

Е.В. ШТЕФАН, канд. техн. наук, зав. каф. МіТМ, НУХТ (м. Київ),
Д.В. РИНДЮК, асистент НУХТ (м. Київ)

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. Лл.: 6. Бібліогр.:17 назв.

Ключові слова: математичне моделювання, дисперсні матеріали, гранулювання біомаси, 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 виробу 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 [2, 3, 4] і, у першу чергу, такі їх реологічні властивості, як пружність, пластичність, в'язкість [5, 6, 7]. У роботах [8, 9] показані принципи побудови математичної моделі процесу пресування дисперсних матеріалів. 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 створенні вузла пресування гранулятора в технології гранулювання біомаси при виробництві паливних гранул.

Представлено ІТП типу [10]: "математична модель – інтелектуальна експертна система – система автоматизованого проектування", яка схематично наведена на рис. 1. ІТП розглядає технологічний процес грануляції 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 по аналогії з [9] описуються рівняннями збереження кількості руху в макро-координатах для:

а) твердої фази

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

б) газорідкої фази

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



Рис. 1. Схема інформаційної технології проектування

де α_1, α_2 – об'ємні вмісти відповідно твердої та газорідкої фаз; ρ_1, ρ_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; σ – тензор напружень у твердій фазі; $\mathbf{F}^{(1)}, \mathbf{F}^{(2)}$ – сили міжфазної взаємодії.

Внаслідок рівності $\mathbf{P}\mathbf{n} = -\sigma\mathbf{n}$, 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:

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

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

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

де $\mathbf{R} = \frac{\mu}{a^2} \alpha_1 \alpha_2 (\mathbf{v} - \mathbf{u})$ – ефективна сила в'язкого опору; μ – 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, (інерційних ефектів: $\rho_2 \frac{d\mathbf{v}}{dt} = 0$; $\rho_2\mathbf{G} = 0$), рівняння (7) відображає закон фільтрації в ізотропному пористому середовищі:

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

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

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

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 фільтраційний механізмом (7). Граничні умови відображають конструктивно-технологічні особливості взаємодії елементів технологічного обладнання з дисперсним матеріалом, що обробляється.

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 цифрової моделі – програмного обчислювального комплексу "PLAST-GRN-002" [11]. Програмний комплекс призначений для моделювання нерівноважних процесів деформування дисперсних двофазних структур при заданому технологічному режимі їх оброблення.

У межах розробленої ІТП розглянуто процес гранулювання дисперсних матеріалів екструзією з метою виробництва паливних гранул [12].

Основний вплив на процес гранулювання має конструкція гранулятора (особливо профіль отворів у матриці вузла гранулювання) [13, 14] і реологія матеріалу [15, 16], 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, що відбувається в пресуючому вузлі гранулятора – це операція гранулювання екструзією сировини через отвори в матриці (рис. 3.). На рис. 3. схематично наведена схема нагнітання сировини двома роликами у отвори матриці з заданими геометричними параметрами d , D_p , D_m , L , α . На рис. 4 представлені відповідні розрахункові схеми процесу гранулювання екструзією. Перша розрахункова схема (рис. 4а) 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 роликом.

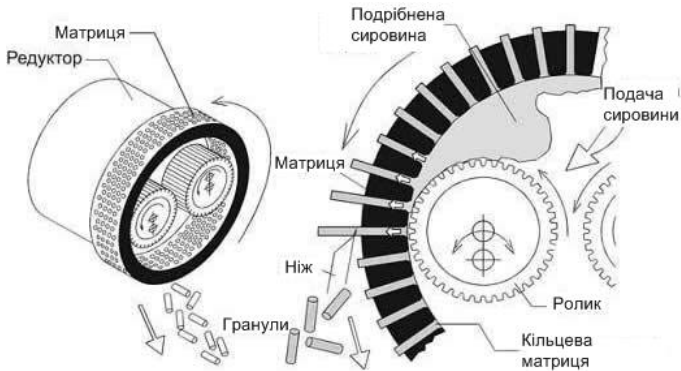


Рис. 2. Вузол пресування гранулятора з кільцевою матрицею

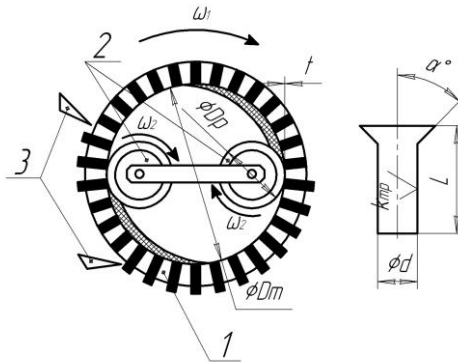


Рис. 3. Схема роботи вузла пресування, де ω_1 , ω_2 – кутова швидкість обертання матриці та ролика відповідно, D_p та D_m – діаметр матриці та ролика, t – зазор між роликом та матрицею, L – довжина отвору в матриці, d – діаметр отвору в матриці, α – кут нахилу фаски отвору (1 – кільцева матриця с отворами; 2 – пресуючий ролик; 3 – ніж)

Друга розрахункова схема (рис. 4б) призначена для моделювання процесу екструзії матеріалу в каналі матриці гранулятора. В схемі згідно рис. 3 враховані геометричні розміри каналу: довжину, діаметр, величину фаски та ін.

Використання першої розрахункової схеми (рис. 4а) дозволяє дослідити особливості поведінки матеріалу у прошарку між роликом та матрицею. Аналіз результатів обчислювальних експериментів, що проведені на основі

цієї розрахункової схеми, дозволили визначити отвори матриці, в яких відбувається найбільш інтенсивне пресування матеріалу (рис. 5). З рис. 5 видно, що в отворах 3 та 4 мають місце найбільші (у порівнянні з іншими) переміщення часток матеріалу. Моделювання руху дисперсного матеріалу скрізь ці отвори проводили з використанням другої розрахункової схеми (рис. 4б). При цьому результати попередніх розрахунків використані у якості початкових умов навантаження на матеріал у відповідному отворі.

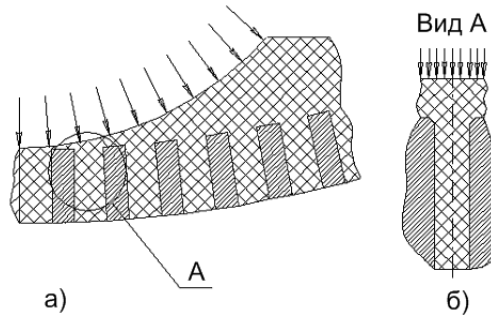


Рис. 4. Розрахункові схеми процесу гранулювання: а) – нагнітання матеріалу роликом до отворів матриці, б) – екструзії матеріалу скрізь отвір матриці

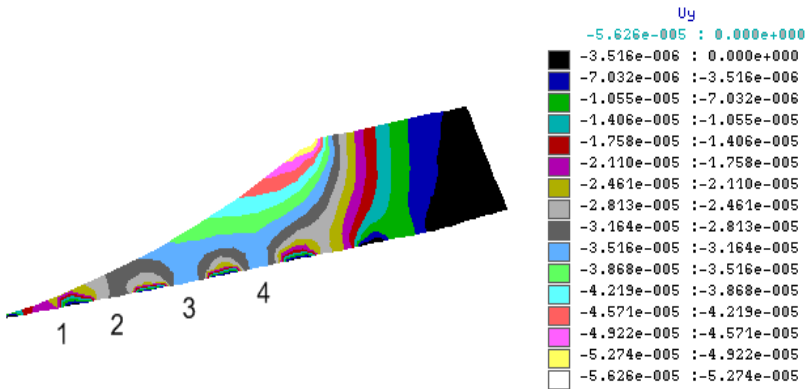


Рис. 5. Діаграма розподілу переміщень по осі Y.

Аналіз та оброблення результатів проведеного комплексу обчислювальних експериментів дозволив побудувати графічні залежності густини гранул та продуктивності гранулятора від основних конструктивно-технологічних параметрів вузла пресування гранулятора, частина з яких наведена на рис. 6.

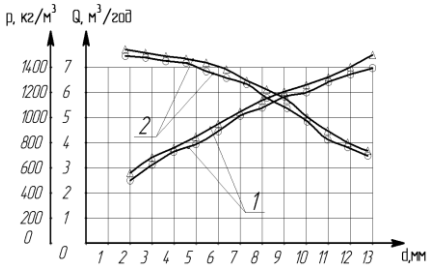


Рис. 6а. Графіки залежності продуктивності (1) та густини (2) від діаметра каналу d для деревної стружки (▲) та лузги соняшника (●)

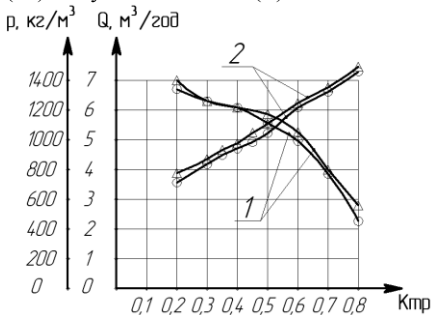


Рис. 6в. Графіки залежності продуктивності (1) та густини (2) від коеф. тертя між сировиною та поверхнею каналу для деревної стружки (▲) та лузги соняшника (●)

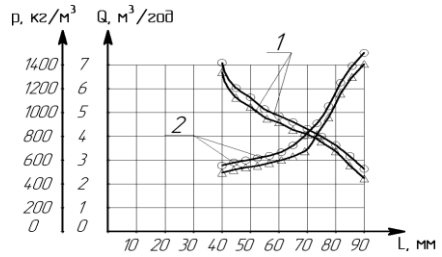


Рис. 6б. Графіки залежності продуктивності (1) та густини (2) від довжини каналу L для деревної стружки (▲) та лузги соняшника (●)

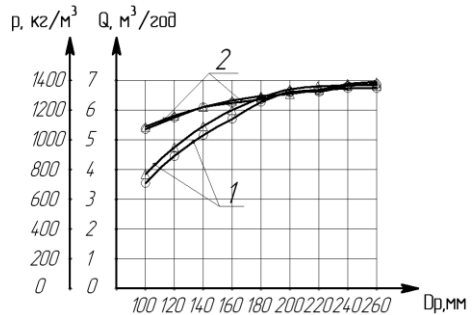


Рис. 6г. Графіки залежності продуктивності (1) та густини (2) від діаметра ролика D_p для деревної стружки (▲) та лузги соняшника (●)

Аналіз отриманих залежностей показав наступне: зменшення діаметру каналу в матриці та зазору між роликом та матрицею позитивно впливає на густину отриманих гранул; збільшення довжини каналів в матриці, діаметра пресуючого ролика та коефіцієнта тертя між сировиною та поверхнею каналу підвищує густину гранули; найбільша густина гранули досягається при використанні матриць з кутом нахилу фаски отворів $\alpha = 45^\circ$.

Адекватність запропонованої математичної моделі визначається коректністю побудови відповідних скінчено-елементних моделей і досконалістю аналітичної та алгоритмічної моделей. Оцінка точності результатів моделювання була проведена шляхом зрівняння отриманих розв'язків з даними натурних експериментів на фізичних моделях [17].

Висновки. Розроблена математична модель дає можливість визначити взаємозалежності між основними конструктивно-технологічними параметрами прес-гранулятора з урахуванням структурно-механічних характеристик

сировини. Отримані результати доцільно використати в якості рекомендацій при проектуванні грануляційного обладнання.

Список літератури: 1. *Штефан Є.В.* Моделювання поведінки дисперсних систем у нерівноважних процесах харчових виробництв / *Є.В. Штефан* // Наукові праці УДУХТ. – 2000. – № 8. – С. 63-66. 2. *Классен П.В.* Гранулирование / *П.В. Классен, И.Г. Гришаев, И.П. Шомин.* – М.: Химия, 1991. – 240 с. 3. *Генералов М.Б.* Расчет оборудования для гранулирования минеральных удобрений / *М.Б. Генералов.* – М.: Машиностроение, 1984. – 192 с. 4. *Борисов В.М.* // ЖПХ. – 1987. – Т. LX. – № 2. – С. 613-619. 5. *Шомин И.П.* Исследование параметров работы валковых прессов для производства гранулированных удобрений: Дисс. ... канд-та техн. наук. – М.: МИХМ, 1985. – 156 с. 6. *Геладзе Л.Б.* Разработка способов улучшения качества гранул фосфорсодержащих удобрений на основе изучения физико-химических условий их получения: Дисс. ... канд-та техн. наук. – М.: НИУИФ, 1989. – 188 с. 7. *Гузъ М.А.* Разработка метода расчета высокоскоростного гранулятора окатышной для мелкодисперсных материалов: Дисс. ... канд-та техн. наук. – М.: МИХМ, 1982. – 206 с. 8. *Николаевский В.Н.* Механика насыщенных пористых сред / *В.Н. Николаевский, К.С. Басинев, А.Т. Горбунов, Г.А. Зотов.* – М.: Недра, 1970. – 339 с. 9. *Низматулин Р.И.* Методы механики сплошной среды для описания многофазных смесей / *Р.И. Низматулин* // ПММ. – 1999. – Т. 34. – № 6. – С. 1097-1112. 10. *Штефан Є.В.* Информационная технология проектирования технологического оборудования для механической обработки дисперсных материалов / *Є.В. Штефан* // Межд. период. сб. науч. тр. "Обработка дисперсных материалов и сред. Теория, исследования, технологии, оборудование". – Вып. 12. – Одесса: НПО "ВОТУМ", 2002. – С. 72-78. 11. *Штефан Є.В.* Математическое моделирование процессов механической обработки дисперсных материалов / *Є.В. Штефан* // Вісник НТУ "ХПТ". Тематичний випуск "Хімія, хімічна технологія та екологія". – Харків: НТУ "ХПТ". – 2009. – № 25. – С. 23-28. 12. *Риндюк Д.В.* Розробка метода визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів преса-гранулятора / *Д.В. Риндюк, Є.В. Штефан* // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій // Міністерство освіти і науки України. – Одеса: 2006. – Вип. 28. – Т. 2. – С. 202-205. 13. *Штефан Є.В.* Патент на корисну модель № 30058. – МПК (2006). – В01J2/00 Спосіб визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів преса-гранулятора // *Є.В. Штефан, Д.В. Риндюк* – Зареєстровано 11.02.2008. 14. *Штефан Є.В.* Визначення конструктивно-технологічних параметрів процесів переробки харчових матеріалів холодною екструзією / *Є.В. Штефан, Ю.О. Засць, Д.В. Риндюк* // Комбікормова промисловість України. – № 5 (18). – 2006. – С. 16-20. 15. *Валентас К.Д.* Пищевая инженерия: справочник с примерами расчетов / *К.Д. Валентас, Є. Ротштейн, Р.П. Синх.* – С.Пб.: Профессия, 2004. – 848 с. 16. *Фенгел Д.* Древесина. Под редакцией доктора технических наук, проф. А.А. Леоновича / *Д. Фенгел, Г. Вегенер.* – М.: "Лесная промышленность", 1988. – 540 с. 17. *Штефан Е.В.* Розрахунково-експериментальні дослідження процесу коекструзії гістофаршевого джгута / *Е.В. Штефан, Л.М. Мізнік.* – Наукові праці НУХТ. – 2008. – № 25. – С. 81-83.

Стаття представлена зав. каф. енерго- та ресурсоощадних технологій Національного університету харчових технологій д.т.н., проф. Серегінім О.О.

УДК 669.01: 621.9

Использование математического моделирования при проектировании узла прессования гранулятора/ Штефан Е. В., Риндюк Д. В. // Вестник НТУ "ХПИ". Тематический выпуск: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2010. – № 31. – С. 191 – 200.

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. Ил.: 6. Библиогр.: 17 назв.

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

UDK 669.01: 621.9

Mathematical modeling using for pelletizing pressure equipment design / Shtefan E.V., Rindjuk D.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2010. – №. 31. – P. 191 – 200.

The main principles and technique of mathematical model construction of disperse materials processes of machining are presented. The example of developed model practical using in pelletizing biomass technology by manufacture of fuel granules is considered. Figs.: 6. Refs.: 17 titles.

Keywords: mathematical modeling, disperse materials, pelletizing biomass, fuel granules.

Поступила в редколегію 01.10.2009