

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ ПСЕВДОЗРІДЖЕНОГО ШАРУ В ГІДРО-ПНЕВМАТИЧНОМУ ВИСІВНОМУ АПАРАТІ

Бойко Владислав Борисович викладач

Дніпропетровський державний аграрно-економічний університет

Boiko V.

Dnepropetrovsk State Agrarian and Economic University

Анотація: побудовано математичну модель процесу формування псевдозрідженого шару насіння в забірній камері гідро-пневматичного висівного апарата, отримано залежності розміщення насіннєпроводу від кута α конічної поверхні забірної камери та швидкості V потоку рідини.

Ключові слова: гідро-пневматичний висівний апарат, псевдозрідження, координатне землеробство, мостове землеробство, турбулентність.

Постановка проблеми

Останнім часом перед суспільством усе гостріше постають взаємопов'язані проблеми енергозбереження та захисту довкілля. Перспективним напрямком розвитку механізації рослинництва, який забезпечує більше ніж двократне зменшення енерговитрат та покращення екологічності технологічних процесів, виступає система мостового землеробства. За своєю сутністю мостове землеробство відноситься до точного землеробства, відмінною рисою якого є застосування добрив, отрутохімікатів та інших витратних матеріалів у відповідності до потреб рослин, що знаходяться в конкретних умовах конкретної ділянки поля, і за рахунок цього зменшення техногенного навантаження на ґрунт та покращення екологічності кінцевої продукції. Для реалізації точного землеробства необхідні засоби координації робочих органів відносно поля й рослин, що на ньому ростуть. У сучасних системах точного землеробства для цього застосовують засоби супутникової навігації, доповнені локальними системами місцевизначення та системами розпізнавання рослин. У мостовому землеробстві з'являється можливість підвищити точність координації робочих органів і ефективність усіх видів впливу на ґрунт і рослини без застосування складних систем навігації та розпізнавання рослин за рахунок застосування координатного принципу – розташування культурних рослин у певному порядку, у заздалегідь визначених для цього точках поля з наперед заданими координатами. При такому підході можливе впровадження багатовидових агрофітоценозів, що еквівалентно одночасному вирощуванню декількох урожаїв на одній площі.

Аналіз посівної техніки вказує на відсутність засобів сівби рослин за координатним принципом. В Дніпропетровському аграрно-економічному університеті розроблено та ведеться дослідження гідро-пневматичного висівного апарата нового типу для підвищення ефективності мостового землеробства.

Мета роботи

Теоретичне дослідження процесу формування псевдозрідженого шару насіння в забірній камері висівного апарата та визначення оптимального розміщення насіннєпроводу відносно забірної камери.

Виклад основного матеріалу дослідження

Формування псевдозрідженого шару в гідро-пневматичному висівному апараті [1, 2] відбувається за допомогою насоса 5 (рис.1), що створює потік з швидкістю V , який підхоплює насіння з утримуючої сітки 4 і піднімає його в напрямку конічної забірної камери 3. В результаті основна частина насіння розміщується в бакові 8, а в зоні розміщення насіннєпроводу 2 формується псевдозріджений шар заданої концентрації. Керування насосом 8 здійснюється за допомогою електронного блока 7 з оптичними датчиками.

Застосування даного способу псевдозрідження дозволить знизити енерговитрати на переміщення насіння за рахунок локально перемішування насіння, що розміщується в забірній камері.

Для дослідження процесу утворення псевдозрідженого шару необхідно визначити математичний апарат, який дозволить отримати траєкторії, діаграми сил і величини ковзання при русі насіння в потоці рідини з градієнтом швидкості.

Для початку запишемо диференціальне рівняння руху однієї сферичної насінини в заданій області швидкостей потоку рідини [3]:



$$\begin{cases} \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_p \frac{d_p \bar{V}_p}{dt} = \bar{F}, \\ \frac{d_p \bar{S}_p}{dt} = \bar{V}_p, \\ \frac{d_p}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \bar{V}_p \cdot \nabla, \end{cases} \quad (1)$$

де a – радіус сферичної насінини, м;
 ρ_p – густина насінини, кг/м³;
 \bar{V}_p – вектор швидкості руху насінини, м/с;
 \bar{S}_p – вектор переміщення насінини, м;
 \bar{F} – вектор результуючої сили, що діє на насінину, Н.

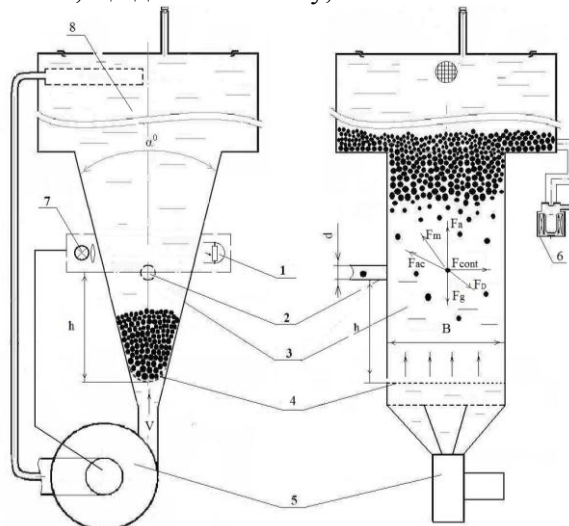


Рис. 1. Процес формування псевдозрідженого шару

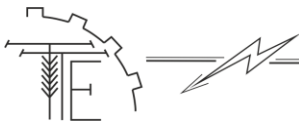
Спроби вирішувати систему рівнянь (1) пов'язані з рядом труднощів, суть яких зводиться до наступного:

- а) загальне число сил, що діють на насінину в потоці рідини, є невизначеним, оскільки не до кінця описані процеси, що визначають поведінку насінини в потоці;
- б) строгі аналітичні вирази для деяких виразів правої частини рівняння (1) невідомі (наприклад, вираз для гідродинамічної сили).

Для подальших досліджень кінематичних і динамічних характеристик насінини при русі її в потоці рідини приймаємо наступні припущення.

1. Насіння – жорсткі сфери радіусом 0,003 м, які не відрізняються одне від одного.
2. Відсутній теплообмін між насінням і середовищем.
3. Сила Бассе \bar{F}_B дорівнює нулю.
4. Так як діаметр насінини складає 0,001-0,005 м, а градієнта швидкості потоку на зазначеній відстані практично немає, то силою Магнуса \bar{F}_{Mag} можна знехтувати.
5. Приймаючи, що насіння рухаються в абсолютно однорідній рідині і злипання між ними відсутнє можна стверджувати про відсутність сили Мещерського \bar{F}_M .
6. У зв'язку із великою швидкістю потоку рідини $V_1 = 0,4-0,6$ м/с дифузійний дрейф насіння відсутній, тому і сила дифузійного дрейфу \bar{F}_{Dif} дорівнює 0.
7. За несучий потік приймається потік рідини, що стаціонарно рухається у вертикальній забірній камері при ізотермічних умовах.

На основі зроблених припущень в рівнянні руху насінини (1) будуть враховані тільки наступні сили: сила тяжіння \bar{F}_g ; сила Архімеда \bar{F}_A ; сила, що зумовлена зміною тиску \bar{F}_{ac} ; сила, еквівалентна впливу приєднаної маси \bar{F}_m ; сила в'язкого опору \bar{F}_D і сумарна сила контактної взаємодії насінин між собою і стінкою забірної камери $\bar{F}_{contact}$ (тільки при умові зіткнення насінин):



Врахувавши вище наведене отримаємо систему диференційних рівнянь руху насінини в потоці рідини:

$$\begin{cases} \frac{d_p \bar{V}_p}{dt} = \frac{2(\rho_p - \rho_l)}{2\rho_p + \rho_l} \bar{g} + \frac{3\rho_l}{2\rho_p + \rho_l} \frac{d_l \bar{V}_l}{dt} + \\ + \frac{3\rho_l f_M(\text{Re})}{4a(2\rho_p + \rho_l)} (\bar{V}_l - \bar{V}_p) \cdot |\bar{V}_l - \bar{V}_p| + \bar{F}_{\text{contact}}, \\ \bar{F}_{\text{contact}} = \begin{cases} \bar{F}_n + \bar{F}_t, & \bar{S}_{pA} = \bar{S}_{pB}, \\ 0, & \bar{S}_{pA} \neq \bar{S}_{pB}, \end{cases} \\ \frac{d_p \bar{S}_p}{dt} = \bar{V}_p, \\ \frac{d_p}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \bar{V}_p \cdot \nabla. \end{cases} \quad (2)$$

Система диференційних рівнянь (2) в загальному вигляді не вирішується аналітичними методами. Дослідженнями [7-9] запропоновано вирішення подібних систем методом кінцевих елементів, який реалізовано в програмному пакеті STAR-CCM+. При моделюванні процесу зазначеним методом задаються початкові положення, швидкості насінин і потоку рідини. Потім, виходячи з цих початкових даних заданих фізичних законів контактної взаємодії, обчислюються сили, що діють на кожну насінину в кожний інтервал часу. Для кожної насінини обчислюється результуюча сила і також вирішується задача Коші на вибраному відрізку часу, результатом якої є початкові дані для наступного кроку. В якості фізичних моделей для чисельного моделювання були обрані наступні: k-ε модель турбулентності розділеної течії, поле сили тяжіння, постійна густина рідини, модель дискретних елементів, лагранжева багатофазність, модель багатофазної взаємодії [4-9].

За фактори чисельного моделювання були прийняті наступні конструктивно-технологічні параметри: об'ємна концентрація насіння в забірній камері n, кут між поверхнями забірної камери α і швидкість на вході забірної камери V₀ (межі варіювання представлені в табл. 1). Час проведення чисельного моделювання склав 10 с.

Об'ємна концентрація насіння в забірній камері розраховується за формулою:

$$n = \frac{4N\pi R^3}{3v_k}, \quad (3)$$

де N – кількість насінин в забірній камері;

R – радіус насінин, м;

v_k – об'єм призматичної забірної камери, м³:

$$v_k = V \cdot (H^2 - h^2) \cdot \text{tg} \frac{\alpha}{2}; \quad (4)$$

V – ширина забірної камери, м;

H – висота забірної камери, м;

h – висота усічення забірної камери, м;

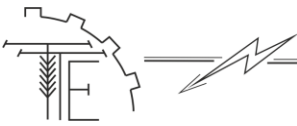
α – кут між поверхнями забірної камери, °.

Таблиця 1

Рівні варіацій факторами чисельного моделювання

Рівні варіацій факторів	Фактори		
	Об'ємна концентрація насіння в забірній камері n	Кут між поверхнями забірної камери α, °	Швидкість на вході забірної камери V ₀ , м/с
Верхній рівень (+)	0,48	20	0,6
Основний рівень (0)	0,32	15	0,5
Нижній рівень (-)	0,16	10	0,4
Інтервал варіацій факторів	0,16	5	0,1

Чисельне моделювання було проведено за повним факторним дослідом із загальною кількістю дослідів – 3³ = 27. В результаті були отримані графічні інтерпретації динамічного розподілу



(рис. 2) насінин в об'ємі забірної камери для кожного досліді.

З рисунку 2 видно, що насінини в об'ємі забірної камери переміщуються за лініями току рідини. Узагальнюючі, траєкторії руху насінин представлені на рис. 3. Із збільшенням кута між поверхнями забірної камери α збільшується асиметричність розподілу насінин: так при куті більше 15° спостерігається поява незначної асиметрії. Однак, навіть при появі асиметрії розподілу насінин, з рисунків 2 і 3 видно, що на осі симетрії забірної камери спостерігається найменша концентрація псевдозрідженого шару. Тому насіннеспровід слід розміщати безпосередньо на вісі симетрії забірної камери, висота розміщення якого визначається з умови однорідності концентрації псевдозрідженого шару.

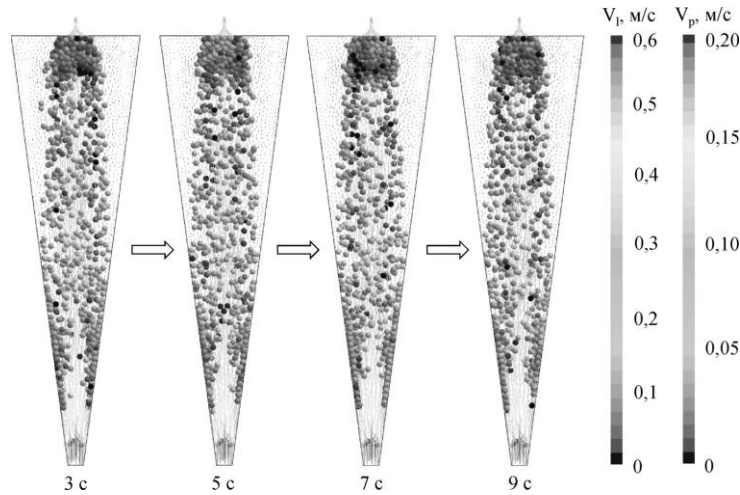


Рис. 2. Динаміка розподілу насінин в об'ємі забірної камери для досліді: $n = 0,32$, $\alpha = 15^\circ$, $V_0 = 0,6$ м/с

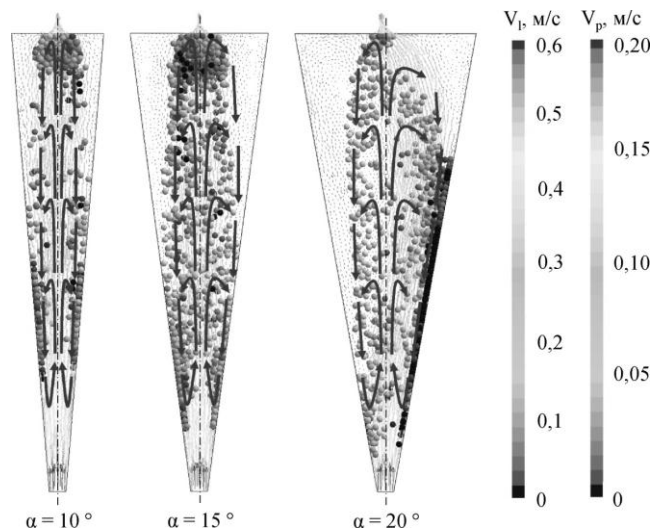


Рис. 3. Траєкторії руху насінин в об'ємі забірної камери для досліді: $n = 0,32$, $V_0 = 0,6$ м/с

В якості критерію оцінки процесу формування псевдозрідженого шару в забірній камері гідропневматичного висівного апарата було обрано ймовірність появи двох і більше насінин на вісі симетрії забірної камери, яка визначається за формулою:

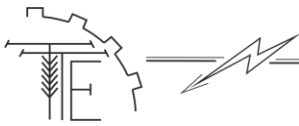
$$p = \frac{N_{>1}}{N_1 + N_{>1}}, \quad (5)$$

де $N_{>1}$ – кількість моментів часу, коли в заданій області спостерігаються більше 1 насінини;

N_1 – кількість моментів часу, коли в заданій області спостерігається 1 насінина;

N_n – кількість моментів часу, коли в заданій області спостерігається n насінин.

На вісі забірної камери виділено 11 циліндричних областей із геометричними розмірами: D_{area}



$r = 0,003$ м, $V_{area} = 0,015$ м, які розташовані на відстані $L_{area} = 0,005$ м одна від одної (рис. 4).

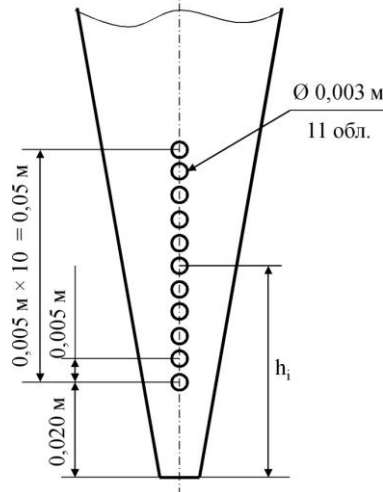


Рис. 4. Схема розташування циліндричних областей в забірній камері

При кожному досліді фіксувалися значення кількостей моментів часу, коли в заданій циліндричній області спостерігається 1 і більше насінин (див. гістограма рисунка 5). За формулою (5) розраховано ймовірність появи двох і більше насінин для заданої циліндричної області (див. графік рис. 5).

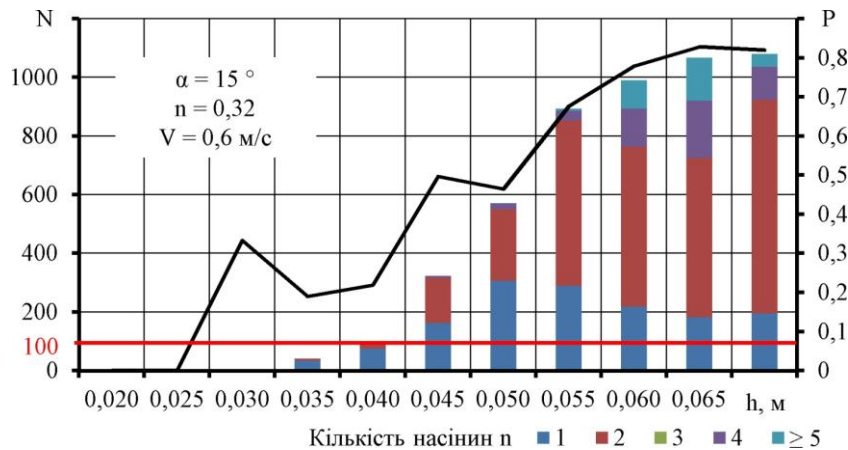


Рис. 5. Залежність кількості моментів часу N та ймовірності появи двох і більше насінин P від висоти розміщення насіннєпроводу h

Основними вимогами до роботи координатного висівного апарата є достатня швидкодія та точність висіву в наперед задані точки поля. Згідно з принципом роботи швидкодія висівного апарата визначається часом «вистрілювання» t_b та часом «заряджання» t_3 , які в сумі повинні бути меншими, ніж час циклу $t_{ци}$, тобто час проходу між суміжними висіваннями:

$$t_b + t_3 + t_0 = t_{ци}, \quad (6)$$

де t_0 – час очікування, с;

t_b – час «вистрілювання», с;

t_3 – час «заряджання», с;

$t_{ци}$ – час циклу, або проходу між суміжними висіваннями, с.

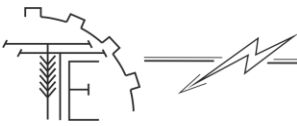
При швидкості руху висівного апарату W_a та відстані між суміжними висіваннями A_a , тривалість циклу становить:

$$t_{ци} = \frac{A_a}{W_a}, \quad (7)$$

де W_a – швидкість руху висівного апарату, м/с;

A_a – відстань між суміжними висіваннями, м.

Згідно з технологічними вимогами для висівного апарата, який працює на швидкості 0,5 м/с і



повинен висіювати насіння з інтервалом 0,05 м тривалість циклу становить 0,1 с (частота «вистрілювання» 10 Гц). Тоді мінімальна кількість насінин, які можуть бути внесені у ґрунт за час моделювання 10 с – 100 шт.

За умовою виконання згаданих технологічних вимог і мінімізації ймовірності появи двох і більше насінин для кожного дослідження встановлено найбільш раціональну висоту розміщення насіннепроводу. З використанням програмного пакету Mathematica проведено апроксимацію отриманих даних у вигляді рівняння регресії, в результаті якої встановлено залежність висоти розміщення насіннепроводу від факторів чисельного моделювання:

$$h = -0,0469444 - 3,61627 \times 10^{-15} n + 8,39661 \times 10^{-16} n^2 + 0,625 V + 3,64526 \times 10^{-15} n V - 0,333333 V^2 - 0,00766667 \alpha + 6,26292 \times 10^{-17} n \alpha - 0,015 V \alpha + 0,000366667 \alpha^2. \quad (8)$$

За розрахованими значеннями коефіцієнтів кореляції та критерію Стюдента незначущими на рівні довірчої ймовірності більше 95% є коефіцієнти при таких членах рівняння: n , n^2 , $n \cdot \alpha$, $n \cdot V$. На основі цього рівняння регресії (8) прийме вигляд (рис. 6):

$$h = -0,04694 + 0,625 V - 0,3333 V^2 - 0,007667 \alpha - 0,015 V \alpha + 0,0003667 \alpha^2. \quad (9)$$

Як видно з рівняння (9), висота розміщення насіннепроводу не залежить від об'ємної концентрації насіння в забірній камері n , що є позитивним моментом, так як зменшення кількості насіння в забірній камері не призводить до відхилення поставлених технологічних вимог.

Аналізуючи рис. 6 можна стверджувати, що із збільшенням кута між поверхнями забірної камери і швидкості на її вході необхідно збільшувати і висоту розміщення насіннепроводу. Це необхідно для виконання поставлених технологічних вимог і мінімізації ймовірності потрапляння двох і більше насінин в насіннепровід гідропневматичного висівного апарата.

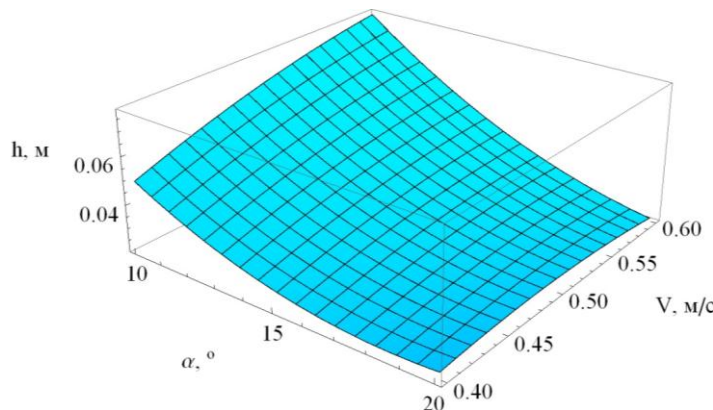


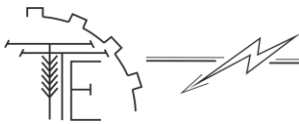
Рис. 6. Залежність висоти розміщення насіннепроводу h від кута між поверхнями забірної камери α і швидкості на її вході

Висновки

Результати отриманих лабораторних досліджень доводять адекватність побудованої математичної моделі процесу формування псевдозрідженого шару насіння в забірній камері гідропневматичного висівного апарата. Отримані залежності розміщення насіннепроводу від кута α кінцевої поверхні забірної камери та швидкості V потоку рідини дозволяють визначитися з оптимальною висотою розміщення насіннепроводу.

Список літератури

1. Спосіб координатного гідропневматичного висіву насіння та пристрій для його реалізації. Патент України UA № 90998 A01C7/04. Бюл. № 12, 2010.
2. Бойко В.Б. Процес утворення пульпи в координатному гідропневматичному висівному апараті. / Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – «Механізація сільськогосподарського виробництва». – X., 2014. – Вип. 148 - С. 48-55.
3. Nail A. Gumerov. Modeling of particle motion in viscous swirl flow between two porous cylinders / Nail A. Gumerov, Ramani Duraiswami // Proceedings of FEDSM'98 1998 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting June 21-25, 1998, Washington, DC – P. 1-8.
4. Komives V. Simulation of granular flow in a fluid applied to sedimentation / Komives V., Mege P., Meimon Y.



Herrmann H.// *Granular Matter*. – 2006. – № 8 (1). – P. 41-54.

5. Johnson K.L. *Contact Mechanics* / K.L. Johnson // Cambridge University Press. – 1987. – 434 p.

6. Di Renzo. *Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes* / Di Renzo Alberto, Di Maio Francesco Paolo // *Chemical Engineering Science*. – 2004. – № 59 (1). – P. 525-541.

7. Pertti Broas. *Advantages and problems of CAVE-visualisation for design purposes*. – Trans. VTT Symposium “Virtual prototyping”. – Espoo, Finland, February 1 st, 2001. – pp. 73–81.

8. Bai, C. 1996. “Modelling of spray impingement processes”, Ph.D Thesis, University of London

9. Cundall, P. A., Strack, O. D. L. 1979. “A discrete numerical model for granular assemblies”, *Geotechnique*, 29, P. 47-65.

References

1. Sposib koordynatnogo gidro-pnevmatuchnogo vusivu nasinnya ta prustriy dlya yogo realizazii. Patent Ukraina UA № 90998 A01C7/04. Bul. № 12, 2010.

2. Boyko V.B. *Proces utvorenniya pulpu v koordynatnomu gidro-pnevmatuchnomu vusivnomu aparati.* / Visnuk Kharkivskogo nazionalnogo technitnogo universitetu silskogo gospodarstva imeni Petra Vasylenka. – «mechanizaciya silskogo vurobnuctva». – Kh., 2014. – Vup. 148 – с. 48-55.

3. Nail A. Gumerov. *Modeling of particle motion in viscous swirl flow between two porous cylinders* / Nail A. Gumerov, Ramani Duraiswami // *Proceedings of FEDSM'98 1998 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting June 21-25, 1998, Washington, DC* – P. 1-8.

4. Komiwes V. *Simulation of granular flow in a fluid applied to sedimentation* / Komiwes V., Mege P., Meimon Y., Herrmann H.// *Granular Matter*. – 2006. – № 8 (1). – P. 41-54.

5. Johnson K.L. *Contact Mechanics* / K.L. Johnson // Cambridge University Press. – 1987. – 434 p.

6. Di Renzo. *Comparison of contact-force models for the simulation of collisions in DEM-based granular flow codes* / Di Renzo Alberto, Di Maio Francesco Paolo // *Chemical Engineering Science*. – 2004. – № 59 (1). – P. 525-541.

7. Pertti Broas. *Advantages and problems of CAVE-visualisation for design purposes*. – Trans. VTT Symposium “Virtual prototyping”. – Espoo, Finland, February 1 st, 2001. – pp. 73–81.

8. Bai, C. 1996. “Modelling of spray impingement processes”, Ph.D Thesis, University of London

9. Cundall, P. A., Strack, O. D. L. 1979. “A discrete numerical model for granular assemblies”, *Geotechnique*, 29, P. 47-65.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПСЕВДООЖИЖЕННОГО СЛОЯ В ГИДРО-ПНЕВМАТИЧЕСКОМ ВЫСЕВАЮЩЕМ АППАРАТЕ

Аннотация: построена математическая модель процесса формирования псевдоожигенного слоя семян в заборной камере гидро-пневматического высевачего аппарата, получены зависимости размещения семяпровода от угла α конической поверхности заборной камеры и скорости V потока жидкости.

Ключевые слова: гидро-пневматический высевачий аппарат, псевдоожигение, координатное земледелие, мостовое земледелие, турбулентность.

THEORETICAL STUDY OF THE FORMATION OF FLUIDIZATION LAYER IN HYDRO-PNEUMATIC SOWING APPARATUS

Summary: mathematical model of the process of formation fluidization layer of seed in the intake chamber hydro-pneumatic sowing machine, the dependences of placing the VAS deferens on the angle α of the conical surface suction chamber and the velocity V of fluid flow.

Keywords: hydro-pneumatic metering, fluidization, coordinate agriculture, bridge agriculture, turbulence.