

УДК 631.331

© М.С. Шведик, к.т.н.

Луцький національний технічний університет

## **ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ТИСКУ У ВСМОКТУВАЛЬНОМУ ТРАКТІ ПНЕВМОВЛОВЛЮВАЧА ТА ПОТУЖНОСТІ НЕОБХІДНОЇ ДЛЯ ПРИВОДУ ЙОГО ВЕНТИЛЯТОРА**

*У статті наведено результати аналізу причин, що призводять до втрат статичного напору і аналітичні залежності для визначення втрат тиску у всмоктувальному тракті пневмовловлювача та потужності необхідної для приводу його вентилятора.*

**ПНЕВМОВЛОВЛЮВАЧ, КОНФУЗОР, МОТОВИЛО, ЗЕРНО, УДАР, ПНЕВМОПРОВІД, ВЕНТИЛЯТОР, ЦИКЛОН, ОПІР, ТИСК, ПОТУЖНІСТЬ.**

**Постановка проблеми.** Впродовж останніх п'яти років Україна інтенсивними темпами нарощує обсяги виробництва зерна довівши його валовий збір майже до 50...55 млн т. При цьому у структурі зернової продукції біля 50% припадає на зернові колосові культури. Такі обсяги виробництва дали можливість Україні на світовому ринку зерна потіснити ряд імпортерів і серед них зайняти друге місце. Однак для того, щоб утриматись на цьому ринку і залишитись в числі світових лідерів необхідно і на далі нарощувати обсяги його виробництва. Таке завдання на найближчі роки для вітчизняних аграріїв є цілком реальним, оскільки за рахунок збільшення врожайності та розширення посівних площ валовий збір зерна можна довести до 60 млн т. Однак через деякий час ці резерви поступово будуть вичерпуватись, оскільки темпи приросту врожайності уповільняться, а вишукувати додаткові посівні площі буде дедалі важче. Тому подальші темпи виробництва зерна будуть спадати і загальний обсяг його виробництва буде знаходитись в межах досягнутого рівня – 60...62 млн т.

Очевидно, що для розв'язання цієї проблеми необхідно шукати нові резерви, і не стільки пов'язаних з агротехнікою вирощування, скільки з технічним рівнем зернозбиральних машин, що дасть можливість для різкого скорочення втрат врожаю під час його збирання, які інколи сягають значних розмірів. Так, для господарства, що втратило 1% біологічного врожаю, при врожайності 30 ц/га недобір з кожних 1000 га становить 30 т [1, 2, 3].

Однією з таких причин, через яку допускаються значні втрати вирощеного врожаю, є вибивання зерна планками мотвила [11]. На жаль у жодному комбайні, а ні вітчизняного, а ні зарубіжного виробництва не передбачено пристрою, який би вловлював це зерно. На

даний час ці втрати є незворотними і шляхи їх вирішення ще не визначені. Тому запобігання втратам під час збирання має велике народногосподарське значення.

На нашу думку, найбільш ефективним способом вловлювання зерна вибитого планками мотвила є установка на комбайні спеціального пневмовловлювача принцип роботи якого ґрунтується на створенні в зоні мотвила розрідження. Однак раніше такі пристрої не розроблялись і в літературних джерелах відсутні будь-які дані, щодо обґрунтування його параметрів. А тому виникає потреба в адаптуванні відомих в інших галузях науки аналітичних залежностей, які дадуть можливість визначити втрати тиску у всмоктувальному тракті пневмовловлювача.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз літературних джерел [4, 5, 6], приурочених питанням пневмотранспортування зерна і вороху та його сепарації, показує, що пневматичні установки широко застосовують завдяки їх істотних переваг в порівнянні з механічними. Недоліками пневматичного транспорту є підвищене споживання енергії (в 4...6 разів більше, ніж у механічного) і підвищений знос частин, які контактують з вантажем [4].

За конструкцією і способом переміщення вантажу розрізняють пневматичні транспортери, аерожолоби і аероліфти. Однак, з точки зору розробки конструкції пневмовловлювача зерна, певний інтерес викликають тільки пневматичні транспортери. За принципом дії вони поділяються на всмоктувальні і нагнітальні транспортери [4]. Всмоктувальний транспортер застосовують для переміщення вантажу на невеликій відстані. Вони працюють при розрідженні 10,0...50,0 кПа. Їх використовують для розвантаження сипких вантажів з декількох місць (вагонів, барж, кузовів візків) в склади; їх можна застосовувати і для навантаження зерна в транспортні засоби. Нагнітальний транспортер використовують для транспортування вантажу на велику відстань. В залежності від тиску, створюваного вентилятором, ці установки бувають: низького тиску до 1,0 кПа, що застосовуються для транспортування сіна, соломи, полови; середнього тиску - до 3,0 кПа і високого тиску - до 15,0 кПа, які використовуються для переміщення зерна та інших сипких вантажів.

Їх принцип дії ґрунтується на переміщенні вантажів у розсіпі або штуках за допомогою напору повітря, що рухається по трубопроводу. Напором називається різниця тисків, що створюється на кінцях трубопроводу, необхідна для подолання всіх опорів, що виникають при транспортуванні вантажу. Ця різниця тисків повинна дорівнювати сумі всіх втрат тиску (напору) на окремих ділянках транспортної установки. У загальні втрати напору можуть входити втрати при введенні вантажу в трубопровід, при русі вантажу і повітря

по трубопроводу, втрати на вертикальний підйом вантажу і повітря, в колінах і відводах, в розвантажувачах і фільтрах. Для пневмотранспорту загальний напір  $h$  складається з динамічного або швидкісного напору  $h_d$ , що йде на подолання інерції повітря та вантажу, і статичного напору  $h_c$ , що витрачається на всі інші опори.

На практиці, як правило, траса пневматичної установки для переміщення сипких матеріалів складається з вертикальних і горизонтальних ділянок. Для розрахунку таких трас необхідно визначити швидкість руху повітря, яке транспортує матеріал у горизонтальному і у вертикальному трубопроводах.

Відомо [4,5], що швидкість переміщення сипких матеріалів завжди менше швидкості транспортуючого повітря. Чіткої методики визначення відставання твердих частинок від потоку повітря немає. Кожен автор, досліджуючи конкретний матеріал, виходить зі своїх положень. При цьому вихідними даними для проектування пневматичного транспортеру є його продуктивність (т/год.), схема трубопроводу та фізико-механічні властивості вантажу. В результаті розрахунку повинні бути визначені необхідна витрата повітря ( $\text{м}^3/\text{с}$ ), тиск повітря (Па), необхідний діаметр трубопроводу (м), потужність вентилятора (кВт) та інші величини. При цьому на параметри пневматичного транспортера значний вплив чинить коефіцієнти концентрації  $\mu$ . Більшість установок, що застосовуються в сільськогосподарському виробництві та на харчових підприємствах, працює при коефіцієнті концентрації  $\mu < 8 \dots 10 \text{ кг/кг}$  і зі швидкістю  $V_{\text{п}} = 10 \dots 30 \text{ м/с}$  [4, 5]. Найбільш поширені швидкості від 15 до 25 м/с.

Аналіз літературних джерел [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10], приурочених питанням пневмотранспортування показав, що в цілому теорія пневмотранспортерів ґрунтується на вченні про процеси, що відбуваються в потоках. Труднощі розрахунку полягають у виявленні дійсних опорів окремих елементів установки, і тому розрахунки в значній мірі базуються на дослідних даних. Процеси руху потоків сипких матеріалів досліджені недостатньо і слабо відображають фізико-механічні властивості та динаміку сипких матеріалів. Вирішення цих питань потребує математичного обґрунтування висунутих дослідниками гіпотез, перевірки їх в експериментальних або виробничих умовах для подальшого коректування в розрахунках пневмотранспортних установок.

На основі викладеного можна зробити висновок, що основними параметрами при проектуванні пневмотранспортної установки є її продуктивність, необхідна витрата повітря, тиск повітря, діаметр трубопроводу, потужність вентилятора та інші величини.

Однак питання, що стосуються безпосередньо застосування пневмовловлювання зерна вибитого планками мотовила, в літературних

джерелах не висвітлювались. А тому відсутність теоретичного обґрунтування процесу пневмовловлювання зерна не сприяє і розробці ефективних технічних рішень для його реалізації.

**Метою дослідження** є аналіз причин, що призводять до втрат статичного напору в пневмосистемі і встановлення аналітичних залежностей, для визначення втрат тиску у всмоктувальному тракті пневмовловлювача, та потужності необхідної для приводу його вентилятора.

**Результати досліджень.** На нашу думку, одним з найбільш ефективних технічних рішень для вловлювання зерна, що вибивається планками мотвила, є пневмовловлювач [11, 12], схему якого наведено на рис. 1.

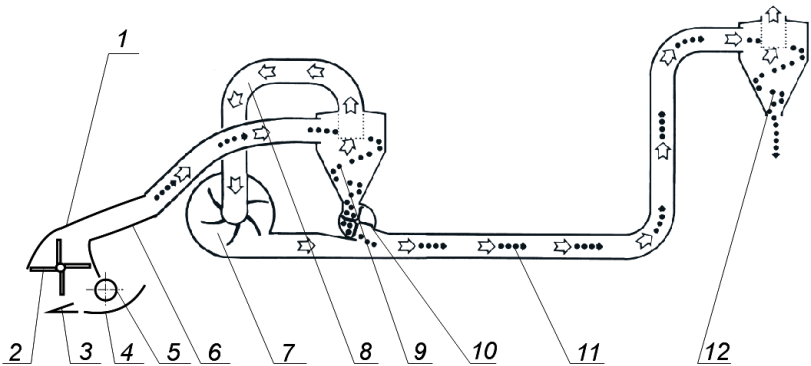


Рис. 1 – Технологічна схема пневматичного вловлювача зерна вибитого планками мотвила комбайна: 1 – конфузори; 2 – мотвило; 3 – різальний апарат; 4 – платформа жнивarki; 5 – шнек; 6 – пневмопровід; 7 – вентилятор; 8 – всмоктувальний трубопровід; 9 – всмоктувальний циклон; 10 – роторний клапан; 11 – транспортувальний контур; 12 – розвантажувальний циклон

Технологічний процес вловлювання зерна відбувається наступним чином. Під час руху комбайна в загінці вентилятор 7 через контур 8 відсмоктує з циклона 9 повітря і в ньому створюється розрідження, яке по гнучкому пневмопроводу 6 поширюється в конфузори 1. Завдяки розрідженню полегли стебла піднімаються, витягуються по висоті і входять в зону дії мотвила, яке їх підводить до різального апарата 2.

Після зрізування колосова частина хлібної маси вкладається на платформу 4 жнивarki верхнього ярусу і далі шнеком 5 подається в похилу камеру. При цьому зерно, яке випадає з колосків під час підйому

стебел та внаслідок ударів планок мотовила 2, потоком повітря засмоктуються в циклон 9, де відбувається розподіл зерна і повітря. Вентилятор високого тиску розганяє повітря до швидкості  $V \approx 25$  м/с в той час, як роторний клапан 10 проводить рівномірну порційну подачу зерна в трубопровід 11 і воно транспортується до розвантажувального циклону 12. Тут відпрацьоване повітря з легкими домішками видаляється через верхній отвір циклону, а зерно висипається в спеціальний бункер для його накопичення.

Доцільність застосування пневмовловлювача буде залежати насамперед від співвідношення додаткових затрат на дизпальне необхідне для приводу вентилятора та ринкової вартості вловленого зерна. Очевидно, що витрата дизпального залежить від втрат тиску у всмоктувальному тракті пневмовловлювача. Щоб визначити ці втрати спочатку складемо пневматичну схему пневмовловлювача, яка наведена на рис. 2.

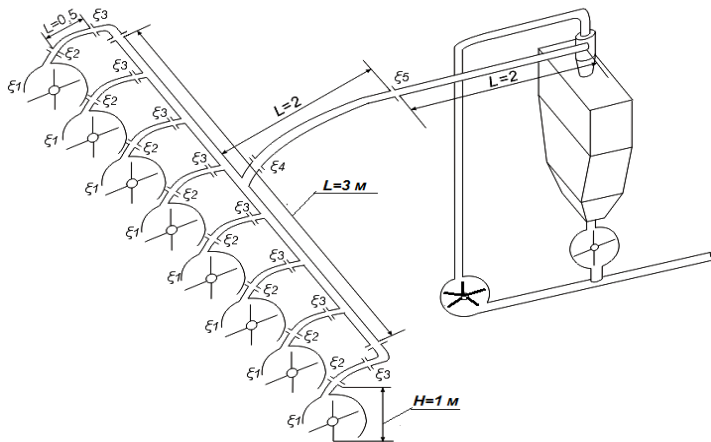


Рис. 2 – Схема прокладки пневмопроводів і розміщення конструктивних елементів, в яких виникають місцеві опори

На цій схемі детально покажемо всі конфузори і магістральні трубопроводи та патрубки, які їх з'єднують, а також зазначимо всі місцеві опори в яких відбуваються втрати тиску (в колінах, при звуженні трубопроводу, розвантажувачах і т.д.). З наведеної схеми видно, що статичний напір витрачається на подолання тертя в трубопроводі  $h_T$ , місцевих опорів (коліна, дефлектори, розвантажувач, гнучкий трубопровід)  $h_M$  і на підйом зерна  $h_T$ . Розрахунки проведемо в такій послідовності.

1. Втрати тиску від тертя під час переміщення чистого повітря вздовж трубопроводу можна визначити за формулою Дарсі:

$$h_{\text{ТП}} = \lambda \frac{L \rho_{\text{п}} V^2}{2gD}, \text{Па} \quad (1)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт опору тертю;  $L$  – довжина трубопроводу, м;  $\rho_{\text{п}}$  – щільність повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – швидкість повітря, м/с;  $g$  – прискорення сили ваги, м/с<sup>2</sup>;  $D$  – діаметр трубопроводу, м;

Коефіцієнт опору тертю визначається за формулою Бразіуса:

$$\lambda = \frac{0,3164}{R_e^{0,25}}, \quad (2)$$

тут  $R_e$  - число Рейнольдса, яке визначається так [10]:

$$R_e = \frac{VgD}{\nu}, \quad (3)$$

тут  $\nu$  – кінематична густина повітря, м<sup>2</sup>/с. При температурі повітря  $t = 30^\circ \text{C}$   $\nu = 16,6 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$ .

Розрахунку приведено довжину трубопроводу визначаємо виходячи з схеми його прокладки, наведеній на рис. 2. З схеми видно, що загальна довжина всмоктувального трубопроводу складається з двох частин. До першої відносяться патрубків, що сполучають конфузори з поперечним трубопроводом діаметром  $D_{\text{ПОП}}$ , тобто

$$\sum L_{\text{ПР1}} = 8L_{\text{КОН}} + 8L_{\text{ЗП}} + 2L_{\text{КОЛ}}, \text{ м} \quad (4)$$

а до другої частини відносяться три ділянки поздовжніх трубопроводів, що мають діаметр  $D_{\text{ПОЗД}}$ , тобто

$$\sum L_{\text{ПР2}} = L_{\text{ПК}} + L_{\text{ГН}} + L_{\text{ГОР}}, \quad (5)$$

де  $L_{\text{КОН}}$  – довжина конфузора (вертикальна частина трубопроводу), м;

$L_{\text{ЗП}}$  – довжина з'єднувальних патрубків, м;  $L_{\text{КОЛ}}$  – довжина коліна, м;

$L_{\text{ПК}}$  – довжина поперечного колектора, м;  $L_{\text{ГН}}$  – довжина гнучкого трубопроводу, м;  $L_{\text{ГОР}}$  – довжина горизонтального трубопроводу, м.

Тепер за виразами (2) і (3) можна визначити для кожної частини трубопроводу число Рейнольдса і коефіцієнт опору тертю.

Користуючись виразом (1) визначимо втрати тиску  $h_{\text{ТП1}}$  від тертя повітря під час його переміщення на ділянці поперечного трубопроводу з діаметром  $D_{\text{ПОП}}$ , що має сумарну довжину  $\sum L_{\text{ПОП}}$  та  $h_{\text{ТП2}}$  для поздовжнього трубопроводу з діаметром  $D_{\text{ПОЗД}}$  і що має сумарну довжину –  $\sum L_{\text{ПОЗД}}$ .

Отже,

$$h_{\text{ТП}} = h_{\text{ТП1}} + h_{\text{ТП2}}, \text{ Па} \quad (6)$$

2. Втрати тиску від тертя під час переміщення по трубопроводах суміші повітря і зерна визначимо за формулою [4]:

$$h_{\text{ттр}} = h_{\text{тп}}(1 + c \cdot \mu), \text{ Па} \quad (7)$$

де  $c$  – коефіцієнт, який залежить від концентрації суміші, швидкості і фізико-механічних властивостей зерна. При  $V_p = 13 \dots 26$  м/с значення коефіцієнта знаходиться в межах  $C = 0,83 \dots 0,31$ ;  $\mu$  – коефіцієнт вагової концентрації суміші, кг/кг.

3. Втрати тиску в місцевих опорах (в колінах, при звуженні трубопроводу, розвантажувачі і т.д.) визначають за формулою [10]:

$$h_{\text{МО}} = \sum \xi \frac{\rho_{\text{п}} V^2}{2g}, \text{ Па} \quad (8)$$

де  $\rho_{\text{п}}$  – щільність повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – швидкість повітря, м/с;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $\sum \xi$  – сума коефіцієнтів місцевих опорів.

Відповідно до пневматичної схеми пневмовловлювача зерна:

$$\sum \xi = 8\xi_1 + 8\xi_2 + 2\xi_3 + 3\xi_4 + \xi_5, \quad (9)$$

тут  $\xi_1$  – коефіцієнт місцевого опору від несподіваного звуження, яке виникає в конфузіві. Значення цього коефіцієнта можна визначити за формулою [4]:

$$\xi_1 = 0,5 \left( 1 - \frac{F_{\text{ТР}}}{F_{\text{КОНФ}}} \right), \quad (10)$$

тут  $F_{\text{ТР}}$  – площа трубопроводу, м<sup>2</sup>:

$$F_{\text{ТР}} = \frac{\pi D^2}{4}.$$

$F_{\text{КОНФ}}$  – площа відкритого вікна конфузора, м<sup>2</sup>;

$$F_{\text{КОНФ}} = a \cdot b, \text{ м}^2$$

тут  $a$  і  $b$  – відповідно ширина і довжина вікна конфузора, м<sup>2</sup>;  $\xi_2 \dots \xi_5$  – коефіцієнт місцевого опору, що виникає відповідно у з'єднувальному патрубку, в з'єднувальних колінах, у відводах та у в гнучкому трубопроводі визначається за формулою [6]:

$$\xi_2 = \sqrt{\delta/90^\circ}, \quad (11)$$

тут  $\delta$  – кут повороту патрубка, коліна, відводу гнучкого трубопроводу, град. Для пневмовловлювача ці кути відповідно становлять  $\delta_2 = 60^\circ$ ,  $\delta_3 = 90^\circ$ ,  $\delta_4 = 90^\circ$  і  $\delta_5 = 45^\circ$ ;  $\xi_3$  – коефіцієнт місцевого опору, що виникає в з'єднувальних колінах з кутом повороту коліна  $\delta = 90^\circ$ . Його

значення визначається за формулою (11);  $\xi_4$  – коефіцієнт місцевого опору, що виникає у відводах. Оскільки відводи змонтовані на трубі під кутом  $\delta = 90^\circ$ , то коефіцієнт опору також визначається за формулою (11);  $\xi_5$  – коефіцієнт місцевого опору, що виникає в гнучкому трубопроводі з кутом повороту  $\delta = 45^\circ$ .

4. Втрати тиску в конфузурі на підйом зерна можна визначити за формулою [4]:

$$h_{\text{пцд}} = g \cdot \mu \cdot \rho_{\text{п}} \cdot H, \text{ Па}$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $\mu$  – коефіцієнт концентрації аеросуміші;  $\rho_{\text{п}}$  – щільність повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $H$  – висота підйому зерна, м. Вона визначається з конструктивних розмірів пневмовловлювача і становить 1 м.

5. Втрати тиску в розвантажувачі (циклоні) можна визначити за формулою [10]:

$$h_{\text{ц}} = \xi \frac{\rho_{\text{п}} V^2}{2g}, \text{ Па}$$

де  $\xi = 2,5$  – коефіцієнт місцевого опору, що виникає при вході повітряно-зернової суміші в циклон;  $\rho_{\text{п}}$  – щільність повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – швидкість повітря, м/с;  $g$  – прискорення вільного падіння тіла, м/с<sup>2</sup>.

Сумарні втрати тиску у всмоктувальному тракті пневмовловлювача можна визначити за формулою:

$$\sum h = h_{\text{тп}} + h_{\text{тпз}} + h_{\text{мо}} + h_{\text{пцд}} + h_{\text{ц}}, \text{ Па.}$$

Після визначення сумарних втрат повітря можна визначити затрати потужності для приводу вентилятора, який створює в конфузорах розрідження необхідне для вловлювання (засмокування) вибитого планками мотовила зерна і його подачі в циклон за формулою [4]:

$$N = \frac{\sum h \cdot V}{3600 \cdot \eta_{\text{п}} \cdot \eta_{\text{кп}} \cdot \eta_{\text{в}}}, \text{ кВт}$$

де  $V$  – швидкість повітря, м/с;  $\eta_{\text{п}}$  – коефіцієнт корисної дії підшипників;  $\eta_{\text{кп}}$  – коефіцієнт корисної дії передачі;  $\eta_{\text{в}}$  – коефіцієнт корисної дії вентилятора.

За нашими розрахунками для пневмовловлювача з восьми конфузурів, у яких висота підйому зерна становить  $H=1,0$  м, ширина вхідного вікна конфузора  $a = 0,7$  м, його довжина  $b = 1,0$  м, діаметр поперечного трубопроводу  $D_{\text{пол}} = 0,078$  м, поздовжнього  $D_{\text{позд}} = 0,150$  м, сумарні довжини трубопроводів відповідно становлять  $\sum L_{\text{пол}}=13,0$  м і  $\sum L_{\text{позд}}=7,0$  м та прийнятих значеннях  $V = 25,0$  м/с,  $\mu = 3 \dots 5$  кг/кг,  $c$



= 0,31... 0,35,  $\eta_{II} = 0,97$ ,  $\eta_{KII} = 0,99$  і  $\eta_B = 0,8$  сумарні втрати тиску  $\Sigma h$  у всмоктувальному тракті можуть змінюватись від 0,6 кПа до 1,2 кПа, а потужність  $N$  необхідна для приводу вентилятора від 6,2 кВт до 10,84 кВт.

Отже, на підставі викладеного можна вважати, що наведені аналітичні залежності дають можливість з достатньою точністю визначити сумарні втрати тиску у всмоктувальному тракті пневмовловлювача та потужність необхідну для приводу вентилятора і є теоретичними передумовами для розробки принципово нового робочого органу зернозбирального комбайна, призначеного для пневмовловлювання зерна вибитого планками мотовила.

Таким чином, на основі проведеного аналізу можна зробити наступні **висновки**:

1. Наведені аналітичні залежності для визначення втрат тиску у всмоктувальному тракті пневмовловлювача та потужності необхідної для приводу його вентилятора забезпечують достатню точність розрахунків і їх можна застосовувати для обґрунтування параметрів під час розробки конструкції нового пристрою для вловлювання зерна, що вибивається планками мотовила.

2. Під час вловлювання зерна зміна коефіцієнта вагової концентрації аеросуміші в межах  $\mu = 3...5$  кг/кг і  $c = 0,31... 0,35$  призводить до зміни сумарних втрат тиску  $\Sigma h$  у всмоктувальному тракті пневмовловлювача в межах від 0,6 кПа до 1,2 кПа, але не порушує його робочого процесу.

2. З метою створення достатнього розрідження в конфузорах пневмовловлювача, яке забезпечить 100% вловлювання зерна, потужність  $N$  необхідна для приводу вентилятора повинна становити не менше 11 кВт.

#### Література

1. Зернозбиральна техніка: проблеми, альтернативи, прогнози Л. Погорілий, С. Коваль, В. Ясенєцький // “Техніка ППК”. – №7. – 2003 р. – С. 4-7.
2. Комплексна механізація виробництва зерна /В.Д. Гречкосій, Д.М. Алімов, В.І. Кифоренко, П.М. Чайка; За ред. В.Д. Гречкосія. – К.: Урожай, 1991. – 216с.
3. Портнов М.Н. Пособие комбайнера. – М.: Колос, 1977. – 352 с.
4. Красников В.В. Подъемно-транспортные машины. – М.: Колос, 1981. – 263 с.
5. Зенков Р.Л., Ивашков И.И., Колобов Л.Н. Машины непрерывного транспорта. – М.: Машиностроение, 1987. – 432 с.

6. Потапов Г.П. Погрузочно-транспортные машины для животноводства: Справочник. – М.: Агропромиздат, 1990. – 239с.
7. Евстифеев В.Н. Трубопроводный транспорт пластиковых и сыпучих материалов в строительстве. – М.: Стройиздат, 1989. – 248с.
8. Смыслов В.В. Гидравлика и аэродинамика. – Киев: Вища школа. Главное изд-во, 1979. – 336 с.
9. Калицун В.И., Дроздов Е.В. Основы гидравлики и аэродинамики. – М.: Стройиздат, 1980. – 247с.
10. Кондаков В.Н., Коробов М.М., Грицюк И.Г., Даценко Н.М. Пневматический и гидравлический транспорт в пищевой промышленности. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 182 с.
11. А.с. №1181590 (СССР). Способ уборки зерновых культур и зерноуборочный комбайн. Шведик Н.С. – Заявл. 14.02.83., №3552957. Оpubл. в Б.И., №36. – 1985.
12. Шведик М.С., Галапац О.Л. Аналіз процесу взаємодії планки мотовила з колосоносним шаром. Сільськогосподарські машини: Зб. наук. стат. – Вип. 22. – Луцьк, 2012. – С. 257-262.

*Рецензент д.т.н., проф. В.І. Швабюк.*