних елементів, наприклад, Dy, Ho, Tm та ін. (2, 16). Спектри цих типів ламп наведено на рис. 1г.

Натрієві лампи високого тиску (НЛВТ) є найефективнішими джерелами світла. ККД для цих ламп в області ФАР досягає 27%, що в 1,4-2 рази більше, ніж для люмінесцентних ламп низького тиску, в 2,2-2,5 рази більше, ніж для різних ламп високого тиску типу ДРЛФ та ксенонних ламп, і в 7-8 разів більше за ККД ламп розжарювання. Лампи дуже надійні (середній термін роботи перевищує 12000 годин), мають високу стабільність. Натрієві лампи випромінюють в основному в оранжево-жовтій області спектру. В спектрі суттєво недостає синьої та червоної складової випромінювання і це є головним недоліком цих ламп. Спектр випромінювання НЛВТ наведений на рис. 1б.

Для вибору обґрунтованих вимог до спектру випромінювання ламп необхідне проведення досліджень по впливу опромінення різних областей спектра на ріст і розвиток рослин. Такі дослідження проводилися для різних видів рослин: огірка, томата (14), редису, гороху, пшениці (10). Як було показано (14), для світлокультури огірка кращим є випромінювання в діапазонах 500-600 нм і 600-700 нм. Найкращі результати для промислової технології забезпечує спектральне співвідношення

$$E_{\text{с}}:E_{\text{з}}:E_{\text{к}}=(15-20)\%:(35-45)\%:(40-45)\%.$$

Істотно інші висновки про кращі спектри були отримані на ценозі томату (10). За умов випромінювання в області 600-700 нм продуктивність ценозу томата найвища. Випромінювання в діапазонах 400-500 і 500-600 нм необхідне в незначній мірі, забезпечуючи, очевидно, фотоморфологічні процеси в рослинах. Вимоги до кращих спектральних характеристик для світлокультури томата виглядають так:

$$E_{\text{с}}:E_{\text{з}}:E_{\text{к}}=(10-20)\%:(15-20)\%:(60-75)\% (10).$$

Також залишається нез'ясованим питання про вплив спектрального складу світла на рослини різних сортів одного виду.

У зв'язку з великою значимістю якісних характеристик світла для рослинництва в останній час підвищуються вимоги не лише до світлової ефективності і довговічності, але і до спектрального складу штучних джерел світла.

Для використання НЛВТ у сільському господарстві необхідно оптимізувати спектральний склад випромінювання під конкретну світлокультуру рослин і максимально підвищити проме-

невий потік в цій області ФАР, причому особливої увагу заслуговують питання впливу різних добавок на спектральні характеристики та експлуатаційні параметри НЛВТ (3, 18).

Відомі роботи (5, 22) щодо дослідження процесів у НЛВТ та з'ясування шляхів їх вдосконалення. Проведено аналіз факторів, що впливають на параметри НЛВТ (18). Виходячи з того, що випромінювання НЛВТ в ІЧ-області спектру складає 32%, а випромінювання D-дуплету Na – 25%, підвищення можливе за рахунок зменшення частки ІЧ-випромінювання, або за рахунок зменшення теплового потоку з відповідним перетворенням енергії у видиме випромінювання. Факторами, котрі впливають на перерозподіл енергії між складовими енергетичного балансу, є діаметр розрядної трубки, температура її стінок і температура розряду. Взаємозв'язок цих факторів потребує їх оптимального вибору.

Мета досліджень та методика їх проведення. Метою роботи є дослідження світлотехнічних характеристик натрієвих ламп високого тиску з додаванням лужних металів – цезію, калію, рубідію та дії випромінювання високоінтенсивних розрядних натрієвих ламп з додаванням цезію на ріст і розвиток різних сортів томатів.

Досліджувалися натрієві лампи високого тиску, виготовлені на Полтавському заводі газорозрядних ламп: лампи з розрядними трубками з полікристалічного окису алюмінію; зовнішній діаметр – 8,9 мм; міжелектродна відстань – близько 85 мм. Вони наповнювалися 25 мг амальгами і ксеноном в умовах холодного тиску близько 20 мм. рт. ст. Склад амальгами натрію з додаванням: цезію (Hg – 20%, Na – 75%, Cs – 5%), калію (Hg – 20%, Na – 79%, K – 1%), рубідію (Hg – 20%, Na – 79%, Rb – 1%).

Амальгами Na-Hg-Me були виготовлені з точністю дозування основних компонентів $\pm 0,5\%$. Для одержання амальгами використовувалися натрій високої чистоти (ТУ-48-03-54-79) і ртуть марки Р-000. Вміст добавок в амальгамі був від 1 до 10 ат.%. Усього виготовлялося по п'ять зразків ламп з амальгамою кожного складу. Для стабілізації електричних світлових параметрів лампи перед вимірами відпалювалися протягом 100 год. Вимірювання електричних і світлових параметрів виконувалися відповідно до вимог ГОСТу (6). Похибка виміру електричних і світлових параметрів не перевищує 5%. Виміри спектральних характеристик проводили за допомогою спектрометра ИСП-51 із приймачем ФЭУ-22 (чуттєвий у діапазоні 400-1200 нм), реєстрацію фотострумів – за допомогою потенціометра

КСП-4 та цифрового вольтметра В7-27. Градування установки по спектральній чутливості проводилося за допомогою лампи СІРШ-8,5-200 вольфрамовою стрічкою. Виміри параметрів ламп проводилися при зміні потужності лампи P_l від 250 до 600 Вт, перекриваючи діапазон традиційних для стандартних НЛВТ питомих потужностей ($P_l=40\div 60$ Вт/см).

Об'єктом дослідження були рослини томатів сорту Гібрид Тарасенко і Де Барао. Рослини були опромінені світлом ламп із різним спектральним складом випромінювання. Фотоперіод склав 16 годин. Рослини опромінювалися протягом 28 днів. У якості джерел світла були обрані натрієві лампи високого тиску з додаванням цезію, а також для порівняння – натрієві лампи високого тиску ДНаТ400, ртутні лампи високого тиску з люмінофорним покриттям на колбі ДРЛФ400. Інтенсивність опромінення складала 120 Вт/м^2 . Рівень опромінення визначали за відповідною методикою (21). Вміст пігментів визначали спектрофотометричним методом (13) на фотометрі КФК-ЗМП. Всі експериментальні дані оброблені статистично (9). Зразки листів досліджували на 22-ий день.

Результати досліджень. У результаті проведених експериментів отримані наступні результати. Спектральний склад випромінювання ламп з додаванням Cs, K, Rb має дещо меншу (у порівнянні зі стандартними натрієвими лампами високого тиску) в області 500-600 нм і значно бі-

льшу інтенсивність в червоній (600-700 нм) та ближній інфрачервоній областях (рис. 2).

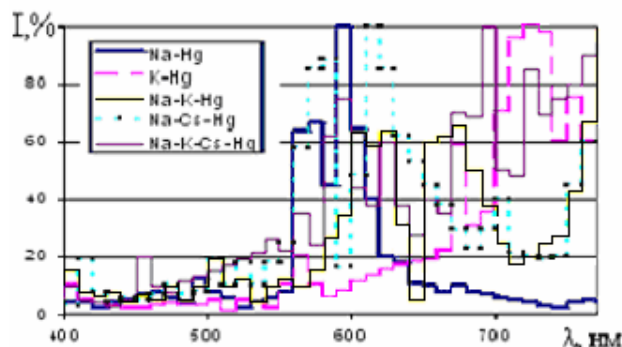


Рис. 2. Спектри стандартних натрієвих ламп та натрієвих ламп із різним наповненням

На рис. 3 наведено залежності енергетичного (Φ_e) та світлового потоків (Φ) від питомої потужності лампи (P_l) та температури холодної зони (txz) для ламп із Na-Cs-Hg та Na-Cs-K-Hg наповненням, з яких видно, що більш ефективними є лампи з додаванням Cs. Із збільшенням P_l та txz зростання енергетичного потоку відбувається переважно за рахунок зростання червоної та інфрачервоної областей.

На рис. 4 представлено залежності характеристик енергетичного потоку випромінювання (Φ_e) пальника ламп із міжелектродною відстанню 8,5 см та різними добавками від питомої потужності (P_l).

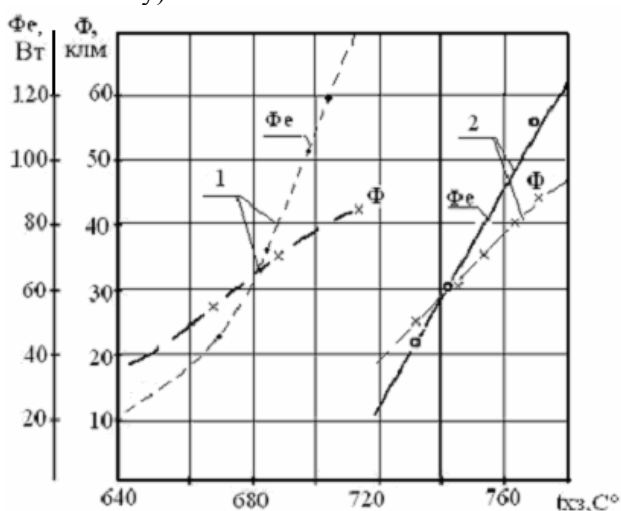


Рис. 3. Залежність енергетичного (Φ_e) та світлового (Φ) потоку випромінювання НЛВТ потужністю 400 Вт з різним вмістом компонентів 1 – Na-Cs-Hg; 2 – Na-Cs-K-Hg від температури холодної зони (txz)

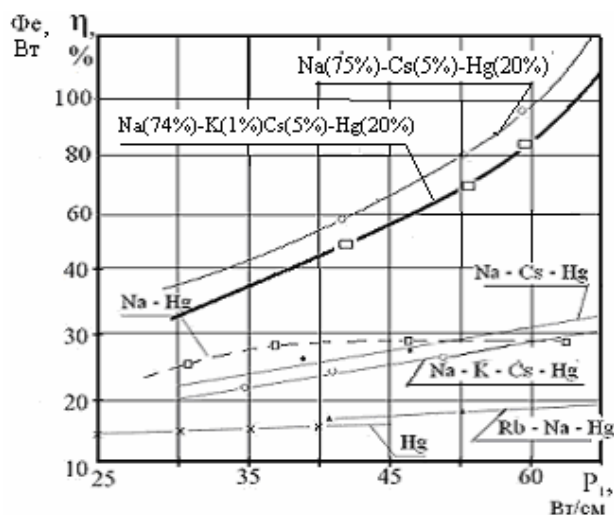


Рис. 4. Залежність енергетичного потоку випромінювання (Φ_e) з різними добавками (1 – Cs (5%), 2 – K (1%), Cs (5%)) та світлової ефективності (η) ламп із різним наповненням (\square – Na-Hg, \circ – Na-K-Cs-Hg, \bullet – Na-Cs-Hg, \times – Hg, \blacktriangle – Rb-Na-Hg) від питомої потужності ламп (P_l)

Вміст хлорофілу і каротиноїдів (мкг/г) у листках томатів сортів Де Барао і Гібрид Тарасенка, опромінених натрієвою лампою високого тиску потужністю 400 Вт, ртутною лампою високого тиску з люмінофорним покриттям на колбі потужністю 400 Вт, натрій-цезієвою лампою високого тиску потужністю 400 Вт

Тип лампи	Сорт томатів							
	Де Барао				Гібрид Тарасенка			
	ДНаТ 400	ДРЛФ 400	Na-Cs 400	Природ. осв.	ДНаТ 400	ДРЛФ 400	Na-Cs 400	Природ. осв.
День	22	22	22	22	22	22	22	22
Ca	740±34	681±34	1217±176	703±67	798±75	713±38	943±72	821±39
Cв	211±25	172±67	1213±258	250±84	299±53	227±77	341±58	240±46
Ca+Cв	951±27	853±65	2430±351	953±34	1097±258	940±26	1284±137	1061±37
Ск	447±56	261±32	273±75	291±26	323±84	262±55	1034±246	280±75
Ca/Cв	3,5±0,41	3,9±0,22	1±0,48	2,8±0,65	2,7±0,38	3,1±0,67	2,8±0,52	3,4±0,46

Результати досліджень свідчать, що енергетичний потік випромінювання Φ_e у лампах із добавкою Cs (5 ат.%) – вищий, ніж у лампах з добавки Cs (5 ат.%)–К (1 ат.%). Світлова ефективність (η) при збільшенні питомої потужності P_1 ламп зростає, причому для натрій-ртутних ламп при P_1 (25-60 Вт/см) η є вищою, ніж для ламп із добавками Cs, K, Rb, а при P_1 , більший 60÷65Вт/см, η вища для ламп із наповненням Na-Cs-Hg та Na-Cs-K-Hg і складає 29±2%. Отже для світлокультури рослин за $P_1 > 58 \div 60$ Вт/см ефективнішими є натрієві лампи високого тиску з додаванням цезію.

ККД фотосинтетично активної радіації ($\eta_{ФАР}$) розраховували як:

$$\eta_{ФАР} = \frac{F}{P}, \quad (1)$$

де F – потік випромінювання в області ФАР, P – потужність лампи.

Відповідно до (8), потік випромінювання дорівнює

$$F = \frac{\Phi_{л}(S_{\Delta\lambda 1} + S_{\Delta\lambda 2} + S_{\Delta\lambda 3})}{683(0,02S_{\Delta\lambda 1} + S_{\Delta\lambda 2} + 0,015S_{\Delta\lambda 3})}, \quad (2)$$

де $S_{\Delta\lambda i}$ – відносна енергія випромінювання в спектральному інтервалі $\Delta\lambda i, \%$: $\Delta\lambda_1 400-500$ нм, $\Delta\lambda_2 500-600$ нм, $\Delta\lambda_3 600-700$ нм, 683 – світлова ефективність випромінювання, лм/Вт,

Із рівнянь (1) і (2) випливає,

$$\eta_{ФАР} = \frac{\Phi}{P} \cdot \frac{1}{683(0,02S_{\Delta\lambda 1} + S_{\Delta\lambda 2} + 0,015S_{\Delta\lambda 3})}, \quad (3)$$

і враховуючи, що $S_{\Delta\lambda 1} + S_{\Delta\lambda 2} + S_{\Delta\lambda 3} = 1$, $\frac{\Phi_{л}}{P} = H$ – світлова віддача, остаточно

$$\eta_{ФАР} = \frac{H}{683(0,02S_{\Delta\lambda 1} + S_{\Delta\lambda 2} + 0,015S_{\Delta\lambda 3})}. \quad (4)$$

У табл. наведені дані про вміст хлорофілу і каротиноїдів (мкг/м сирової маси) у рослинах то-

мата сортів Де Барао і Гібрид Тарасенка, опромінених натрієвою лампою високого тиску потужністю 400 Вт, ртутною лампою високого тиску з люмінофорним покриттям на колбі потужністю 400 Вт, натрій-цезієвою лампою високого тиску потужністю 400 Вт.

Як видно з табл., у 22-денних рослин томатів сортів Де Барао і Гібрид Тарасенка сумарне співвідношення вмісту ($Ca+Cв$) хлорофілу $a(Ca)$ та хлорофілу $b(Cв)$ при опроміненні натрій-цезієвими лампами вище, ніж при ДНаТ 400, ДРЛФ 400 – на 1479, 1577 кг/м, і 187, 344 мкг/м, відповідно. Відношення вмісту хлорофілу a і b ($Ca/Cв$) при опроміненні натрій-цезієвими лампами, ДнаТ 400 і ДРЛФ 400 сортів Де Барао і Гібрид Тарасенка збільшувалися на 22-й день за рахунок зміни (зменшення) хлорофілу b , стосовно хлорофілу a . У 22-денних рослинах сорту Де Барао концентрація каротиноїдів ($Ск$) збільшувалася при опроміненні ДнаТ 400 на 156 мкг/г. У сорті Гібрид Тарасенка $Ск$ змінювалося при опроміненні натрій-цезієвими лампами на 754 мкг/г, ДнаТ400 – 53 мкг/г.

Висновки: 1. Для світлокультури рослин при питомих потужностях ламп $P_1 > 58 \div 60$ Вт/см більш ефективними є натрієві лампи високого тиску з додаванням цезію.

2. ККД фотосинтетично активної радіації для високоінтенсивних натрій-цезієвих ламп складає 29±2%, для стандартних НЛВТ цей показник становить 27±2%.

3. Вирощування рослин на перших етапах розвитку при опроміненні світлом із різним спектральним складом дало змогу встановити відмінності в реакціях рослин томатів сортів Де Барао і Гібрид Тарасенка на накопичення пігментів і їхнє співвідношення. Встановлено, що сумарний вміст хлорофілу і каротиноїдів у сортах томатів

Де Барао і Гібрид Тарасенка при опроміненні натрієвою лампою високого тиску з додаванням

цезію є вищим у 1,4÷2,5 рази, ніж при опроміненні ДРЛФ 400 і ДнаТ 400.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. *Айзенберг Ю.Б.* Справочная книга по светотехнике. – М.: Энергоатомиздат. – 1995. – 427 с.
2. *Ашурков С.Г., Коптелов И.В., Минаев И.Ф. и др.* О безртутных металлогалогенных лампах для растениеводства // Светотехника. – 1992. – №12. – С. 10.
3. *Вассерман А.Л., Квашин Г.Н., Малышев В.В.* Об оценке эффективности действия источников излучения на растения // Светотехника. – 1986. – №7. – С. 14-16.
4. *Велит И.А., Бондарь П.И., Сахно Т.В. и др.* Влияние спектрального состава света на содержание хлорофилла в листьях томата // Физиология и биохимия культурных растений. – 2004. – Т. 36. – №4. – С. 349-355.
5. *Велит И.А., Петренко Ю.П., Кожушко Г.М. та ін.* Експлуатаційні характеристики високоінтенсивних ламп з добавками цезію, калію, рубідію // Світлотехніка та енергетика. – 2005. – №4. – С. 13-17.
6. ГОСТ17616-82. Лампы разрядные. Методы измерения электрических и световых параметров.
7. *Дергачева М.Б., Хобдабергена Г.Р.* Термодинамические свойства жидких сплавов системы натрий-цезий-ртуть // Журн. физич. химии. – 1988. – Т. 62. – №3. – С. 594-599.
8. *Карначук Р.А., Гвоздева Е.С.* Влияние света на баланс фитогормонов и морфогенез в культуре ткани зародышей пшеницы // Физиология растений. – 1998. – Т.45. – №2. – С. 289-295.
9. *Лакин Г.Ф.* Биометрия. – М.: Высш. шк. – 1990. – 352 с.
10. *Лисовский Г.М., Прикупец Л.Б., Сарычев Г.С. и др.* Экспериментальная оценка эффективности источников света в светокультуре растений // Светотехника. – 1983. – №4. – С. 7-9.
11. *Литвинов В.С.* Об особенностях расчета и оптимизации параметров массовых источников света // Светотехника. – 1993. – №5-6. – С. 28-31.
12. *Лось Д.А., Захледер В., Куцова Е.С. и др.* Влияние спектрального состава света на репликацию хлоропластной ДНК и деление хлоропластных нуклеоидов зеленой водоросли DUNALIELLA SALINA // Физиология растений. – 1990. – Т.37. – №6. – С. 1045.
13. *Починок Х.Н.* Методы биохимического анализа растений. – К.: Наук. думка. – 1976. – 334 с.
14. *Прикупец Л.Б., Тихомиров А.А.* Оптимизация спектра излучения при выращивании овощей в условиях интенсивной светокультуры // Светотехника. – 1992. – №3. – С. 5-7.
15. *Рохлин Г.Н.* Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат. – 1991. – 720 с.
16. *Рохлин Г.Н., Кожушко Г.М.* Характеристики металлогалогенных ламп с различным наполнением // Светотехника. – 1982. – №11. – С. 1.
17. *Сарычев Г.С.* Облучательные светотехнические установки. – М.: Энергоатомиздат. – 1992. – 241 с.
18. *Сарычев Г.С.* Продуктивность ценозов огурцов и томатов в функции спектральных характеристик ОСУ // Светотехника. – 2001. – №2. – С. 27-30.
19. *Спринчану К., Бутенко Р.Г.* Влияние спектрального состава света на рост и развитие черенков полыни лимонной IN VITRO // Физиология растений. – 1991. – Т.38. – №3. – С. 765.
20. *Тихомиров А.А.* Спектры действия и спектральная эффективность фотосинтеза растений тестовом (кратковременным) и длительным воздействием света // Физиол. и биохим. культурн. раст. – 1994. – Т.26. – №4. – С. 352-359.
21. *Тооминг Х.Г., Гуляев Б.И.* Методика измерения фотосинтетически активной радиации. – М.: Наука. – 1967. – 144 с.
22. *G. Pichler, V. Zivcec, R. Beuc, et al.* UV, Visible and IR Spectrum of the Cs High Pressure Lamp // Physica Scripta. – 2003. – Vol. TXX. – P. 1-3.