

*Е.В.Штефан*, канд.техн.наук, зав.каф. МіТМ, НУХТ, Київ, Україна  
*Д.В.Риндюк*, НУХТ, Київ, Україна

## **ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ВУЗЛА ПРЕСУВАННЯ ГРАНУЛЯТОРА.**

Представлені основні принципи і методика побудови математичної моделі процесів механічної обробки дисперсних матеріалів. Розглянуто приклад практичного використання розробленої моделі в технології гранулювання біомаси при виробництві паливних гранул. Рис.: 9. Бібліограф.:9.

**Ключові слова:** математичне моделювання, дисперсні матеріали, гранулювання, біомаса, паливні гранули.

**Постановка проблеми в загальному виді і її зв'язок з важливими науковими й практичними завданнями.** Останнім часом у харчовій і переробній промисловості, виникла проблема по раціональному використанню відходів виробництва, таких, як лузга соняшника, солома, пивна дробина, деревна стружка тощо. Доцільно дані відходи використовувати в якості біопалива, комбікормів і т.п. Але, з огляду на невелику насипну густину таких матеріалів, транспортування їх є економічно не вигідним. Це обумовлює збільшення насипної густини цих матеріалів за рахунок пресування (брикетування, тюкування, гранулювання та ін.). Виходячи з аналізу різних технологій пресування, процес гранулювання - найбільш раціональний, оскільки реалізується в безперервному режимі, дозволяє одержати вироби найбільшої густини, а також забезпечує універсальність подальшого використання гранул (біопаливо, комбікорм із різною фракцією). Гранульовані матеріали в порівнянні з насипними мають більшу стійкість при зберіганні, мають кращу однорідність суміші, краще зберігають вітаміни й мікроелементи, менше підпадають під вплив навколишнього середовища й займають в 2-3 рази менший об'єм. Інтенсифікація процесів ущільнення дисперсних матеріалів, що особливо помітна останнім часом при виробництві твердого біопалива, обумовлює усе більш жорсткі вимоги до показників ефективності роботи основних технологічних систем. Тому при проектуванні таких машин і апаратів необхідне визначення взаємозв'язку між конструктивними (розміри робочих зон машин, форма й швидкості руху робочих органів і т.п.) і технологічними (продуктивність машини, тиск, температура, фізико-механічні характеристики оброблюваного матеріалу й т.п.) параметрами. Традиційний підхід до проектування такого типу встаткування заснований на емпіричних залежностях і експериментальному досвіді [1] і не дозволяє дати кількісну оцінку взаємовпливу конструктивно-технологічних параметрів процесів обробки й структурно-механічних характеристик сировини. Тому задача по використанню сучасних методів

математичного моделювання, застосована для процесу гранулювання дисперсних матеріалів екструзією, є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень** в області гранулювання дисперсних матеріалів свідчить, що для ефективного проектування відповідного технологічного обладнання необхідно враховувати структурно-механічні особливості оброблюваних матеріалів і, у першу чергу, такі їх реологічні властивості, як пружність, пластичність, в'язкість. У роботах [2,3] показані принципи побудови математичної моделі процесу гранулювання дисперсних матеріалів екструзією. Для підвищення ефективності практичного використання даної математичної моделі необхідно подальше її вдосконалювання, спрямоване на можливість врахування максимальної кількості конструктивно-технологічних параметрів. З огляду на широку номенклатуру типів сировини, при визначенні конструктивних характеристик відповідного обладнання виникає задача знаходження взаємозв'язку між основними конструктивно-технологічними параметрами конкретного вузла пресування.

**Метою даної роботи** є розробка інформаційної технології проектування (ІТП) обладнання для обробки дисперсних матеріалів екструзією та використання розробленої ІТП при проектуванні вузла пресування гранулятора в технології гранулювання біомаси при виробництві паливних гранул.

**Представлено** ІТП типу [2]: “математична модель - інтелектуальна експертна система – система автоматизованого проектування”, яку схематично представимо на рис.1. ІТП розглядає технологічний процес екструзії у вигляді мультикомпонентної системи взаємозв'язаних об'єктів досліджень: сировинної маси, елементів технологічного обладнання, механічного навантаження та ін.

При розгляданні конкретної переробної технології використовується концепція представлення дисперсних мас як двохфазних сумішей пористої або зернистої твердої деформованої структури з рідиною або газом. Для опису поведінки дисперсної маси використані поняття напружень, деформацій, щільності, а також швидкості зміни цих параметрів.

Рух та деформування дисперсного матеріалу в умовах механічного навантаження описуються рівняннями збереження кількості руху в макрокоординатах, що аналогічні [4,5] для:

а) твердої фази

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_1 \rho_1 \mathbf{u}) + \text{grad}(\alpha_1 \rho_1 \mathbf{u} \times \mathbf{u}) - \text{grad}(\alpha_1 \boldsymbol{\sigma}) - \mathbf{F}_1 - \mathbf{F}^{(1)} = 0 ; \quad (1)$$

б) газорідкої фази

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_2 \rho_2 \mathbf{v}) + \text{grad}(\alpha_2 \rho_2 \mathbf{v} \times \mathbf{v}) - \text{grad}(\alpha_2 \mathbf{P}) - \mathbf{F}_2 + \mathbf{F}^{(2)} = \mathbf{0} , \quad (2)$$

де  $\alpha_1, \alpha_2$  – об'ємні вмісти відповідно твердої та газорідкої фаз;  $\rho_1, \rho_2$  – відповідні середні густини фаз;  $\mathbf{u}, \mathbf{v}$  – вектори середньої швидкості зміщення відповідно твердих часток і рідини;  $\mathbf{P}$  – гідростатичний тиск у газорідкій фазі;  $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2$  – вектори об'ємних сил відповідно у твердій і рідкій фазах;  $\boldsymbol{\sigma}$  – тензор напружень у твердій фазі;  $\mathbf{F}^{(1)}, \mathbf{F}^{(2)}$  – сили міжфазної взаємодії.

Внаслідок рівності  $\mathbf{Pn} = -\boldsymbol{\sigma n}$ , в точках внутрішніх поверхонь поділу газорідкої і твердої фаз ( $\mathbf{n}$  – вектор нормалі до поверхні розділу) виконується умова:

$$\mathbf{F}^{(2)} = \mathbf{F}^{(1)} = \mathbf{F}^0 \quad (3)$$

Формальне складання рівнянь (1) і (2) описує, очевидно, збереження кількості руху у всіх макроточках дисперсного середовища:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_1 \rho_1 \mathbf{u} + \alpha_2 \rho_2 \mathbf{v}) + \text{grad}(\alpha_1 \rho_1 \mathbf{u} \times \mathbf{u} + \alpha_2 \rho_2 \mathbf{v} \times \mathbf{v}) - \\ - \text{grad}(\alpha_1 \boldsymbol{\sigma} + \alpha_2 \mathbf{P}) - \alpha_2 \mu \nabla^2 \mathbf{v} - \mathbf{F}_1 - \mathbf{F}_2 = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Однак у практичних розрахунках зручніше розглядати балансні рівняння кількості руху окремо – у формах рівнянь відносного руху газорідкої і твердої фаз.

Якщо задати силу міжфазної взаємодії у формі

$$\mathbf{F}^0 = \mathbf{F}^{(1)} = \mathbf{F}^{(2)} = \mathbf{R} + \mathbf{P} \text{grad} \alpha_2 \quad (5)$$

і врахувати, що  $\alpha_1 = 1 - \alpha_2$ , то рівняння відносного руху твердої фази набуде вигляду

$$\alpha_1 \left( \rho_1 \frac{d\mathbf{u}}{dt} - \rho_2 \frac{d\mathbf{v}}{dt} \right) - \text{grad} \boldsymbol{\sigma}^f - \frac{\mathbf{R}}{\alpha_2} - \alpha_1 (\rho_1 - \rho_2) \mathbf{G} = 0 , \quad (6)$$

де

$$\mathbf{R} = \frac{\mu}{a^2} \alpha_1 \alpha_2 (\mathbf{v} - \mathbf{u}) \quad - \text{ефективна сила в'язкого опору ; } \mu \text{ коефіцієнт}$$

в'язкості рідкої фази;  $a$  – коефіцієнт міжфазного тертя .

Рівняння відносного руху рідкої фази можна зобразити у формі

$$\rho_2 \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\text{grad} \mathbf{P} - \frac{\mathbf{R}}{\alpha_2} + \rho_2 \mathbf{G} , \quad (7)$$

де  $\mathbf{G}$  – вектор прискорення вільного падіння.

Значимо, що для процесів, які проходять повільно, (немає інерційних ефектів:

$$\rho_2 \frac{d\mathbf{v}}{dt} = 0; \quad \rho_2 \mathbf{G} = 0 ) , \text{ рівняння (7) відображає закон фільтрації в ізотропному}$$

пористому середовищі:

$$\mathbf{v} - \mathbf{u} = -\frac{a^2}{\mu\alpha_1} \text{grad}P \quad (8)$$

Як показують експериментальні дослідження, при невеликих градієнтах тиску або швидкостях фільтрації виконується лінійний закон Дарсі:

$$\mathbf{v} - \mathbf{u} = -\frac{k^p}{\alpha_1} \text{grad}P, \quad (9)$$

де  $k^p$  – коефіцієнт проникності середовища.

Щоб замкнути отриману систему рівнянь (1) – (9), треба сформулювати режим деформування твердої фази (визначальні співвідношення) та відповідні режими просторово-часової зміни граничних умов. Визначальні співвідношення приймаємо в рамках реологічної моделі пружно-в'язко-пластичного тіла. При цьому врахування деформування рідкої фази здійснюємо завданням кінетики зміни об'ємних вмістів фаз, зумовлених фільтраційним механізмом (7).

Алгоритмічна модель складається із наступних основних частин:

- розв'язок сформульованої задачі оснований на принципі розкріплення проєкційно-сітковими методами: скінчених елементів по просторовим змінним та скінчених різниць за часовим аргументом.

- обчислювальні алгоритми, які реалізують найбільш типові реологічні процеси екструзії дисперсних систем.

Розроблені алгоритми реалізовані у вигляді програмного обчислювального комплексу “PLAST-GRN” (цифрова модель) [5]. Програмний комплекс призначений для моделювання нерівноважних процесів деформування дисперсних двофазних структур при заданому технологічному режимі їх оброблення.

У межах розробленої ІПП розглянуто процес гранулювання дисперсних мас екструзією з метою виробництва паливних гранул [6].

Основний вплив на процес гранулювання має конструкція гранулятора (особливо профіль отворів у матриці вузла гранулювання) [7,8] і реологія речовини [9,10], що гранулюється.

Розглянуто одну з типових конструктивних схем гранулювання, у якій пресуючий ролик розташований всередині кільцевої матриці ( рис. 2.)

Для прийнятої конструктивної схеми гранулятора можна виділити наступні основні параметри, які визначають протікання процесу: геометричні розміри роликів і матриці, геометричні розміри отворів у матриці, шорсткість поверхні отворів, частота обертання матриці гранулятора, тиск при екструзії крізь отвір, реологічні властивості сировини, продуктивність і якість готової продукції.

Ключова технологічна операція відбувається в пресуючому вузлі гранулятора - це операція гранулювання екструзією сировини через отвори в матриці. На рис. 4. представлені розрахункові схеми процесу гранулювання екструзією.

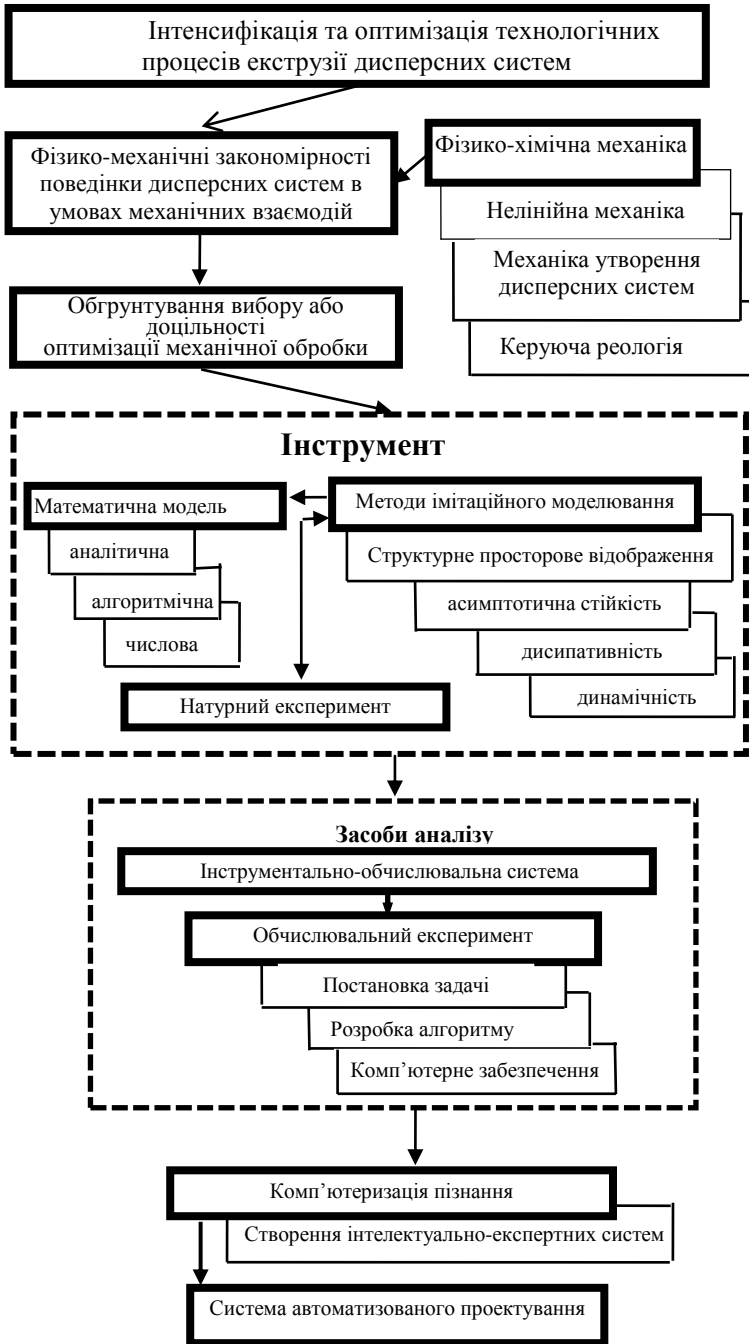


Рис. 1. Схема ІТП

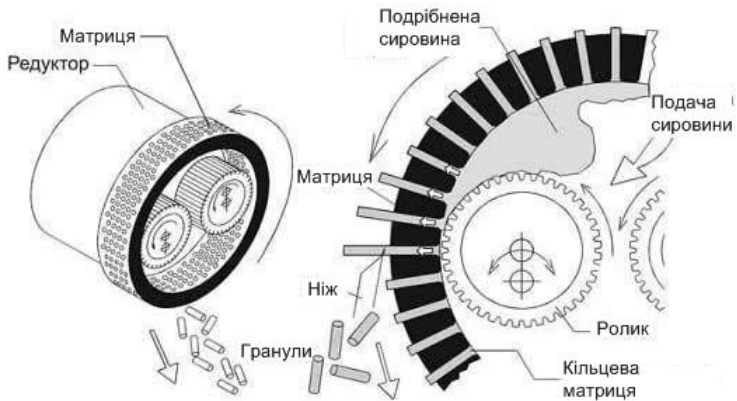


Рис. 2. Вузол пресування гранулятора з кільцевою матрицею.

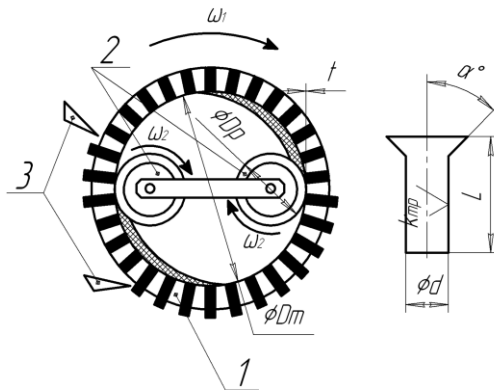


Рис. 3. Схема роботи вузла пресування (1- кільцева матриця с отворами; 2- пресуючий ролик; 3- ніж)

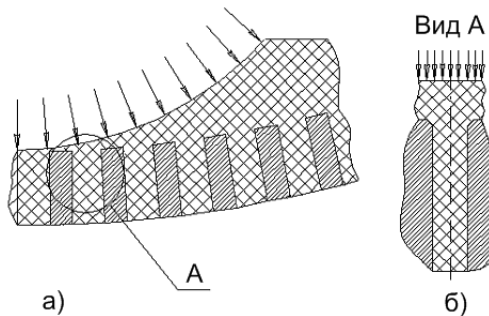


Рис. 4. Розрахункові схеми процесу гранулювання екструзією.

Перша розрахункова схема рис. 4. (а) представляє собою частину матриці гранулятора з отворами, сировина обмежена в верхній частині пресуючим роликом. Схема враховує геометрію як матриці гранулятора (її діаметр, та відстань між отворами) так і діаметр пресуючого ролика і відстань (зазор) між матрицею гранулятора та пресуючим роликом.

Друга розрахункова схема рис. 4. (б) – канал в матриці гранулятора. В схемі враховано геометричні розміри каналу: довжину, діаметр, величину фаски.

В даному дослідженні нас цікавлять процеси які відбуваються безпосередньо під час екструзування сировини, тобто нас насамперед цікавить поведінка сировини в отворах матриці гранулятора. Виникає питання: який отвір в певний момент часу потрібно розглянути, де найбільш інтенсивно відбувається пресування сировини?

Для знаходження такого отвору були проведені розрахунки (розрахункова схема рис. 4.а.), в результаті яких отримано діаграми, що дають можливість визначити потрібний нам отвір. Як видно з діаграм розподілу переміщень по осі Y та X найбільші переміщення ми можемо простежити в отворі 3 та 4 ( рис. 6.)

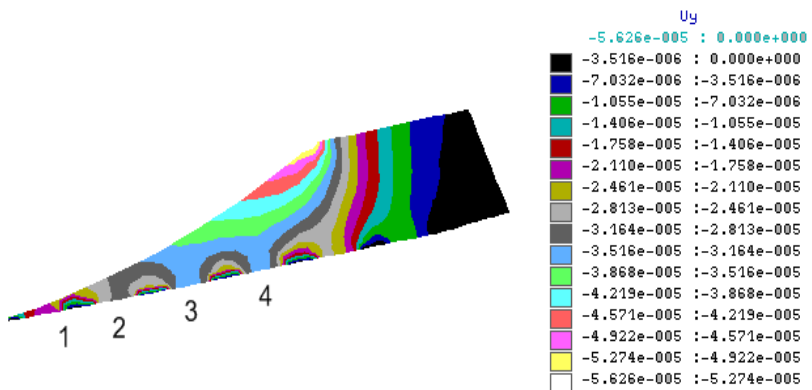


Рис. 5. Діаграма розподілу переміщень по осі Y.

Діаграма розподілу тиску (рис. 6.) дає можливість визначити тиски які діють в області, що нас цікавить. Дані отримані при обчисленні першої моделі використані при побудові наступної моделі (розрахункова схема рис. 4.б).

В даному випадку нас цікавить поведінка сировини в отворі матриці, що дасть можливість визначити залежності між геометрією отворів і поведінкою сировини при гранулюванні.

Приклад отриманих результатів чисельного моделювання процесу екструзії матеріалу скрізь отвори матриці представлений на рис.7 та 8.

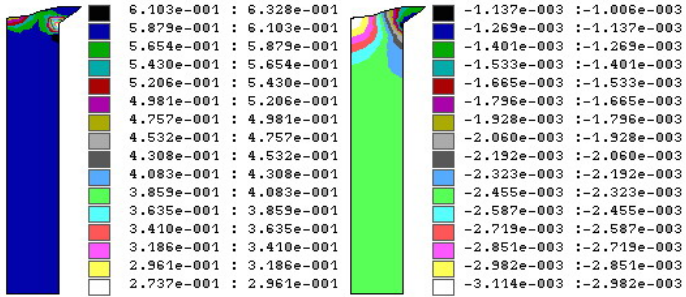


Рис.6. Розподілення а) перемішень (м) та б) пористості в об'ємі дисперсного матеріалу.

Відповідно до отриманих даних побудовано графіки залежності густини гранул та продуктивності гранулятора від основних конструктивно-технологічних параметрів вузла пресування гранулятора (рис.9).

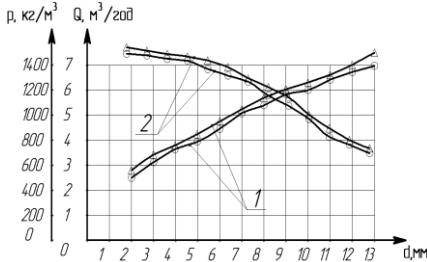


Рис. 7.а. Графіки залежності продуктивності (1) та густини (2) від діаметра каналу  $d$  для деревної стружки ( $\blacktriangle$ ) та лузги соняшника ( $\bullet$ ).

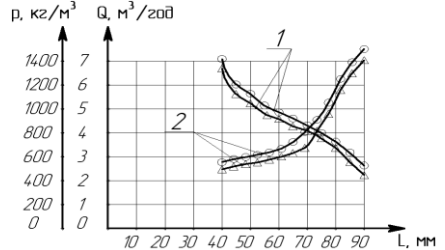


Рис. 7.б. Графіки залежності продуктивності (1) та густини (2) від довжини каналу  $L$  для деревної стружки ( $\blacktriangle$ ) та лузги соняшника ( $\bullet$ ).

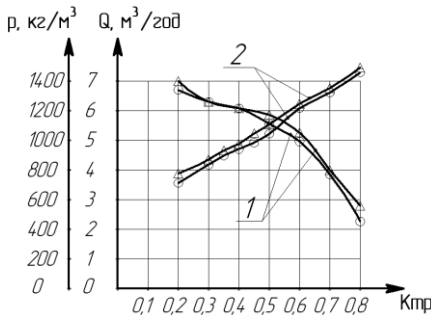


Рис. 7.в. Графіки залежності продуктивності (1) та густини (2) від коеф. тертя між сировиною та поверхнею каналу для деревної стружки ( $\blacktriangle$ ) та лузги соняшника ( $\bullet$ ).

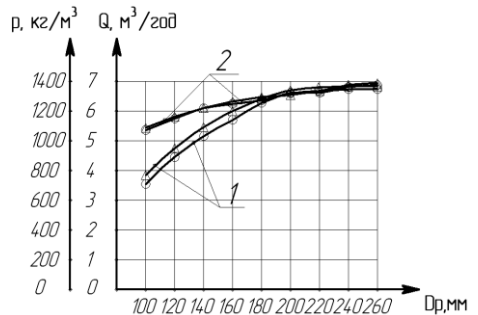


Рис. 7.г. Графіки залежності продуктивності (1) та густини (2) від діаметра ролика  $D$  для деревної стружки ( $\blacktriangle$ ) та лузги соняшника ( $\bullet$ ).

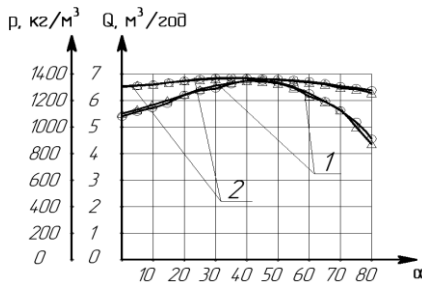


Рис. 7.д. Графіки залежності продуктивності (1) та густини (2) від кута фаски каналу  $\alpha$  для деревної стружки ( $\blacktriangle$ ) та лузги соняшника ( $\bullet$ ).

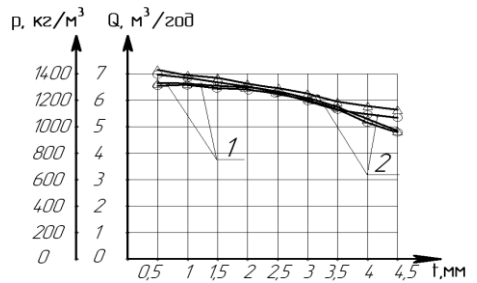


Рис. 7.е. Графіки залежності продуктивності (1) та густини (2) від зазору  $t$  між роликотом та матрицею для деревної стружки ( $\blacktriangle$ ) та лузги соняшника ( $\bullet$ ).

**Висновки:** Отже розроблена математична модель дає можливість визначити взаємозалежності між основними конструктивно-технологічними параметрами прес-гранулятора з урахуванням типу сировини. Отримані результати доцільно використати в якості рекомендацій при проектуванні грануляційного обладнання.

**Список літератури:** 1. Штефан Є.В. Моделирование поведения дисперсных систем у нерівноважних процесах харчових виробництв//Наукові праці УДУХТ,2000,- № 8, с.63-66. 2.Штефан Є.В. Информационная технология проектирования технологического оборудования для механической обработки дисперсных материалов// Межд.период.сб. науч.тр. «Обработка дисперсных материалов и сред. Теория, исследования, технологии, оборудование».Выпуск №12.-Одесса: НПО «ВОТУМ»,2002.-с.72-78. 3. Механика насыщенных пористых сред/ Николаевский В.Н., Басинев К.С., Горбунов А.Т., Зотов Г.А.-М.:Недра, 1970.-339с. 4. Нигматуллин Р.И. Методы механики сплошной среды для описания многофазных смесей// ПММ, т.34, №6, 1999, с.1097-1112. 5. Штефан Е.В., Блаженко С.И. Построение аналитической модели процессов деформирования дисперсных материалов // Межд.период.сб. науч. тр. Обработка дисперсных материалов и сред. Теория, исследование, технология, оборудование. Выпуск №13.-Одесса: НПО «ВОТУМ», 2003.-с.26-33. 6. Риндюк Д.В., Штефан Є.В. Розробка метода визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів преса-гранулятора // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій / Міністерство освіти і науки України.-Одеса: 2006.-Вип.28.-Т.2, с.202-205. 7. Патент на корисну модель № 30058 МПК(2006), В01J2/00 Спосіб визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів преса-гранулятора //Штефан Є.В., Риндюк Д.В., зареєстровано 11.02.2008. 8. Штефан Є.В., Засць Ю.О., Риндюк Д.В. Визначення конструктивно-технологічних параметрів процесів переробки харчових матеріалів холодною екструзією/ Комбiкормова промисловiсть України. №5(18),2006,с.16-20. 9. Штефан Є.В., Риндюк Д.В. Використання методів математичного моделювання для проектування вузлів преса-гранулятора, “Механiка та iнформатика” Збiрник наукових праць молодих вчених, Хмельницький ХНУ 2005 -С.172-175. 10. Валентас К.Д. Пищевая инженерия: справочник с примерами расчетов: Пер.с англ./К.Д. Валентас, Є. Рогштейн, Р.П. Сингх. – С.Пб.: Профессия, 2004.-848с. 11. Фенсел Д., Вегенер Г. Древесина : Перевод с английского А.В. Оболенской и З.П. Ельницкой. Под редакцией доктора технических наук, профессора А.А. Леоновича, МОСКВА "ЛЕСНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ", 1988.-540с.

УДК 669.01: 621.9

**Использование математического моделирования при проектировании узла прессования гранулятора/ Штефан Е. В., Риндюк Д. В.**

Представлены основные принципы и методика построения математической модели процессов механической обработки дисперсных материалов. Рассмотрен пример практического использования разработанной модели в технологии гранулирования биомассы при производстве топливных гранул. Рис.: 9. Библиограф.:9.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, дисперсные материалы, биомасса, гранулирование, топливные гранулы.

*Поступила в редколлегию 1.06.10*