

Конструкція і теорія сільськогосподарських машин
Construction and theory of agricultural machines

УДК 631.33

Теоретичні дослідження руху рідини в ємності
гідропневматичного висівного апаратаВ.Б. Бойко¹, Е.Б. Алієв²

¹Дніпропетровський державний аграрно-економічний університет
(м. Дніпропетровськ, Україна), vlad-boyko@mail.ru;
²Інститут олійних культур НААН

У відомих гідравлічних висівних апаратах процес формування псевдозрідженого шару забезпечується механічним способом, відбувається перемішування досить значних об'ємів рідини з насінням, що зумовлює підвищення енергозатрат на привод змішувального пристрою. Контакт насіння з робочими елементами мішалок викликає травмування пророщеного насіння. Будова координатного гідропневматичного апарата дає можливість усунути зазначені недоліки застосуванням гідравлічного способу формування псевдозрідженого шару заданої концентрації насіння.

В результаті проведених досліджень побудовано математичну модель руху рідини в ємності гідропневматичного висівного апарата з використанням програмного пакету STAR-CCM+, який реалізовано методом кінцевих елементів. При цьому використовувалися адаптивні регулярні розрахункові сітки з перемінним розміром комірки. В якості моделі вибрано генератор призматичного шару сітки, генератор багатограних осередків і генератор поверхневої сітки.

На першому етапі чисельного експерименту було визначено векторне поле швидкостей рідини при різному розташуванні вихідного отвору ємності гідропневматичного висівного апарата

Другий етап чисельного моделювання було проведено за повним факторним дослідом із загальною кількістю дослідів – $3^2 = 9$. В результаті моделювання було отримано розподіл швидкостей рідини в забірній камері в залежності від кута між поверхнями забірної камери і швидкості на її вході.

Аналіз отриманих досліджень доводить, що із поступовим розширенням забірної камери ближче до границі виникає від'ємне значення проекції швидкості на вертикальну вісь – це свідчить про наявність турбулентної течії пов'язаної з опором рідини, що створюють стінки забірної камери. За умови незначного відхилення щільності насіння і робочої рідини можна припустити, що насіння в псевдозрідженому шарі буде рухатися за лініями току рідини – підніматися з центру і опускатися по обмежуючих поверхнях камери.

Проведені дослідження на лабораторній установці гідропневматичного висівного апарата доводять адекватність отриманої математичної моделі руху рідини.

Ключові слова: гідровисів, висівний апарат, псевдозріджений шар, турбулентність, коефіцієнт тертя рідини, текучість рідини, ємність.

Постановка проблеми. Дослідження координатного гідропневматичного апарата [1] показали, що ефективність його роботи залежить від процесу формування псевдозрідженого шару із насіння та рідини всередині висівного апарата. Швидкісний режим робочої рідини є одним із основних чинників підтримання псевдозрідженого шару необхідної концентрації. Дослідження швидкісного режиму текучості робочої рідини дозволить оптимізувати конструктивні параметри висівного апарата.

Аналіз останніх досліджень. У відомих гідравлічних висівних апаратах процес формування псевдозрідженого шару забезпечується ме-

ханічним способом, відбувається перемішування досить значних об'ємів рідини з насінням, що зумовлює підвищення енергозатрат на привод змішувального пристрою. Контакт насіння з робочими елементами мішалок викликає травмування пророщеного насіння. Будова координатного гідропневматичного апарата дає можливість усунути зазначені недоліки застосуванням гідравлічного способу формування псевдозрідженого шару заданої концентрації насіння [2].

Мета досліджень. Побудова математичної моделі руху рідини в ємності гідропневматичного висівного апарата.

Результати досліджень. Для визначення векторного поля швидкостей в ємності гідропневматичного висівного апарата, в якій формується псевдозріджений шар насінневого матеріалу, розглянемо як гідродинамічний процес руху рідини по об'єму ємності.

Математичну модель текучості рідини в ємності гідропневматичного висівного апарата для координатного висіву отримуємо при наступних припущеннях.

1. Рідина є нестисливою та в'язкою, тобто виконується умова [3 - 5]:

$$\nabla \bar{V} = 0, \quad (1)$$

де \bar{V} – векторне поле швидкостей рідини, м/с; $\bar{\nabla}$ – векторний диференціальний оператор Гамільтона:

$$\bar{\nabla} = \frac{\partial}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial}{\partial y} \bar{j} + \frac{\partial}{\partial z} \bar{k} \quad (2)$$

$x, y, z(x_i)$ – Декартові координати, м; $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ – одиничні вектори по осях x, y, z відповідно.

2. Рух рідини підпорядковується системі диференціальних рівнянь у частинних похідних Нав'є-Стокса [3 - 5]:

$$\rho \frac{d\bar{V}}{dt} = -\rho(\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V} + \mu \Delta \bar{V} - \bar{V} P - \rho \bar{g}, \quad (3)$$

де ρ – густина рідини, кг/м³; t – час, с; \bar{g} – прискорення вільного падіння, м/с²; P – тиск, що діє на рідину, Па; μ – коефіцієнт динамічної молекулярної в'язкості рідини, Па·с; Δ – векторний оператор Лапласа

$$\Delta = \bar{\nabla} \cdot \bar{\nabla}. \quad (4)$$

3. Для першого наближення вважаємо, що потік рідини є стаціонарним (сталим) [3 - 5]:

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = 0. \quad (5)$$

4. Рух рідини є турбулентним, що підпорядковується $k-\varepsilon$ моделі, в якій реалізовано вплив флуктуації середньої швидкості (у вигляді турбулентної кінетичної енергії) і процесу зменшення цієї флуктуації за рахунок в'язкості (дисипації). У даній моделі вирішується два додаткових рівняння для транспорту кінетичної енергії турбулентності і транспорту дисипації турбулентності [3-5, 8]:

$$\rho \frac{dk}{dt} + \rho \bar{V} \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \tau_i \frac{\partial \bar{V}}{\partial x_i} - \rho \varepsilon, \quad (6)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} + \rho \bar{V} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_i \frac{\partial \bar{V}}{\partial x_i} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (7)$$

де k – кінетична енергія турбулентності, м²/с²; ε – швидкість дисипації кінетичної енергії турбулентності, м²/с²; μ_t – коефіцієнт динамічної турбулентної в'язкості рідини, Па·с; τ_i – тензор дотичних напружень, Па; $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ – турбулентні числа Прандтля для k і ε відповідно; $C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$ – емпіричні постійні моделі.

5. Згідно досліджень Chen N.H. коефіцієнт тертя рідини об стінки ємності можна розрахувати за формулою [6]:

$$f_M = \begin{cases} \frac{16}{\text{Re}}, & \text{Re} \leq 2000, \\ (-4K_{lg2})^2, & \text{Re} \geq 4000, \end{cases} \quad (8)$$

де

$$K_{lg1} = \lg \left(\frac{\varepsilon^{1,1098}}{2,8257D^{1,1098}} + \left(\frac{7,149}{\text{Re}} \right)^{0,8981} \right);$$

$$K_{lg2} = \lg \left(\frac{\varepsilon}{3,7065D} - \frac{5,0452}{\text{Re}} K_{lg1} \right);$$

ε – абсолютна шорсткість стінки; Re – число Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{V \cdot D_G \cdot \rho}{\mu} \quad (9)$$

D_G – гідравлічний діаметр, м;

Врахувавши наведені припущення, вирішимо плоску задачу для поперечного перерізу ємності гідропневматичного висівного апарата (рис. 1), для цього проведемо перетворення рівнянь (3), (6) і (7):

$$\begin{cases} \frac{dV_x}{dt} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \Delta V_x, \\ \frac{dV_y}{dt} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \Delta V_y, \\ \rho \frac{dk}{dt} + \rho V_x \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} S_{kx} + \tau_i \frac{\partial V_x}{\partial x} - \rho \varepsilon, \\ \rho \frac{dk}{dt} + \rho V_y \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} S_{ky} + \tau_i \frac{\partial V_y}{\partial y} - \rho \varepsilon, \\ \rho \frac{d\varepsilon}{dt} + \rho V_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} S_{\varepsilon x} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_i \frac{\partial V_x}{\partial x} - K_{\varepsilon 2}, \\ \rho \frac{d\varepsilon}{dt} + \rho V_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} S_{\varepsilon y} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_i \frac{\partial V_y}{\partial y} - K_{\varepsilon 2}. \end{cases} \quad (10)$$

де

$$S_{kx} = \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right], \quad S_{ky} = \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right],$$

$$S_{\varepsilon x} = \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right], \quad S_{\varepsilon y} = \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right],$$

$$K_{\varepsilon 2} = C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

Розрахунок режимів течучості в ємності гідропневматичного висівного апарата виконуємо при наступних граничних умовах (рис. 1):

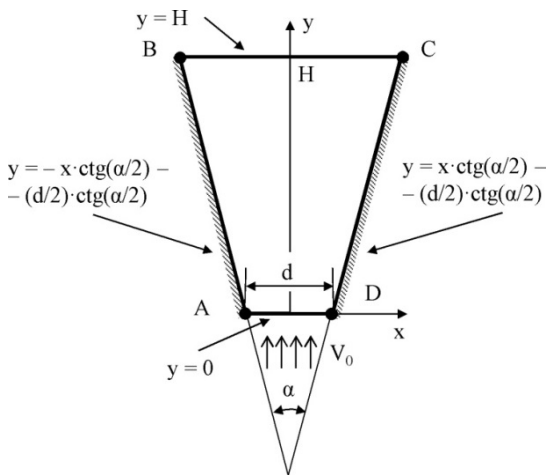


Рис. 1. Поперечний переріз ємності гідропневматичного висівного апарата

1. На бокових границях задаються жорсткі стінки, рівняння яких представлено у вигляді:

$$AB: y = x \cdot \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} - \frac{d}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \quad (11)$$

$$BC: y = -x \cdot \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} - \frac{d}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \quad (12)$$

де α – кут між боковими поверхнями ємності; d – ширина вхідного патрубку, через який поступає потік рідини, м. Швидкість на боковій поверхні дорівнює 0 м/с:

$$\overline{V_{AB}} = \overline{V_{BC}} = 0 \quad (13)$$

2. Нижня границя є прозорою із заданим постійним профілем швидкості V_0 :

$$DA: y = 0, \quad (14)$$

$$\overline{V_{DA}} = V_0, \quad (15)$$

де V_0 – початкова швидкість, м/с.

3. На верхній границі – тиск на виході:

$$BC: y = H, \quad (16)$$

$$P_{BC} = 0, \quad (17)$$

де H – висота ємності, м.

Розрахунок течучості проводився з використанням програмного пакета STAR-CCM+, який реалізовано методом кінцевих елементів [7 - 9]. При цьому використовувалися адаптивні регулярні розрахункові сітки із змінним розміром комірки. Розрахункова сітка наведена на рис. 2. Базовий розмір комірки прийнятий 0,001 м. Розміри наступної комірки збільшуються в 1,2 раза в порівнянні з попередньою. В якості моделі сітки було обрано генератор призматичного шару, генератор багатограничних комірок та генератор поверхневої сітки.

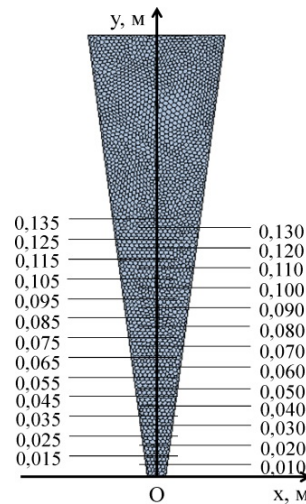


Рис. 2. Розрахункова сітка забірної камери гідропневматичного висівного апарата в STAR-CCM+

Через те, що результати чисельного моделювання течучості в'язкої рідини істотно залежать від використовуваної моделі турбулентності, вибору розрахункової сітки, числа її вузлів, граничних умов і обчислювального алгоритму, тому було проведено верифікацію, яка забезпечила збіжність результатів. У якості фізичних моделей для чисельного моделювання були обрані наступні: $k - \varepsilon$ модель турбулентності розділеної течучості, поле сили тяжіння, постійна густина рідини [7 - 9].

Для чисельного моделювання процесу переміщення рідини в ємності гідропневматичного висівного апарата були прийняті конструктивно-технологічні параметри, які наведені в табл. 1. За фактори чисельного моделювання були прийняті наступні конструктивно-технологічні параметри: кут між поверхнями забірної камери α і швидкість на вході забірної камери V_0 (межі варіювання представлені в табл. 2).

Таблиця 1. Конструктивно-технологічні параметри забірної камери гідро-пневматичного висівного апарата

Величина	Позначення	Значення
Кут між поверхнями забірної камери, град.	α	10 - 20
Діаметр вхідного отвору забірної камери, м	$d_{вх}$	0,008
Діаметр вихідного отвору, м	$d_{вих}$	0,008
Висота забірної камери, м	H	0,25
Ширина забірної камери, м	B	0,015
Швидкість на вході забірної камери, м/с	V_0	0,4 - 0,6

На першому етапі чисельного експерименту було визначено векторне поле швидкостей рідини при різному розташуванні вихідного отвору емності гідропневматичного висівного апарата (рис. 3).

Таблиця 2. Рівні варіацій факторами чисельного моделювання

Рівні варіацій факторів	Фактори	
	Кут α , град.	Швидкість V_0 , м/с
Верхній рівень (+)	20	0,6
Основний рівень (0)	15	0,5
Нижній рівень (-)	10	0,4
Інтервал варіацій факторів	5	0,1

Як видно з рис. 3 векторне поле швидкостей рідини є однаковим у збірній камері гідро-пневматичного висівного апарата (на висоті 0,135 м) і відрізняється лише у верхній його частині. Можна стверджувати, що на висоті 0,135 м забірної камери розташування і розмір вихідного отвору не впливають на векторне поле швидкостей.

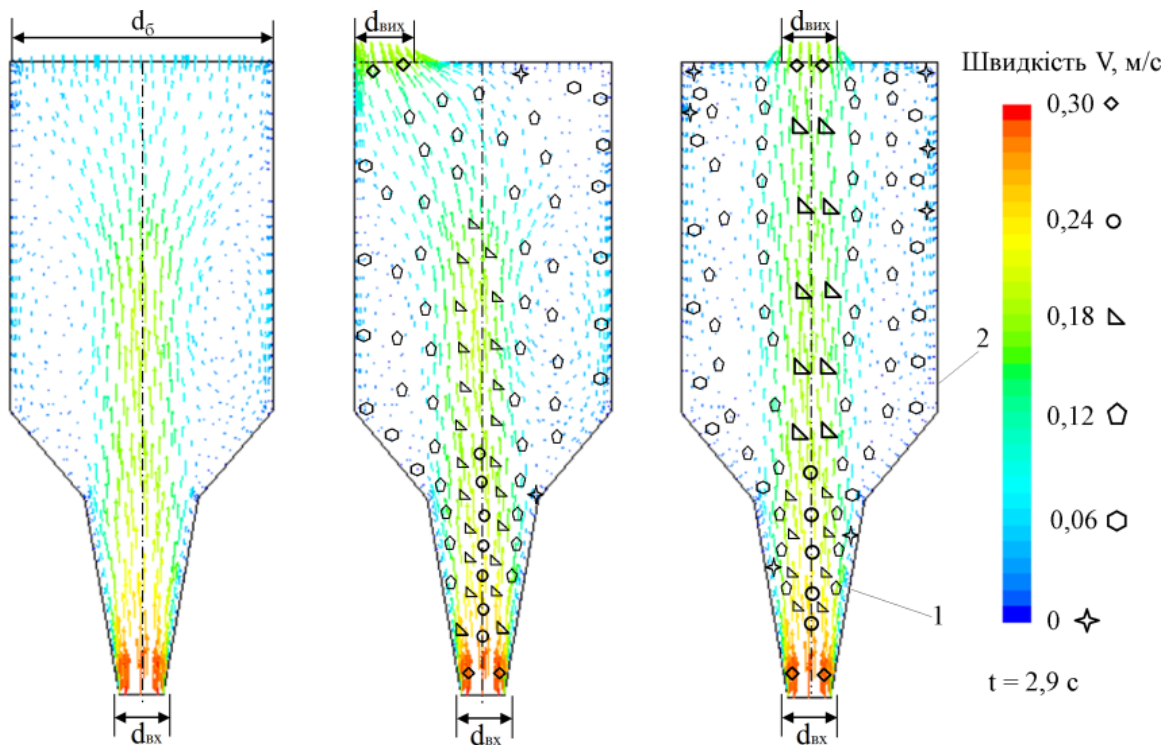


Рис. 3. Векторне поле швидкості рідини при різному розташуванні вихідного отвору: 1 – забірна камера; 2 – бак

Другий етап чисельного моделювання було проведено за повним факторним дослідом із загальною кількістю дослідів – $3^2 = 9$. В результаті моделювання було отримано розподіл швидкостей рідини в забірній камері в залежності від кута між поверхнями забірної камери і швидкості на її вході (рис. 4).

З використанням програмного пакету Mathematica проведено апроксимацію отриманих даних, в результаті якої встановлено рівняння проєкції швидкості рідини на вісь Oy для кожної точки забірної камери гідропневматичного висівного апарата. Узагальнюючи, отримані рівняння можна представити у вигляді:

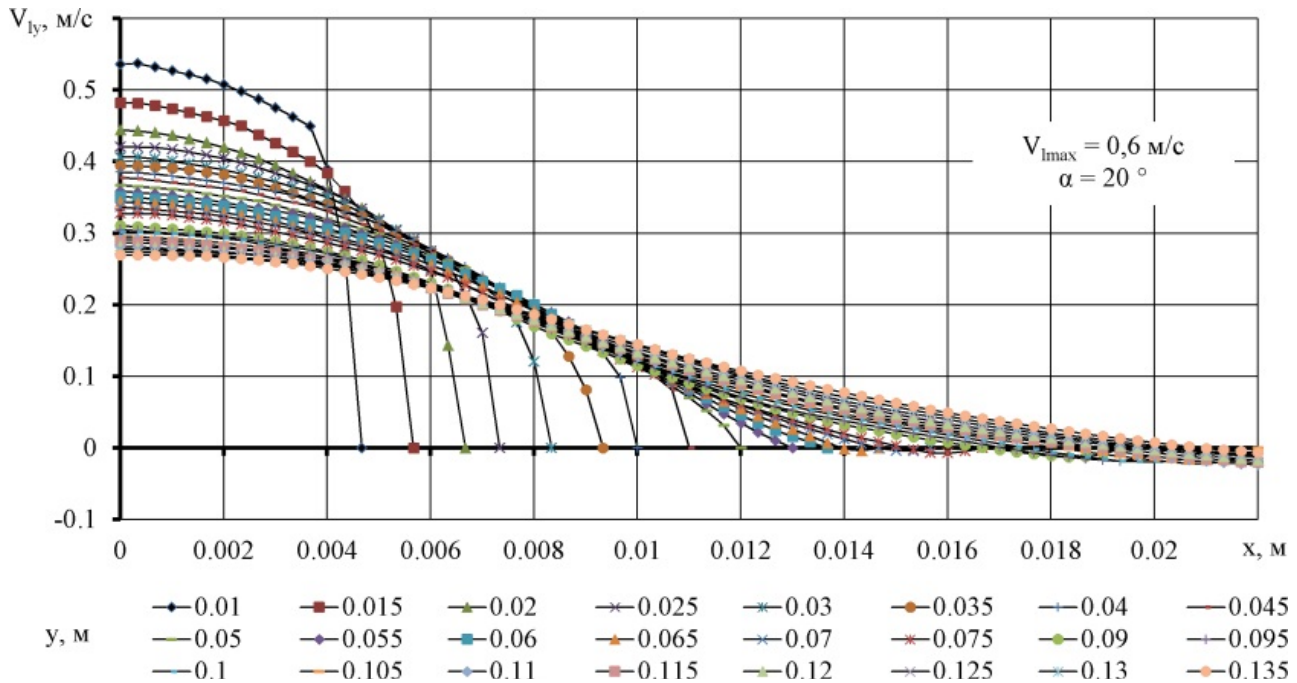


Рис. 4. Розподіл проекції швидкостей рідини на вісь Oy в забірній камері гідропневматичного висівного апарата

$$V_{ly} = a_0 + a_1 x^2 + a_2 x^4 + a_3 y + a_4 x^2 y + a_5 x^4 y, \quad (18)$$

де $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ – коефіцієнти регресії.

Апроксимуючи коефіцієнти регресії $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ для кожного дослідження було виявлено, що вони залежать від факторів чисельного моделювання:

$$\begin{cases} a_0 = V_0, \\ a_i = V_0 \left(b_{i1} + b_{i2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} + b_{i3} \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{\alpha}{2} \right), \end{cases} \quad (19)$$

де b_{i1}, b_{i2}, b_{i3} – коефіцієнти регресії.

Підставляючи (19) в (18) маємо узагальнене рівняння проекції швидкості рідини на вісь Oy для кожної точки забірної камери гідропневматичного висівного апарата:

$$V_{ly} = V_0 \left[1 + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \left(b_{ij} \cdot \operatorname{tg}^{j-1} \frac{\alpha}{2} \right) x^{2i} + y \sum_{i=0}^2 \sum_{j=1}^3 \left(b_{(i+3)j} \cdot \operatorname{tg}^{j-1} \frac{\alpha}{2} \right) x^{2i} \right]. \quad (20)$$

Аналіз рис. 4, і рівняння (20) показує, що із поступовим розширенням забірної камери ближче до границі виникає від'ємне значення проекції швидкості на вертикальну вісь – це свідчить про наявність турбулентної течії пов'язаної з опором рідини, що створюють стінки забірної камери. За умови незначного відхилення щільності насіння і

робочої рідини можна припустити, що насіння в псевдозрідженому шарі буде рухатися за лініями току рідини – підніматися з центру і опускатися по обмежуючих поверхнях камери.

Проведені дослідження на лабораторній установці гідропневматичного висівного апарата доводять адекватність отриманої математичної моделі руху рідини.

Висновок. Отримана математична модель адекватно описує гідродинамічний процес переміщення рідини в ємності координатного гідропневматичного висівного апарата. Результати чисельного моделювання процесу переміщення рідини будуть використані при обґрунтуванні конструктивних та технологічних параметрів висівного апарата.

Література

1. Бойко В.Б. Експериментальне визначення рівномірності висіву насіння гідросівалкою / Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. – Вінниця: ВНАУ. – Вип. 11. Т. 1(65). – 2012. – С. 89 - 94.
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». – Х., 2014. – Вип. 148. – С. 48 - 55.

3. Авраменко М.И. О k-ε модели турбулентности / М.И. Авраменко // VIII Забабахинские научные чтения (5 - 9 сентября 2005 г.) – 2005. – С. 1 - 21.

4. Vikram Roy, Analysis of the Turbulent Fluid Flow in an Axi-symmetric Sudden Expansion / Vikram Roy, Snehamoy Majumder, Dipankar Sanyal // International Journal of Engineering Science and Technology – 2010. – №2 (6). – P. 1569 -1574.

5. Хмельник С.И. Уравнения Навье-Стокса. Существование и метод поиска глобального решения / С.И. Хмельник // Израиль. – 2010. – 106 с.

6. Chen N.H. An Explicit Equation for Friction factor in Pipe / N.H. Chen // Ind. Eng. Chem. Fundam. – 1979. – Vol. 18, No. 3. – P. 296 - 297.

7. Dominik Kubicki, Slurry transport in a pipeline – Comparison of CFD and DEM models / Dominik Kubicki, Simon LO // Ninth International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. CSIRO, Melbourne, Australia (10-12 December 2012) – 2012. – P. 1 - 6.

8. Белов И.А. Моделирование турбулентных течений: Учеб. пособие / И.А. Белов, С.А. Исаев // Балт. гос. техн. ун-т. СПб. – 2001. – 108 с.

9. Sang Won Han, Study on the Particle Removal Efficiency of Multi Inner Stage Cyclone by CFD Simulation / Sang Won Han, Won Joo Lee, Sang Jun Lee // World Academy of Science, Engineering and Technology. – Vol. 6. – 2012. – P. 411 - 415.

Аннотация

Теоретические исследования движения жидкости в емкости гидропневматического высевающего аппарата

В.Б. Бойко, Е.Б. Алиев

В известных гидравлических высевающих аппаратах процесс формирования псевдооживленного слоя обеспечивается механическим способом, происходит перемешивание достаточно значительных объемов жидкости с семенами, что приводит к повышению энергозатрат на привод смесительного устройства. Контакт семян с рабочими элементами мешалок вызывает травмирование пророщенных семян. Устройство координатного гидропневматического аппарата дает возможность устранить указанные недостатки применением гидравлического способа формирования псевдооживленного слоя заданной концентрации семян.

В результате проведенных исследований построена математическая модель движения жидкости в емкости гидропневматического высевающего аппарата с использованием программного пакета STAR-CCM+, который реализовано методом конечных элементов. При этом использовались адаптивные регулярные расчетные сетки с переменным размером ячейки. В качестве модели выбран генератор призматического слоя сетки, генератор многогранных ячеек и генератор поверхностной сетки.

На первом этапе численного эксперимента было определено векторное поле скоростей жидкости при различном расположении выходного отверстия емкости гидропневматического высевающего аппарата.

Второй этап численного моделирования было проведено по полно факторному опыту с общим количеством опытов – $3^2 = 9$. В результате моделирования было получено распределение скоростей жидкости в заборной камере в зависимости от угла между поверхностями заборной камеры и скорости на её входе.

Анализ полученных исследований доказывает, что с постепенным расширением заборной камеры ближе к границе возникает отрицательное значение проекции скорости на вертикальную ось – это свидетельствует о наличии турбулентного течения связанной с сопротивлением жидкости, которое создают стенки заборной камеры. При условии незначительного отклонения плотности семян и рабочей жидкости можно предположить, что семян в псевдооживленном слое будет двигаться по линиям тока жидкости – подниматься из центра и опускаться по стенкам камеры.

Проведены исследования на лабораторной установке гидропневматического высевающего аппарата, доказывают адекватность полученной математической модели движения жидкости.

Ключевые слова: *гидровысев, высевающий аппарат, псевдооживленный слой, турбулентность, коэффициент трения жидкости, текучесть жидкости, емкость.*

Abstract**Theoretical studies of fluid motion in the tank hydropneumatic sowing device****V.B. Boyko, E.B. Aliyev**

In a known hydraulic distributor mechanisms, the process of forming fluidized layer is provided by mechanical means, the mixing of the considerable volumes of liquid with the seeds, resulting in higher energy consumption for the drive of the mixing device. The contact of the seeds with the working elements of the agitators causes the injury of germinated seeds. The hydropneumatic device coordinate device allows to eliminate these drawbacks by use of hydraulic fluidization method of forming a layer of a given concentration of seeds.

As a result of the conducted research, built a mathematical model of fluid motion in the tank hydropneumatic sowing device using the software package STAR-CCM+, which is implemented by finite element method. We used an adaptive regular grid with variable cell size. As the model generator of the prismatic layer grid, the generator of polyhedral cells and the surface mesh generator.

At the first stage of numerical experiment it was determined the vector velocity field of the fluid at different positions of the outlet capacity hydropneumatic sowing device. The second stage of numerical simulation was carried out by full factorial experience with the total number of experiments is – $3^2 = 9$. As a result of modeling were obtained the velocity distribution of the liquid in the intake chamber depending on the angle between the surfaces of the suction chamber and the velocity at its input.

The analysis of the research proves that with the gradual expansion of the suction chamber is closer to the border occurs a negative value of the projection of the velocity on the vertical axis – this indicates the presence of turbulent flow associated with the resistance of the liquid, which creates the wall of the suction chamber. Subject to slight variations in the density of seeds and the working fluid can be assumed that seeds in the fluidized bed will move along the streamlines of the fluid to rise from the center and down the walls of the chamber.

Conducted research in a laboratory setting hydropneumatic sowing device, prove the adequacy of the obtained mathematical model of fluid motion.

Keywords: *hydro seeding, sowing machine, the fluidized bed, turbulence, fluid friction, fluid flow, and capacity.*

Представлено: М.В. Бакум / Presented by: M.V. Bakum

Рецензент: С.И. Корниенко / Reviewer: S.I. Kornienko

Подано до редакції / Received: 18.09.2015