

Дівеєв Б. М. Конденсована модель поперечних коливань багатосекційної штанги обприскувача // Вісник ДУ "Львівська політехніка". Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – 2001. – № 434. – С.19 – 23. 9. Гацук П.М., Вікович І.А., Дівеєв Б.М. Застосування дискретно-континуальних розрахункових схем для визначення вібронапружень в механічних конструкціях // Труды Одесского политехнического университета. – Одесса. 1999. – Вып. 2 (8), с. 34–40. 10. Тондл А. Динамика ротора турбогенераторов. – Л., 1971. 11. Диментберг Ф.М. Изгибные колебания вращающихся валов. 1959.

УДК 621.01:632.981.2  
Б.М. ДІВЕЄВ<sup>1</sup>, І.Р. ДОРОШ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів  
<sup>2</sup>Приватне підприємство "Дора", м.Львів

## ПРОБЛЕМИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ШТАНГ ШТАНГОВИХ ОБПРИСКУВАЧІВ

© Дівеєв Б.М., Дорош І.Р., 2006

*Проаналізовано методи оптимального проектування штангових обприскувачів і розвиток нових методів. Застосовуються числові методи, що ґрунтуються на блоково-варіаційних модальних і адаптивних схемах. Одержано оптимальні проекти для різних елементів: секції штанги з підвищеною міцністю, підвіски з підвищеними стабілізуючими і віброзахисними властивостями*

*The main task of this work is to analyze optimal design-system of the boom-sprayers and develop new methods. The calculation procedure of machine dynamics, resting on the synthesis of block-variation, modal and adaptive schemes, should be applied. The optimal designs for the various units will be obtained: the boom-sections with increased reserved strength, the suspension with increased stabilizing and vibroprotecting properties*

**Вступ.** Оптимальне проектування сільгоспагрегатів, зокрема штангових та вентиляторних обприскувачів, охоплює широке коло інженерних дисциплін – від технічних до екологічних. Наприклад, якщо для вертикальних коливань великогабаритних штанг питання вирішується за допомогою маятникової підвіски то для коливань штанги у горизонтальній площині повністю відсутні ідеї зменшення цих вібрацій. Оскільки при таких коливаннях нерівномірність обприскування може досягти 600 %, то перед країнами ЄС (парк таких машин у Європі становить 400000) постало питання розроблення нових обприскувачів з покращаними властивостями. У цій роботі на підставі раніше відомих та отриманих авторами математичних моделей динаміки та міцності складних конструкцій, аеро- та гідродинаміки розв’язується задача багатокритеріального раціонального проектування обприскувачів. Розглянуто питання міцності та матеріалоемності несучих конструкцій агрегатів (рами, великогабаритні штанги) у режимах динамічного навантаження, наведено оптимізовані структури цих елементів. Особливу увагу приділено динаміці робочих органів агрегатів: штанги на підвісці, поширення повітряного струменя від обприскувача у приповерхневому шарі атмосфери. Ці задачі тісно пов’язані з інженерною екологією довкілля. Досліджується вплив параметрів робочих органів агрегатів та їхнього загального компонування на рівномірність внесення біологічно активних препаратів у заданих межах землекористування.

**Особливості конструкцій обприскувачів.** Відомо багато видів конструкцій обприскувачів. Основний принцип їхньої будови незмінний: подовгаста несуча конструкція – рама, приєднаний до

неї бак з насосом, для вентиляторного обприскувача – вентиляторний вузол, для штангових – рамка та приєднана до неї через підвіску штанга.

Можливі різні схеми класифікації штангових обприскувачів. Основна – за функціональним параметром: шириною захоплення. Якщо на підприємствах СНД нині випускають штанги завширшки захоплення до 24 м, то у світовій практиці відомі штанги завдовжки до 36м. Матеріал також може бути різним. Переважно це сталь, причому на наших підприємствах доволі низькоякісна.

Стержні, з яких зварюють секції рами, – це труби прямокутного або круглого перерізу. У плоскій фермі штанги для надання їй достатньої жорсткості в горизонтальній площині конструктори розміщують труби ширшим перерізом ортогонально до площини ферми.

**Стан задачі оптимального проектування штангових обприскувачів.** Для визначення напружено-деформованого стану елементів конструкцій агрегатів використовують комплекси програм машинобудівного проектування, пакети програм розрахунку (ППР): ProEngineer, ADAMS, CATIA, NASTRAN, ANSYS, COSMOS, Mechanical Desktop та ін.. Ці пакети доволі потужні, але мають певні недоліки: а) надто дорогі для порівняно малопотужних підприємств сільськогосподарського машинобудування; б) потребують адаптації до наших технічних стандартів та перекладу; в) освоєння їх доволі важке і потребує спеціального навчання персоналу; г) основні вузли машин (елементи сухого тертя, нелінійні демпфери тощо) недоступні для розрахунку за допомогою цих пакетів або потребують значних зусиль. Можна використовувати також пакети APM WinMashin або ANALIS. Останні менш потужні, проте значно дешевші та застосовуються з урахуванням їхніх недоліків: для APM – дуже довгий час розрахунку, неможливість керувати процесом розрахунку, змінювати густину сітки скінченних елементів, неадекватність визначення напружень у кутових точках перерізів стержнів, завищення цих значень порівняно з інженерними формулами у декілька разів при крученні, відсутність зведених таблиць параметрів конструкції та результатів у простій формі; для ANALIS — можливість виконувати лише статичні розрахунки.

Окремою, найважливішою і найважчою, є задача оптимального проектування конструкцій. Практично вона розв'язується методом декомпозиції конструкції і зменшення кількості змінних параметрів та спрямованого пошуку в редукованій множині параметрів. На жаль, основні вищенаведені програмні засоби не надають можливості параметричної оптимізації. Не враховують вони і ресурсні запаси міцності вузлів машин. Однак вартість таких комплексів на порядок вища, при їх освоєнні виникають труднощі, вони не адаптовані до специфіки сільгоспмашин. Тому потрібно застосувати значно дешевші та ефективніші методи оптимального проектування, зокрема за міцністю. Доцільно зазначити, що сьогодні критерії оптимального проектування штангових обприскувачів, як можна бачити з [1-7], чітко не визначені. Відома ситуація з автомобільними підвісками (де також нема чітко визначених критеріїв оптимальності) загострюється у такому разі великими габаритами штанги, яку треба віброізолювати, складними рельєфами поля та потребою враховувати технологічні чинники – рівномірність обприскування.

**Математичне моделювання динаміки конструкцій обприскувачів.** Для моделювання технологічних процесів, що відбуваються за допомогою транспортних засобів, зокрема за допомогою колісних машин, розроблено ряд РС [8-9]. Частий недолік традиційних моделей – недостатнє вивчення взаємозв'язку між транспортними і технологічними процесами. Найпоширеніші незв'язані дискретні моделі. Хоча вони й дають змогу доволі точно визначити вплив динаміки руху на технологічний процес, проте зворотний вплив, який в окремих випадках доволі значний, вповні дослідити неможливо. У роботі розглянуто клас дискретно-континуальних моделей [10-17], які дають змогу гнучкіше моделювати ці процеси.

Відомо, що для визначення ресурсу конструкції при віброударному навантаженні потрібно розв'язати такі задачі:

1. Визначити зовнішні сили тобто зусилля, що діють на колеса, підвіску, раму агрегату при пересуванні його по пересіченій місцевості. Ця задача розв'язується двома способами:

- а) використання віброграм натурних випробувань агрегатів у польових умовах;
- б) використання даних літературних джерел про параметри рельєфу та його вплив на динаміку агрегату.

2. Визначити внутрішні сили.

Ця задача розв'язується за методиками розрахунку динаміки складних конструкцій на підставі дискретно-континуальних моделей, розрахункових схем (РС) [10-15].

3. Визначити напруження.

Ця задача після перших двох етапів може бути розв'язана точніше будь-яким із вищенаведених ППР. Достатні для проектування інтегральні оцінки напруженого стану, можна отримати на основі РС [10-15], а уточнення напружень у місцях концентрацій, у з'єднаннях – на основі адаптивних РС [15-16], або, не виключено, одним з стандартних пакетів МСК (наприклад, ANSYS чи APM WinMachin)

Розглянемо послідовно ці задачі.

Дискретно-континуальне моделювання широко застосовують в розрахунку динаміки колісних екіпажів та колісних поїздів. Це насамперед пов'язано з необхідністю визначення напружень у такого роду конструкціях при динамічних навантаженнях. Дискретні РС дають змогу визначити амплітудно-частотні характеристики (АЧХ). Часто вони переобтяжені деталями. Додатковий дискретний елемент навіть малої маси значно змінює АЧХ в області його власного резонансу, хоча наявність такого елемента може вносити незначні зміни як в технологічний процес, так і в реальний напружено-деформований стан конструкції. Дискретно-континуальні моделі дають змогу, при значно меншій кількості параметрів описати технологічний процес і динаміку екіпажу. Розглянемо два прості приклади, що ілюструють перевагу конденсованих дискретно-континуальних схем для розрахунку. По-перше, розглянемо маятникову (найпоширенішу) підвіску обприскувача. Розглянемо подвійну трапецієподібну підвіску (ОПШ-2000, Berthoud).

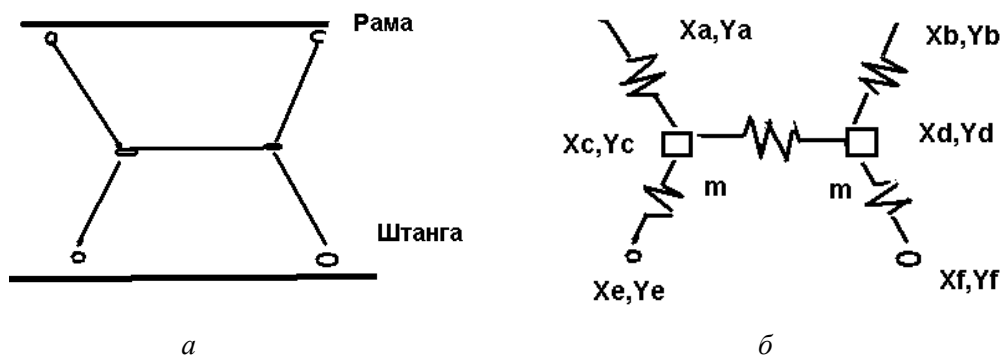


Рис. 1. Маятникова підвіска: подвійна (а), розрахункова схема (б)

Відомо, що для виведення рівнянь рівноваги можна застосовувати метод сил або варіаційні методи. Проте навіть при застосуванні компактніших варіаційних методів, наприклад, методу Лагранжа другого роду, не уникнути складних алгебраїчних перетворень. Розглянемо тепер просту дискретно-континуальну схему підвіски: невагомі пружні стержні та дві маси  $m$ , зосереджені в проміжних вузлах. Тепер ми отримуємо таку систему рівнянь для тих додаткових мас

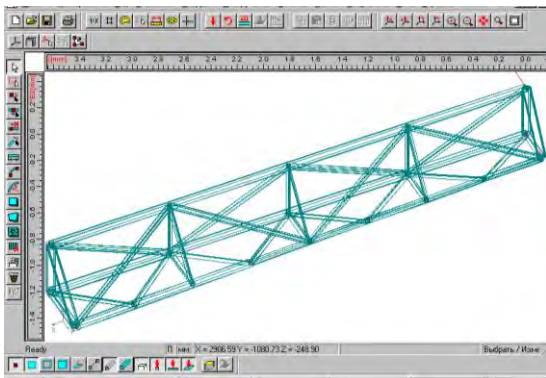
$$\begin{aligned} m \frac{d^2 x_c}{dt^2} &= F_{CE}^x + F_{CA}^x + F_{CD}^x, & m \frac{d^2 y_c}{dt^2} &= F_{CE}^y + F_{CA}^y + F_{CD}^y \\ m \frac{d^2 x_d}{dt^2} &= F_{DE}^x + F_{DA}^x + F_{DC}^x, & m \frac{d^2 y_d}{dt^2} &= F_{DE}^y + F_{DA}^y + F_{DC}^y \end{aligned} \quad (1)$$

Сили  $F$  визначаються як проекції сил, спричинених розтягом пружних ланок на осі  $x, y$ .

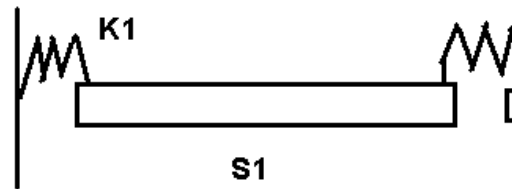
$$F_{CE}^x = F_{CE}^x(x_C, y_C, x_E, y_E), \dots, F_{DC}^y = F_{DC}^y(x_C, y_C, x_D, y_D)$$

Отже, тепер для розрахунку нам достатньо використати значення цих зусиль для розрахунку рівнянь пружної рівноваги штанги і, можливо, рами агрегату та одержати замкнуту розрахункову схему. Іноді, наприклад для розрахунку кутових коливань штанги у її площині значення  $x_A, y_A, x_B, y_B$  можна вважати відомими із заданого рельєфу поля та кінематики системи кріплення штанги. Відзначимо, що ця РС може застосовуватися до підвіски з нерівними по довжині ланками та до підвіски з коректорами.

Тепер розглянемо другий спосіб застосування цього методу. Розглянемо багатосекційну штангу як набір пружних стержнів, з'єднаних пружно-дисипативними елементами. Для кожної з секцій розглянемо стержень з такими самими жорсткістними характеристиками (рис. 2, б).



а



б

Рис. 2. Типова секція: великогабаритної штанги (а); стержневий аналог секції (б)

Тут можливий різний вибір аналогу – стержня. Це може бути стержень Ейлера [10] або адекватніша для динамічних розрахунків балка Тимошенка [15]. Оскільки робочий діапазон частот коливань обприскувачів низький, то при врахуванні динаміки секцій, що потрібно для розрахунку напружень, можна обмежитися лише однією, двома першими формами коливань.

У [13] наведено рівняння динамічної рівноваги системи рама–бак з рідиною–штанга. Вони отримані з балансу моментів, викликаних інерційними та пружними силами, кутовими коливаннями щодо поздовжньої осі обприскувача, штанги та рідини в баці. Методика визначення коефіцієнтів рівнянь ґрунтується на вивченні першої форми коливань пружних рам навісного обладнання, рідини в баці та нелінійно-пружних і дисипативних характеристик з'єднань.

Для дослідження і моделювання конструкцій секцій штанги використовувалися такі пакети програм: пакет машинобудівних розрахунків APM WinMashin, зокрема його модулі: WinFrame3, WinStructure3d, WinFem; демоверсія пакета ANALYS статичного розрахунку ферм; комплекс програм ЕКІР для аналізу динаміки колісних екіпажів; комплекс програм JOINT для уточненого розрахунку напруженого стану у з'єднаннях стрижневих елементів; комплекс програм FERMAC для розрахунку та оптимізації плоских фермових елементів на базі теорії балки Тимошенка при усталеному гармонійному збуренні. Для оптимізації використовувалися методи нелінійного програмування, зокрема метод Нелдера-Міда у програмі FERMAC та алгоритм генетичної оптимізації [17].

Визначалися динамічні зусилля на рамі. Отримано адаптивні ієрархічні схеми дають змогу не лише аналізувати динамічну поведінку вузлів агрегату (частотні характеристики, вібропереміщення, вібропришвидження), але й досліджувати поля вібронапружень, зокрема в рамі. Якісний аналіз дав змогу виконати декомпозицію загальної задачі на декілька простіших: коливання системи трактор–причеп, системи причеп–рама, рама–підвіска–штанга, рама–бак. Було розроблено комплекс програм розрахунку та оптимізації фермової рами загалом та окремих секцій АГРЕГАТ.

Конструкція секцій рами може бути полегшена використанням профілів меншого перерізу для основи рами та реконструкції її бокових секцій. Розрахунки показали доцільність застосування в нижньому поясі ферм основи відкритих профілів. Для конструкції штанги було розроблено також низку конденсованих РС [10] для вивчення динамічної поведінки та розроблені відповідні програмні засоби (STANG).

**Критерії оптимальності нісівних конструкцій обприскувачів.** Розроблені малопараметричні моделі динаміки штанги дали змогу розглянути параметричну оптимізацію. Сформулюємо для штангового елемента критерії досконалості.

*Критерій  $J_1$ .*

Це критерій тривалої міцності конструкції. Звичайно питання тривалої міцності складних конструкцій при складних навантаженнях в агресивному середовищі – це надзвичайно складне питання. Відзначимо лише головні сформовані наукові напрямки, що пов'язані з цією проблематикою: теорія надійності складних систем, утомна міцність матеріалів при складних фізико-хімічних впливах, теорія живучості конструкцій з пошкодженнями.

Нами розглядається спрощений класичний підхід щодо максимальних амплітуд напружень:

$$J_1 = \max \Phi(\sigma). \quad (2)$$

Звичайно, треба врахувати, що в конструкції штанги можна застосувати різні матеріали, кожен з яких, якщо навіть не кожен вид навантаження якого по-різному небезпечний. Можна було б ввести декілька критеріїв для кожного матеріалу замість (1) або сконструювати якийсь інтегральний критерій, наприклад, типу

$$J'_1 = \sum_i \frac{\max \sigma_i}{[\sigma_i]} \quad (3)$$

по всіх елементах із різними допустимими напруженнями  $[\sigma]$ .

*Критерій  $J_2$ .*

Введемо деякий узагальнений критерій

$$J_2 = \Gamma(C_i, T), \quad (4)$$

де  $C_i$  – це вартість об'єму певного гатунку матеріалу, що конструктор збирається використати,  $T$  – технологічна вартість виготовлення.

*Критерій  $J_3$ .*

Це критерій якості функціонування, що передбачає оцінку якості обприскування (рівномірність), так і вартості обслуговування агрегату (паливе, мастила, технічне обслуговування).

На рис. 2, а наведено оптимізовану секцію великогабаритної штанги. На рис. 3 наведено оптимізовану пружно-маятникову підвіску

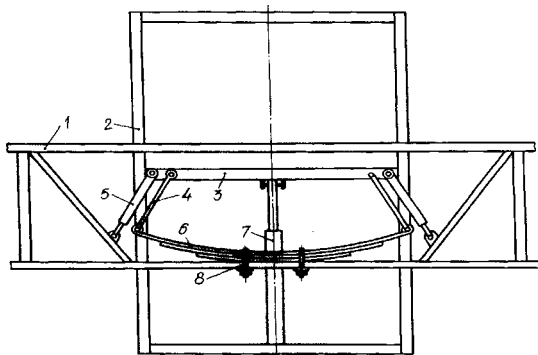


Рис. 3. Пружно-маятникова підвіска штанги

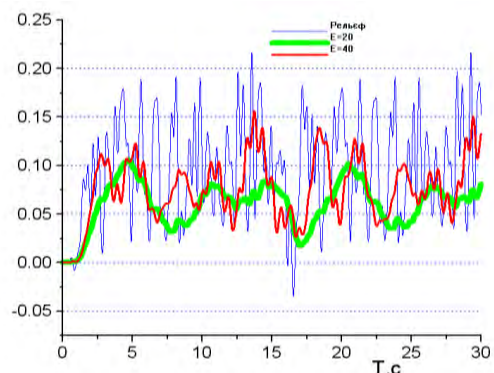


Рис. 4. Віброграма кутових коливань для штанги на маятниково-пружній підвісці

**Розрахунок та оптимізація функціональних властивостей обприскувачів.** Найважливішою функціональною властивістю обприскувачів є швидке та рівномірне розприскування препаратів на найбільшу площу без винесення цих препаратів за межі оброблюваної ділянки. Особливо важливу роль відіграють параметри таких функціональних вузлів, як штанга з підвіскою. Особливого вивчення потребує динаміка поширення повітряної суміші безпосередньо біля обприскувача та у приповерхневому шарі атмосфери. Якщо для вивчення динаміки штангового елемента у вертикальній та горизонтальній площині достатньо [10-15], то для вивчення динаміки поширення струменя по поверхні поля та в кроні рослин було розроблено відповідні математичні моделі.

Розглянемо спочатку штангові обприскувачі. У них рівномірність обприскування тісно корелюється з коливаннями штанги щодо поверхні ґрунту. За рахунок оптимізації підвіски вдалося досягти значного зменшення цих коливань, що, своєю чергою, дало змогу вирішити питання про збільшення ресурсу штанги, адже зменшується ймовірність зачіпання штанги за ґрунт та виникнення значних ударних напружень. На рис. 4 наведено віброграми кутових переміщень у вертикальній площині у штангах з підвіскою типу рис.3. з різною жорсткістю ресори.

Значний вплив на рівномірність обприскування мають горизонтальні коливання штанги. Експериментальні польові дослідження демонструють відхилення від рівномірності обприскування на 600 %. Для моделювання факела розпилювача були використані лабораторні експериментальні дані [4,7]. Для моделювання динаміки штанги в горизонтальній площині використовувалися конденсовані дискретно-континуальні РС [10]. На рис. 5 наведено два випадкові збурення зі спектральними характеристиками, що відповідають польовим умовам (швидкість обприскувача – 1м/с, довжина штанги – 18м). На рис. 6 – відповідні їм густини обприскування у процентному відношенні по лінії крайньої точки штанги.

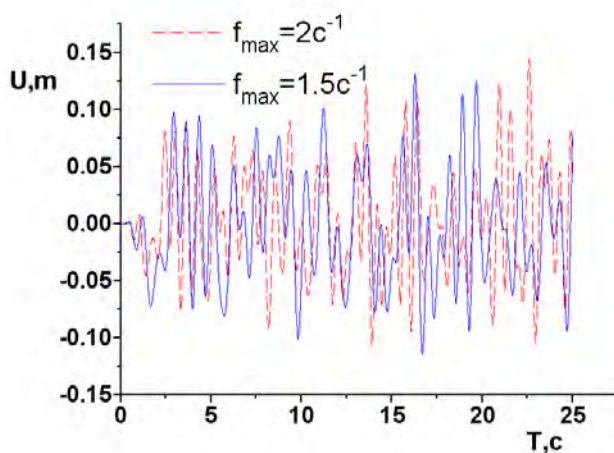


Рис. 5. Кутові кінематичні збурення штанги у горизонтальній площині

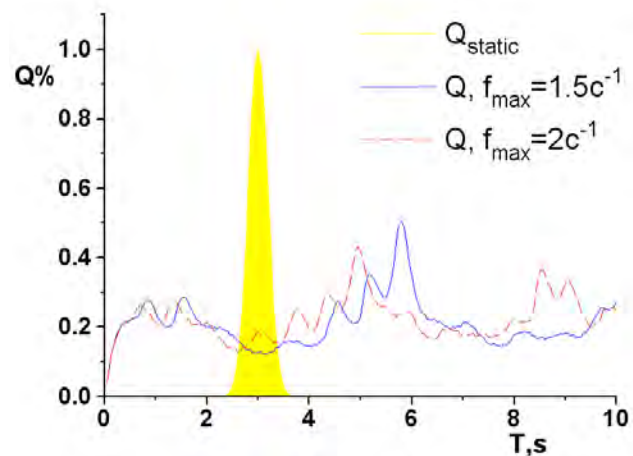


Рис. 6. Густини обприскування (у % від рівномірного)

Зазначимо, що для зменшення коливань штанги в горизонтальній площині може бути застосована комбінована схема із застосуванням динамічних гасників коливань.

**Висновки.** Для вирішення інженерної задачі оптимального проектування обприскувачів як, зрештою, для будь-якої сільськогосподарської техніки не існує стандартних програмних засобів. Універсальні, переважно імпорتنі програми мало пристосовані до специфіки проектування цих конструкцій та описання умов експлуатації машин, не враховуючи їх вартість, важкість освоєння. Проте, на даний час розроблено низку ефективних алгоритмів та програмних засобів моделювання динамічних процесів, що визначають ресурсні та функціональні властивості таких машин. За допомогою таких програм, як AGREGAT, STANGA, WENT можна успішно аналізувати міцність і

функціональність обприскувачів. Малопараметричні математичні моделі дозволяють інженеру в інтерактивному режимі оптимізувати ці конструкції ще на стадії проектування, а не після виготовлення, що потребує більше затрат.

1. De Jong, A., Van de Zande, J.-C., Stallinga, H., 2000. *The effects of vertical and horizontal boom movements on the uniformity of spray distribution. Agricultural Engineering Conference, Paper no. 00-PM-015.* 2. Enf. alt, P., Enggvist, A., Alness, K., 1997. *Assessment of the dynamic spray distribution on a .at surface using image analysis. Aspects Appl. Biol. 48, 17 –25.* 3. Herbst, A., Wolf, P., 2000. *Spray deposit distribution from agricultural boom sprayers in dynamic conditions. Proceedings of the 25th International Conference on Noise and Vibration Engineering, Belgium, pp.1599 –1605.* 4. Ooms, D., Lebeau, F. Ruter, R. Destain, M.F., 2002. *Measurements of the horizontal sprayer boom movements by sensor data fusion. Comput. Electron. Agric. 33, 139 –162.* 5. Sinfort, C., Miralles, A., Sevilla, F., Maniere M., 1994. *Study and development of a test method for spray boom suspensions. J. Agric. Eng. Res. 59, 245 –252.* 6. Sinfort, C., Lardoux, Y., Miralles, A., Enf. alt, P., Alness, K., Andersson, S., 1997. *Comparison between measurements and predictions of spray pattern from a moving boom sprayer. Aspects Appl. Biol. 48.* 7. Smith, D.B., 1992. *Uniformity and recovery of broadcast sprays using fan nozzles. Trans. ASAE 35 (1).* 8. Динамика системы дорога-шина-автомобиль-водитель. Под ред. А.А. Хачатурова. – М., “Машиностроение”, 1976, 530 с. 9. Пархиловский И.Г. Автомобильные листовые рессоры: Теория, расчет и испытания. 2-е изд. М.: Машиностроение 1978, 227с. 10. Вікович І.А., Дівеєв Б.М. Конденсована модель поперечних коливань багатосекційної штанги обприскувача // Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – 2001. – № 434. – С. 19 – 24. 11. Гащук П., Вікович І., Дівеєв Б. Застосування дискретно-континуальних дискретних схем для визначення вібронпружень в механічних конструкціях. Тр. Одес. политехн. ун-та. – 1999. – Вып.2 (8). – С. 34 – 41. 12. Гащук П., Вікович І., Дівеєв Б. Коливання екіпажу з врахуванням згину рами транспортного засобу. // Зб. наук. праць “Проектування, виробництво та експлуатація автомобільних засобів і поїздів”. – Львів, 2000. – С. 34 – 47. 13. Hashchuk P., Diveiee B., Vajda I., and Vikovych I. *Condensed numerical model for study of vibration of agricultural vehikel with elongated elements. Vibration in physical systems. XX Jubilee Symp. (Poznan – Blazejewko May 21-25) – Poznan, 2002. – P. 162 – 163.* 14. Дівеєв Б., Миронюк О., Шевчук Р. Дискретно-континуальна модель для розрахунку динамічних характеристик струшувача плодів. // Машинознавство. – 1998. – № 8. – С. 15 – 19. 15. Дівеєв Б. Алгоритми розрахунку вібронпружених конструкцій у САПР та діагностичних системах на мікрокомп'ютерах. // Матеріали IV і V Міжнар. наук.-практ. Конф. „УКРСОФТ”. – Львів, 1995. – С. 191 – 194. 16. Дівеєв Б. М., Лампіка Р. В., Николишин М. М. Розрахунок напруженого стану з'єднань тонкостінних елементів, спряжених еластичним проширком. // Математичні методи та фіз.-мех. поля. – 2000. – 43, № 4.– С. 135 – 139. 17. Goldberg, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning.* – Addison-Wesley, 1989. 18. Дівеєв Б. Керування вібраційними процесами динамічними гасниками коливань в сільгоспагрегатах з обертовими елементами. Доповідь на цій конференції // Зб. наук. праць “Проектування, виробництво та експлуатація автомобільних засобів і поїздів”. – Львів, 2000.