Дмитрів В.Т.,
Банга В.І.,
Львівський національний аграрний університет,
м. Львів, Україна,
E-mail: vasylbanha@gmail.com

ВИМІРЮВАЧ МАСОВОГО ПОТОКУ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ

УДК 681.5.08:62

Обґрунтовано конструкцію і методику вимірювання потоку дисперсних матеріалів в динамічному режимі, основними перевагами якої в порівнянні з існуючими є синхронна з роботою дозуючих пристроїв, обробка результатів досліджень і відображення на моніторі комп'ютера або створення твердих копій реалізацій випадкового процесу. Завдяки високій швидкодії застосовуваного аналогово-цифрового перетворювача у випадку необхідності можна забезпечити дискретизацію неперервного випадкового процесу дозування, що дозволяє одержати до 100 значень і більше за секунду і, як наслідок, високу інформативність досліджень.

За результатами математичного моделювання, проведено дослідження залежності довжини компенсатора динамічних зусиль, довжини вимірювальної площини, зміни кута повороту та нахилу вимірювальної площини.

Ключові слова: *вимірювач, маса потоку, тензодатчик, тензовимірювальна площина, калібрування, дисперсний матеріал, кінетична енергія, компенсатор динамічних зусиль, момент інерції, швидкість потоку.*

Постановка проблеми. Дослідження дисперсних матеріалів без використання сучасних комп'ютеризованих систем вимірювання і обліку потоків мас в динамічному режимі неможливо забезпечити відповідну точність і швидкодію знімання інформації. Тому розроблення і дослідження вимірювача маси потоку дисперсних матеріалів є актуальною.

Реалізація вимірювача маси потоку дисперсних матеріалів на сучасній елементній базі забезпечить точність вимірювання з низькою постійною часу процесу вимірювання. Для реалізації вимірювача необхідно дослідити залежність зміни вихідного параметру від силових характеристик, що діють на вимірювальний елемент і обґрунтувати конструкційні параметри системи. Процес дозування дисперсних матеріалів, як кормороздавач суміші, досліджували для обґрунтування конструкційно-кінематичних параметрів робочого органу [1, 2]. Однак динамічних характеристик потоку матеріалу не проводили, а інтегрували дані маси потоку суміші і визначали середню похибку відхилення від заданої норми.

Дослідження нерівномірності дозування дисперсних матеріалів дозаторами безперервної дії вимагає наявності вимірювального обладнання, яке б враховувало масовий потік суміші, що носить випадковий характер і залежить від характеристики матеріалу. На процес вимірювання маси дисперсного компоненту в процесі його потоку впливають фізико-механічні характеристики, модуль часток, їх маса, густина і вологість, швидкість руху частинок та коефіцієнт тертя.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для вимірювання маси потоку сипких кормів існує ряд методів: ваговий із використанням ковшових та стрічкових автоматичних ваг; силовий, тахометричний, флуктуаційний, іонізаційний, кореляційний, оптичний, точковий. Кожен із методів має свої переваги та недоліки і може використовуватися в окремих випадках та при відповідних умовах, крім того, не завжди забезпечується оптимально допустима точність вимірювання. Найбільш оптимальним є ваговий метод, де точність вимірювання досягає 1,5 – 2,0 % [3-5]. Тому за основу прийнято даний метод і запропоновано динамічно-ваговий спосіб вимірювання маси потоку дисперсних кормів.

Мета роботи. Розроблення вимірювача маси потоку дисперсних матеріалів як вимірювального обладнання для зняття динамічних характеристик дозування дозуючими робочими органами.

Конструкція вимірювача потоку дисперсних матеріалів. Для дослідження нерівномірності видачі індивідуальним дозатором використовували вимірювач маси потоку дисперсних матеріалів, калібрувальна схема якого наведена на рис.1, а загальний вигляд на рис. 2. [8].

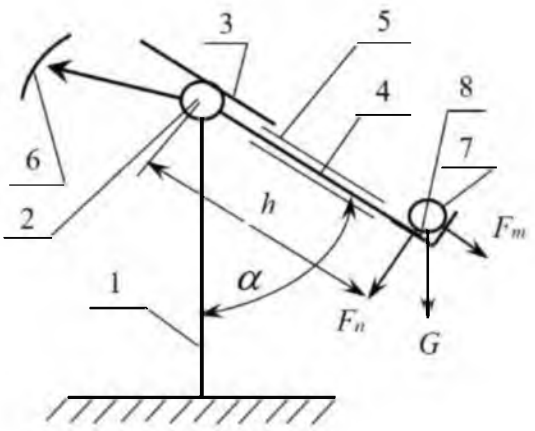

Рис. 1 – Калібрувальна схема вимірювача маси потоку дисперсних матеріалів:
1 – опора; 2 – поздовжня балка; 3 – компенсатор динамічних зусиль; 4 – тензовимірювальна площина; 5 – тензодатчик; 6 – механізм зміни кута нахилу тензовимірювальної площини; 7 – гирі; 8 – фіксована пластина для гир

Дослідження проводили таким чином. Потік сипкого корму подавався на площинний компенсатор динамічних зусиль 3 де поглиналась кінетична енергія частинок сипкого корму. З площинного компенсатора 3, корм під дією сили тяжіння зсувався по тензовимірювальній площині 4. При проходженні частинок корму через тензовимірювальну площину 4 під дією сили тяжіння площина прогиналася. Прогин фіксувався тензодатчиками 5, рівномірний зсув частинок корму по тензовимірювальній площині 4 залежно від фізико-механічних характеристик і корму забезпечувався зміною кута нахилу α вимірювальної площини 4 та компенсатора динамічних зусиль 3. Сигнал, який надходив від вимірювальної площини 4, як це показано на рис. 1, підсилювався тензопідсилювачем. Результуючі сигнали сприймав блок аналогово-цифрового перетворення L–154, який встановлений в комп'ютер Запис реалізації випадкового процесу нерівномірності видачі відображався на моніторі комп'ютера. Інформація в цифровому вигляді записувалася у файл досліджень, а за необхідності виводилася на принтер. Блок-схема для дослідження нерівномірності дозування робочих органів дозатора вимірювачем маси потоку дисперсних матеріалів наведена на рис. 3.

Рис. 2 – Загальний вигляд вимірювача маси потоку дисперсних матеріалів

Основними перевагами запропонованої методики порівняно з існуючими є синхронна з роботою індивідуального дозатора обробка результатів досліджень і відображення на моніторі комп'ютера або створення твердих копій реалізацій випадкового процесу. Завдяки високій швидкодії застосовуваного аналогово-цифрового перетворювача у випадку необхідності можна забезпечити дискретизацію неперервного випадкового процесу дозування дозатором, що дозволяє одержати до 100 значень і більше за секунду і, як наслідок, високу інформативність досліджень.

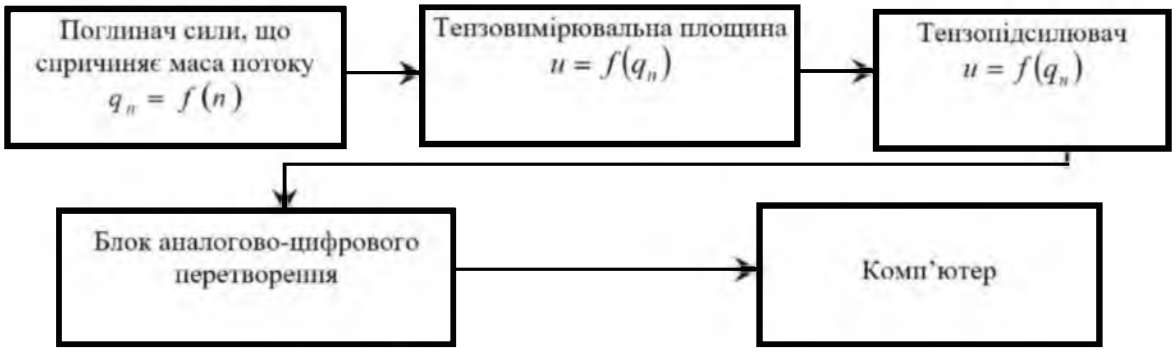

Рис. 3 – Блок-схема для дослідження нерівномірності дозування робочих органів дозатора вимірювачем маси потоку дисперсних матеріалів

Розроблення аналітичної моделі вимірювача. Розглянемо функціонування системи вимірювання маси. Для вимірювання безпосередньо маси потоку корму необхідно усунути вплив кінетичної енергії на частинку, яка накопичується в процесі її падіння від дозувального робочого органу до вимірювальної площини. Для цього нами використаний у пристрої компенсатор динамічних зусиль 3 (рис. 1). Розглянемо дію сил на елементарну частинку комбікорму при її рухові на компенсаторі динамічних зусиль (рис.4).

Виключення кінетичної енергії, яка діє на елементарну частинку комбікорму, відбудеться за умови, що швидкість $v_2 = 0$. Швидкість, якої набуде частинка у момент дотикання до компенсатора динамічних зусиль, становитиме:

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_в}, \qquad (1)$$

де v_1 – швидкість елементарної частинки комбікорму, м/с; $h_в$ – висота від кінця дозувального робочого органу до компенсатора динамічних зусиль, м.

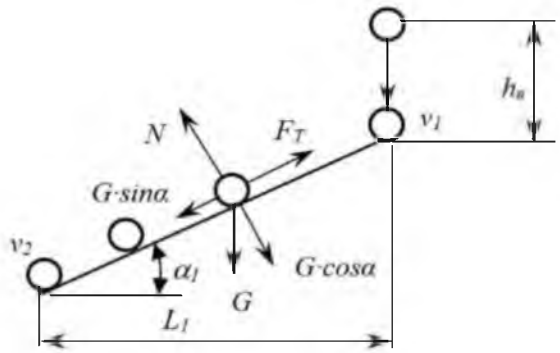

Рис. 4 – Схема дії сил на елементарну частинку комбікорму при її рухові на компенсаторі динамічних зусиль: G – сила маси, Н; N – сила нормальної реакції, Н; F_T – сила тертя, Н

На елементарну частинку комбікорму, яка знаходиться на компенсаторі динамічних зусиль, діють наступні сили: сила маси частинки, яка розраховується за формулою $G = m \cdot g$; сила нормальної реакції $N = G \cdot \cos\alpha_1$; сила тертя частинки об компен-

сатор $F_T = G \cdot \cos\alpha_1 \cdot f$, де m – маса елементарної частинки корму; g – прискорення вільного падіння, м/с^2; f – коефіцієнт тертя комбікорму об компенсатор динамічних зусиль.

Запишемо рівняння зміни кінетичної енергії елементарної частинки за аналогією [6] як:

$$\frac{m \cdot v_1^2}{2} - \frac{m \cdot v_2^2}{2} = -L_к \cdot G \cdot \sin\alpha_1 + L_к \cdot F_T, \quad (2)$$

де $L_к$ – довжина компенсатора динамічних зусиль, м.

Враховуючи, що $m = G/g$; $v_2 = 0$ і підставивши вираз для сили F_T, одержимо:

$$\frac{G \cdot v_1^2}{2 \cdot g} = L_к \cdot G \cdot (f \cdot \cos\alpha_1 - \sin\alpha_1). \quad (3)$$

З рівняння (3) визначимо значення довжини компенсатора $L_к$ динамічних зусиль за формулою

$$L_к = \frac{v_1^2}{2 \cdot g \cdot (f \cdot \cos\alpha_1 - \sin\alpha_1)}$$

або з врахуванням виразу (1) одержимо:

$$L_к = \frac{h}{f \cdot \cos\alpha_1 - \sin\alpha_1}. \quad (4)$$

Довжина компенсатора динамічних зусиль $L_к$ забезпечить виключення впливу кінетичної енергії на процес вимірювання потоку маси.

Вимірювання потоку маси буде здійснюватись вимірювальною площиною 4 (див. рис. 1). Важливо забезпечити проходження потоку протягом заданого часу, що дозволить одержати максимальну інформативність про масу потоку сипкого комбікорму. Тривалість проходження сипкого корму по вимірювальній площині повинна узгоджуватись із часом вимірювання продуктивності дозатора при дослідженні. Приймаємо час вимірювання t = 1с, тому продуктивність дозатора при дослідженнях має розмірність кг/с. Розглянемо дію сил на елементарну частинку комбікорму при проходженні її по вимірювальній площині (рис. 5).

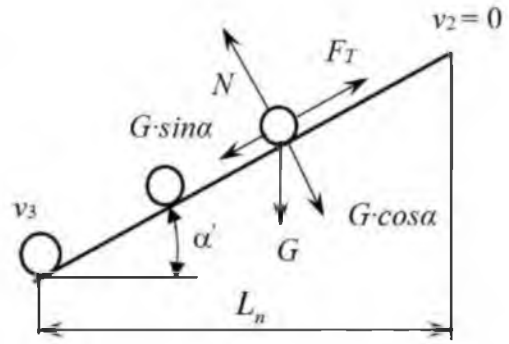

Рис. 5 – Схема дії сил на елементарну частинку сипкого матеріалу при русі її по вимірювальній площині

Дана задача є класичною при русі частинки по похилій площині [6].

Запишемо рівняння руху частинки по похилій поверхні:

$$m \cdot \ddot{x} = m \cdot g \cdot \sin\alpha' - f \cdot \cos\alpha',$$

або

$$\ddot{x} = m \cdot g \cdot \sin\alpha' - f \cdot \cos\alpha'. \quad (5)$$

Інтегруючи (5), одержимо рівняння швидкості руху елементарної частинки комбікорму по вимірювальній площині:

$$\frac{dx}{dt} = g \cdot (\sin \alpha' - f \cdot \cos \alpha') \cdot t, \tag{6}$$

де t – час руху елементарної частинки комбікорму по вимірювальній площині, с.

Повторно інтегруючи, знаходимо шлях, який пройде частинка комбікорму за формулою

$$x = g \cdot (\sin \alpha' - f \cdot \cos \alpha') \cdot \frac{t^2}{2}. \tag{7}$$

Прийнявши, що $x = L_n$, де L_n – довжина вимірювальної площини, м і $t = 1$ с, одержимо:

$$L_n = \frac{g \cdot (\sin \alpha' - f \cdot \cos \alpha')}{2}. \tag{8}$$

Для визначення оптимальної довжини вимірювальної площини L_n при походженні сипучого корму, уточнюємо кут її згину.

Розглянемо вимірювальну площину як балку із защемленим кінцем, на яку діє розподілене навантаження інтенсивністю q_n, що відповідає секундній продуктивності дозатора (рис. 6).

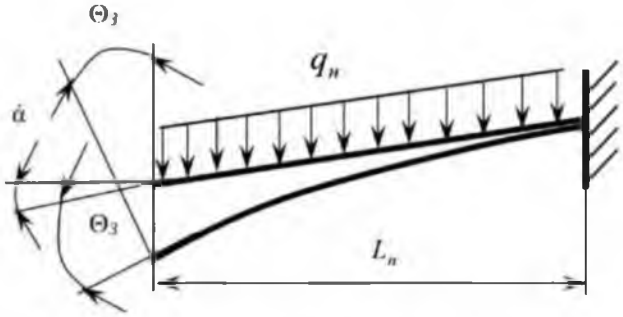

Рис. 6 – Схема згину вимірювальної площини під дією розподіленого навантаження інтенсивністю q_n: α – кут нахилу вимірювальної площини до горизонталі, град.; Θ - кут повороту вимірювальної площини від дії навантаження, град.

Згідно з універсальним рівнянням прогинів [7] для нашого варіанта одержимо наступне:

$$E \cdot I \cdot y(x) = \frac{1}{2} \cdot \frac{q_n \cdot L_n^2}{2} \cdot x^2 - \frac{q_n \cdot L_n}{6} \cdot x^3 + \frac{q_n}{24} \cdot x^4, \tag{9}$$

Диференціюючи рівняння прогинів (9), одержимо рівняння кутів повороту поперечних перерізів вимірювальної площини:

$$E \cdot I \cdot y'(x) = \frac{q_n \cdot L_n^2}{2} \cdot x - \frac{q_n \cdot L_n}{2} \cdot x^2 + \frac{q_n}{6} \cdot x^3. \tag{10}$$

Прийнявши $x = L_n$ та підставивши у рівняння (9) і (10), одержимо наступні вирази для визначення прогину на кінці вимірювальної площини і кута її повороту:

$$y_{зг} = \frac{q_n \cdot L_n^4}{8 \cdot E \cdot I}; \ \Theta_з = \frac{q_n \cdot L_n^3}{6 \cdot E \cdot I}, \tag{11}$$

де E – модуль пружності матеріалу вимірювальної площини, Н/м^2; I – момент інерції вимірювальної площини, м^4.

Загальний кут нахилу вимірювальної площини з врахуванням кута повороту при дії навантаження, визначається за формулою

$$\alpha = \alpha' + \Theta_3. \tag{12}$$

За результатами математичного моделювання, проведено дослідження залежності довжини компенсатора динамічних зусиль і довжини вимірювальної площини за вказаних умов.

Для вимірювача потоку дисперсних матеріалів вибрані такі конструктивні характеристики: кут нахилу вимірювальної площини до горизонталі $\alpha' = 27{,}25°$; товщина вимірювальної площини $\delta_n = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ м; довжина вимірювальної площини $L_n = 0{,}065$ м; ширина $b_n = 0{,}069$ м; модуль пружності фосфористої бронзи $E = 1{,}15 \cdot 10^6$ кгс/см^2. Момент інерції для заданих конструктивних розмірів вимірювальної площини розраховується за формулою $I = b \cdot \delta^3/12$ і буде становити $I = 1{,}94 \cdot 10^{-6}$ см^4. За рівнянням (5) проведено моделювання зміни кута повороту, а за рівнянням (6) – сумарного кута нахилу вимірювальної площини при сталій часу зміни інтенсивності розподіленого навантаження 1 с.

Калібрування вимірювача маси потоку дисперсних матеріалів для дослідження нерівномірності і точності дозування робочих органів дозаторів кормів (див. рис. 1) проводили наступним чином. Вимірювальну площину 4 з фіксованою пластиною 8 і тензодатчиками 5, які з'єднані в схему вимірювального моста, статично навантажували стандартними гирями 7 різної ваги від $2{,}5 \cdot 10^{-3}$ до 0,08 кг з кроком $2{,}5 \cdot 10^{-3}$ кг. Під навантаженням вимірювальна площина 4 прогиналася, прогин фіксувався тензодатчиками 5, значення його відображались на моніторі комп'ютера. Електричний сигнал від тензодатчиків підсилювався тензопідсилювачем і подавався на аналогово-цифровий модуль L–154, який є інтерфейсом комп'ютера. Значення даних калібрування у цифровому вигляді записували у комп'ютер. Калібрувальний графік зміни вихідної напруги тензодатчиків вимірювача потоку дисперсних матеріалів від маси проходження потоку по тензовимірювальній площині наведено на рис. 7

Момент, який діє на тензовимірювальну площину, визначали за формулою

$$M = F_n \cdot h_c, \tag{13}$$

де F_n – сила, яка діє на тензовимірювальну площину, Н; h_c – плече сили, м.

Сила, яка діє на тензовимірювальну площину, визначали за формулою

$$F_n = G \cdot \sin \alpha, \tag{14}$$

де G – сила маси, яка діє на тензовимірювальну площину, Н; α – кут нахилу тензовимірювальної площини, град.

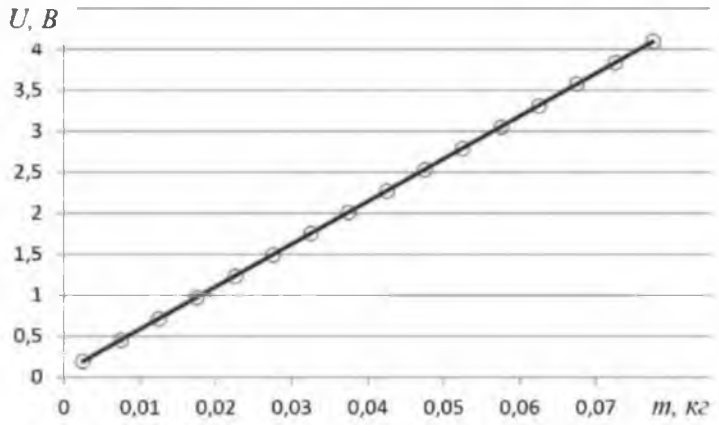

Рис. 7 – Калібрувальний графік зміни вихідної напруги U тензодатчиків вимірювача потоку дисперсних матеріалів від маси m проходження потоку по тензовимірювальній площині

За результатами калібрування вимірювача маси потоку дисперсних матеріалів одержано рівняння регресії:

$$U = 51{,}97 \cdot m_к + 0{,}0609, \qquad (15)$$

де U – вихідна напруга тензодатчиків вимірювача маси потоку дисперсних матеріалів, В; m – маса потоку комбікорму, що відповідає продуктивності дозувальних робочих органів дозатора, кг/с.

Висновки:

1. Функціонування вимірювача потоку дисперсних матеріалів в динамічному режимі забезпечення точності вимірювання і достовірності одержаних даних можливі при куті нахилу компенсатора динамічних зусиль до горизонталі $\alpha_1 = 3°$, довжині компенсатора $L_к = 0{,}045$ м, довжині вимірювальної площини $L_п = 0{,}065$ м і куті його попереднього нахилу до горизонталі $\alpha' = 27{,}25°$. Вимірювальну площину згідно з [7] виготовили із фосфористої бронзи шириною $b_п = 0{,}069$ м і товщиною $\delta_п = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ м.

2. За результатами калібрування вимірювача встановлено залежність вихідної напруги тензодатчиків вимірювача потоку дисперсних матеріалів U від проходження маси потоку дисперсних матеріалів m по тензовимірювальній площині.

Література:

1. Банга В.І. Експериментальні дослідження індивідуального дозатора комбікормів з конусним робочим органом / В.І. Банга // Вісник Львів. ДАУ: Агроінженерні дослідження. – 2003. – №7. – С.123-127.
2. Степук Л.Я. Механизация дозирования в кормоприготовлении / Л.Я. Степук – Минск: Ураджай, 1986. – 152 с.
3. Витратомір SOLIDFLOW – Альтернатива вагового методу вимірювання в харчовій промисловості - Режим доступу: https://www.kck.ua/ua/applications/elevatory/rackhodomer-solidflow – Дата звернення: 13.03.2018.
4. Регулятор потоку сипучих матеріалів SolidFlow - Режим доступу: https://www.kck.ua/ua/dir/oborudovanie_dlya_sypuchih/rashod/rackhodomer-cypuchikh-materialov-solidflow.html – Дата звернення: 13.03.2018.
5. Витратомір сипучих матеріалів – Режим доступу: http://schenckprocess.com.ua/Products/Equipment/Multicor.html – Дата звернення: 13.03.2018.
6. Яблонский А.А. / А.А. Яблонский. Курс теоретической механики. Ч. II. Динамика. – М.: Высшая школа, – 1966. С. 240.
7. Посацький С.Л. / С.Л. Посацький. Опір матеріалів. – Львів, В-цтво Львівського університету, 1963. С. 184-187.
8. Дмитрів В.Т., Жінчин Я.С., Банга В.І. Дослідження вимірювача маси потоку сипких матеріалів / В.Т. Дмитрів, Я.С.Жінчин, В.І.Банга //Вісник Львівського державного аграрного університету: Агроінженерні дослідження. –2004. – №8. – С.201–209.

Summaru

Dmytriv V.T., Banha V.I. Measuring the mass flow of disperse materials

Reasonable design and methods of measurement of flow of particulate material in the dynamic mode, the following advantages compared to existing is synchronous with the dosing devices, processing of research results and their display on a computer monitor or creating hard copies of the random process. Due to the high performance of the used analog-to-digital

Converter if necessary you can ensure that the discretization of continuous random batching process, which allows to obtain a maximum of 100 measurements and more per second and, consequently, high information content studies.

According to the results of mathematical modeling, this study depends on the length of compensator of dynamic efforts, the length of the measuring plane, changing the angle of tilt of the measurement plane.

For the flow of dispersed materials is selected the following design features: angle of inclination of the measuring plane to the horizontal; the thickness, width and length of the measuring plane; the modulus of elasticity of phosphor bronze cloth of the meter.

The functioning of the flow meter of disperse materials in a dynamic mode is ensured for the accuracy of the measurement and the reliability of the data obtained at an angle of the compensator of the dynamic forces to the horizontal α1 = 3°, the length of the compensator = 0,045 m, the length of the measuring plane = 0,065 m and the angle of its previous tilt to the horizon α'= 27.25°. The width and thickness of the measuring plane, which is = 0.069 m and = $1.5 \cdot 10^{-3}$ m, are discussed.

As a result of the calibration of the meter, the dependence of the output voltage of the strain gauges of the flow meter of dispersed materials on the mass flow of dispersed materials along the strain gauge plane was established.

Keywords: *meter, mass flow, load cell, tentively plane, calibration, particulate material, the kinetic energy, the compensator dynamic forces, moment of inertia, the speed of the flow.*

References

1. Banga V.I. Eksperimental'ni doslidzhennja individual'nogo dozatora kombikormiv z konusnim robochim organom / V.I. Banga // Visnik L'viv. DAU: Agroinzhenerni doslidzhennja. – 2003. – №7. – S.123-127.
2. Stepuk L.JA. Mehanizacija dozirovanija v kormoprigotovlenii / L.JA. Stepuk – Minsk: Uradzhaj, 1986. – 152 s.
3. Vitratomir SOLIDFLOW – Al'ternativa vagovogo metodu vimirjuvannja v harchovij promislovosti - Rezhim dostupu: https://www.kck.ua/ua/applications/elevatory/rackhodomer-solidflow – Data zvernennja: 13.03.2018.
4. Reguljator potoku sipuchih materialiv SolidFlow – Rezhim dostupu: https://www.kck.ua/ua/dir/oborudovanie_dlya_sypuchih/rashod/rackhodomer-cypuchikh-materialov-solidflow.html – Data zvernennja: 13.03.2018.
5. Vitratomir sipuchih materialiv – Rezhim dostupu: http://schenckprocess.com.ua/Products/Equipment/Multicor.html – Data zvernennja: 13.03.2018.
6. Jablonskij A.A. / A.A. JAblonskij. Kurs teoreticheskoj mehaniki. CH. II. Dinamika. – M.: Vysshaja shkola, 1966. S. 240.
7. Posac'kij S.L. / S.L. Posac'kij. Opir materialiv. - L'viv, V-ctvo L'vivs'kogo universitetu, 1963. S. 184-187.
8. Dmitriv V.T., Zhinchin J.S., Banga V.I. Doslidzhennja vimirjuvacha masi potoku sipkih materialiv / V.T. Dmitriv, J.S.Zhinchin, V.I.Banga //Visnik L'vivs'kogo derzhavnogo agrarnogo universitetu: Agroinzhenerni doslidzhennja. –2004. – №8. – S.201–209.