

УДК 662.636/658.562.3.055:001.8

## **ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ГРАНУЛЮВАННЯ БІОМАСИ НА ПАЛИВО**

**В.О. Дубровін**, докт. техн. наук, проф.,

**О.І. Єременко**, канд. техн. наук, доцент,

**С.М. Виговський**, інж.,

**В.Ю. Дженджера**, магістрант

*НУБіП України;*

**В.О. Лук'янець**, ст. наук. співроб.

*ННЦ «ІМЕСГ»*

*Проведений аналіз процесу гранулювання біомаси у паливні виробі. Визначені техніко-технологічні передумови отримання біопаливних гранул у матричному пресі.*

***Ключові слова:** біомаса, гранулювання, екструзія, передумови, методика, параметри.*

**Проблема.** Біологічні гранули для енергетичного використання отримують з побічних матеріалів і відходів аграрних, переробних, лісозаготівельних, деревообробних та ін. виробництв, а також з біомаси енергетичних насаджень. Розвинуті країни світу на сучасному етапі поновлюють свої паливно-енергетичні ресурси, переходячи на тверді біопалива, як на економічно вигідний та екологічно доцільний вид енергетики. Твердопаливні виробі набувають усе більшого поширення і за прогнозами фахівців щорічний світовий обсяг застосування біопаливних гранул у найближчі десять років збільшиться у три рази і досягне 50 млн. т [1-5]. Разом з цим, проблемним залишається питання щодо методичних положень і механіко-технологічних основ процесу гранулювання вторинної біомаси у паливні виробі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Гранулювання — це процес ущільнення сипкого матеріалу (біосировини) в технологічному каналі. Біомаса продавлюється крізь радіальні отвори (філь'єри) матриці з метою утворення паливних гранул (пелет) — виробів однакової циліндричної форми. Процес

гранулювання біомаси у пелети відповідає вимогам виконання процесу **сухої екструзії** [1, 3, 7]. Пелети мають бути міцними, щоб не руйнуватися під час зберігання, транспортування і використання в опалювальних установках. Біосировина під час гранулювання є суцільною реологічною системою, яка передбачає можливість часткового відновлення форми і розмірів тіла після зняття навантаження. Ці властивості біомаси відображають модуль спресованості, який характеризує здатність матеріалу до ущільнення і залежить від виду, структури та розміру сировинних частинок [1, 4, 6-9].

Процес гранулювання біомаси визначають умови його проведення. Щільність біопаливних гранул як виробів становить 1120...1700 кг/м<sup>3</sup>, що дає можливість ефективно зберігати і транспортувати цю продукцію на великі відстані. Теплота згорання гранул дорівнює 16...19 МДж/кг, що не поступається бурому вугіллю. Невеликі розміри і однорідна консистенція гранул сприяють ефективному переміщенню пневмомеханічними транспортними установками і самопливом, підвищують точність дозування. Це дає можливість застосовувати гранули в автоматичних котельних системах комбінованого виробництва тепла і електроенергії. Пелети не сприйнятливі до самозаймання, не викликають алергічну реакцію у людей, оскільки не містять пилу і спор [2, 4, 5].

Конструкції робочих органів прес-грануляторів поділяють на такі основні групи: поршневі, рулонні, транспортерні, шнекові (екструдери), вальцові і матричні. Пресувальні вузли для виробництва пелет мають круглу (кільцеву чи циліндричну) або плоску матрицю з рифленими валиками (роликами). Ролики створюють по поверхні матриці контактну напругу ущільнення біомаси і продавлюють її крізь технологічні отвори матриці — філь'єри під тиском до 30 МПа [1, 3, 7, 8]. У грануляторах з кільцевою матрицею біомаса продавлюється крізь отвори, розміщені на циліндричній поверхні. Збільшувати розміри гранул, окрім зміни параметрів пресувального вузла, можна за наявності зв'язувальних речовин, які сприяють адгезії частинок сировини. В грануляторі з горизонтальною плоскою матрицею біосировина завдяки рифленій поверхні ролика вдавлюється в клиноподібний зазор, утворений матрицею і роликом. У зоні найбільшого тиску маса продавлюється крізь філь'єри матриці. Спресована біомаса на виході з фільєр зрізується ножом, утворюючи пелети [3-8].

Прес-гранулятори з кільцевою матрицею відомих закордонних фірм, зокрема CPM Europe (Нідерланди), Munch (Німеччина), Topgran (Росія), та гранулятори з плоскою матрицею — KANL Group (Німеччина), MGL-200 та ін.

набули найбільшого розповсюдження. Спільне українсько-німецьке підприємство «Грантех» розробляє і випускає комплект обладнання для виробництва біопаливних гранул. У конструкціях грануляторів цієї фірми застосовують механізми з кільцевими матрицями і двома роликками, що пресують. Ці пристрої відносяться до механізмів безперервної дії. Відсутність холостого ходу робочих органів і незмінність їх швидкостей зводять до мінімуму інерційні сили і загальну масу пресового обладнання. Це свідчить про перспективність механізмів такого типу, як ефективного обладнання для гранулювання біомаси у пелети [1, 2, 3].

**Мета досліджень** — підвищення ефективності проектування перспективних робочих органів для гранулювання біомаси в паливні вироби.

**Результати досліджень.** До основних конструкційних параметрів пресувального вузла з кільцевою матрицею (рис. 1) варто віднести ті, що наведені у таблиці.

В основу досліджень процесів екструзії покладено такі механіко-математичні методи:

- структурний аналіз і синтез процесів роботи прес-гранулятора;
- фізичне моделювання об'єктів досліджень зі збереженням основних природних властивостей біосировини;
- математичне моделювання роботи системи «біомаса — ролик — матриця — гранули» з розв'язком диференціальних рівнянь та інтегральними обчисленнями.

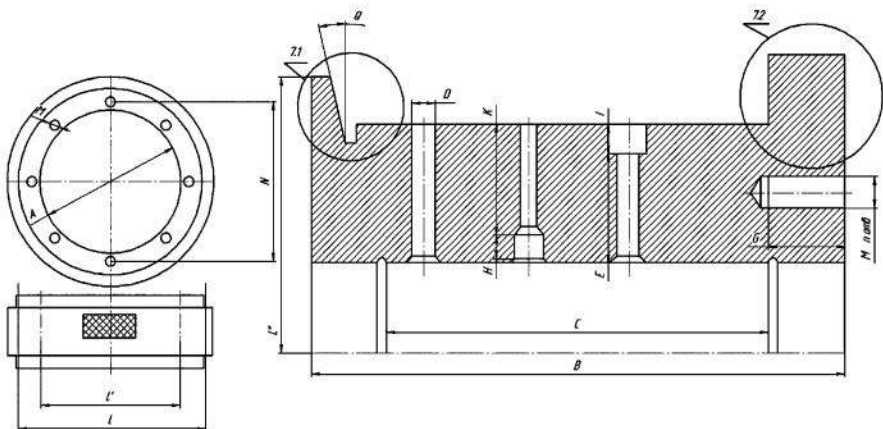


Рис. 1. Схема до визначення геометричних розмірів (параметрів) матриці

**Таблиця. Конструкційні параметри матриці (до рис. 1)**

Позиції	Найменування параметра	Позиції	Найменування параметра
A	Внутрішній діаметр	H	Глибина каналу на вході
B	Загальна ширина матриці	I	Глибина зустрічного свердління
C	Ширина робочої поверхні	K	Ефективна довжина каналу
D	Діаметр отворів	L/L'	Посадочний розмір (зовнішній, внутрішній)
E	Ефективна товщина	L''	Зовнішній діаметр матриці
F	Загальна товщина	M	Кількість і розмір різьбових з'єднань
G	Довжина різьбового з'єднання	N	Міжцентрові відстані між отворами (взаємні і відносно центра матриці)

Методи визначення раціональних конструкційно-технологічних параметрів екструзії біомаси у пелети засновано на математичному моделюванні процесу екструзії дисперсних матеріалів крізь отвори матриці гранулятора. Ці методи враховують конструктивні особливості вузла екструзії та реологічні властивості біосировини.

Схематично запропонований методичний підхід зображено на рис. 2. Задача оптимізації в межах загальної теорії математичного програмування вирішується методом визначення взаємних залежностей між параметрами, прийнятими для конкретного процесу екструзії біомаси. Тобто стає необхідним проведення відповідних досліджень із метою встановлення кількісних залежностей, що описують масообмінні процеси в біомасі під час її **сухої екструзії**.

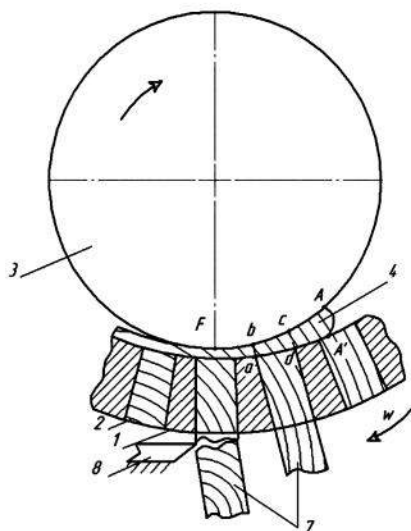
За результатами проведеного аналізу процесу екструзії біомаси прийнято такі техніко-технологічні умови для обґрунтування залежності тиску пресування від щільності виробів:

- початкова щільність однакова в усьому об'ємі каналу пресування;
- щільність сировини у процесі стискання зростає безперервно;
- нормальні напруження в будь-якому поперечному перетині каналу розподілені рівномірно.

Процес утворення гранул у каналі кільцевої (або плоскої) матриці полягає в наступному. Кільцева матриця 1 (рис. 3) з радіально розташованими каналами 2 обертається за годинниковою стрілкою. З внутрішньою поверхнею



**Рис. 2.** Методичний алгоритм визначення конструкційно-технологічних параметрів процесу екструзії біомаси



**Рис. 3.** Схема утворення паливних гранул з біомаси в матричному грануляторі

матриці стикається пресувальний валець (ролик) 3, що обертається в тому ж напрямку.

У зону 4 захвату між внутрішньою поверхнею матриці і зовнішньою поверхнею ролика, що зближуються, подається матеріал, який спочатку ущільнюється, а потім запресовується в канали 2 матриці і проштовхується через них. Вироби 7, що виходять з каналів, при зустрічі з нерухомим ножем 8 обламуються, утворюючи готові гранули.

У сучасних твердопаливних грануляторах ущільнення відбувається у відкритих камерах з рухомих упором, яким є раніше сформований виріб (частина гранули) в каналі пресування. Для

здійснення такого способу потрібно, щоб відбувалось багатоциклічне пресування, тобто формувати одну гранулу з декількох порцій.

Схема процесу пресування з рухомих упором показана на рис. 4. Матриця 1 довжиною  $L$  на ділянці  $L-H$  заповнена матеріалом 2, що формується, який складається з ряду порцій 3, кожна з яких утворюється за один цикл пресування. Таким чином, камера пресування складається з двох частин: перший (ділянка  $H$ ), де відбувається первинний цикл стискування сипучого матеріалу 4, і другий (ділянка  $L-H$ ), де відбувається проштовхування раніше ущільнених порцій і одночасно продовжується багатоциклічне стискання біомаси циклами «навантаження — розвантаження — післядія».

Скорочено надалі перша частина камери пресування буде називатись камерою стискання, а друга — камерою проштовхування. Пресування чергової порції матеріалу відбувається між торцями робочого органу і матеріалу, що формується (по лінії 1'-1'. В кінці робочого ходу, коли щільність пресованої порції досягне заданого значення, робочий орган, наближаючись до крайнього правого положення (мертвої точки), почне проштовхувати отриманий матеріал.

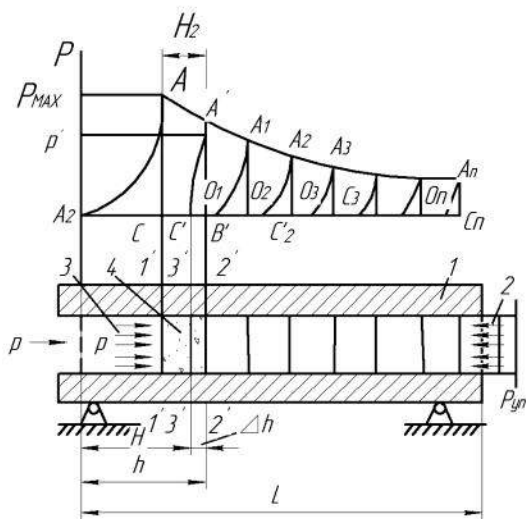


Рис. 4. Діаграма пресування біомаси в закритій камері з рухомих упором

Торець гранули переміститься з положення 1'-1' в положення 2'-2'. Після цього робочий орган почне зворотний рух, але унаслідок пружного розширення стисненої порції контакт робочого органу з матеріалом припиниться не миттєво, а з деяким запізненням. За час пружного осевого розширення торець гранули переміститься у бік зворотного руху робочого органу на  $\Delta h$  із положення 2'-2' в положення 3'-3'. Після цього контакт припиниться.

З аналізу даних явищ виходить, що у відкритому

каналі матриці з рухомим упором при пресуванні відбуваються два процеси: ущільнення із зміцненням матеріалу і проштовхування гранули уздовж каналу (філь'єри). На проштовхування затрачається додаткова енергія, що витрачається на подолання опору зовнішнього тертя матеріалу об стінки каналу і повторне стискування частини гранули, що розширилася.

У зв'язку з цим важливе значення має правильне рішення питання про вибір довжини каналу пресування. Щоб отримати гранули заданої щільності, необхідно утворити в каналі певний тиск. Разом з цим, в каналі проштовхування потрібно створити протитиск, достатній для утримання спресованої частини гранули при досягненні тиску  $p_{\max}$  в каналі.

Протитиск в каналі створюється силами тертя гранулою, що формується, об стінки. Сумарна сила тертя  $F_{TP}$  визначається за формулою:

$$F_{TP} = f_{ст} N = f_{ст} \tau S_k = f_{ст} \tau P L_{км} = f_{ст} \xi p_{уц} P_k L_{км}, \quad (1)$$

де  $f_{ст}$  — статичний коефіцієнт тертя;  $N$  — нормальна реакція, Н;  $\tau$  — дотичне напруження від бокового тиску в каналі, Па;  $S_k$  — площа бокової поверхні каналу, м<sup>2</sup>;  $P_k$  — периметр поперечного перетину каналу, м;  $\xi$  — коефіцієнт бокового розпору;  $L_{км}$  — довжина каналу матриці, м.

З урахуванням формули (1) та передумовою виникнення сили тертя значення довжини технологічного каналу матриці має відповідати умові:

$$L_{км} \geq p_{\max} S_k / (f_{ст} \xi p_{уц} P_k). \quad (2)$$

Під час проштовхування гранули по каналу матриці у виробі має завершитися релаксація напруження. Інакше за причиною пружної післядії гранула при виході з матриці буде розширюватися і, як наслідок, мати недостатню міцність. Якщо з урахуванням заданої продуктивності позначити середню швидкість просування гранули по каналу через  $v_{cp}$ , то з умов релаксації довжина каналу  $L_{рез}$  визначається за формулою:

$$L_{рез} = v_{cp} t_{рез}, \quad (3)$$

де  $t_{рез}$  — необхідний термін витримки гранули в каналі для релаксації, с.

Отже, для ефективного виконання технологічного процесу формування біопаливних гранул конструктивна довжина каналу матриці має відповідати такій умові:

$$L_{км} \geq L_{рез}.$$

**Висновки та пропозиції.** Визначені техніко-технологічні передумови процесу та розроблений методичний підхід розрахунку параметрів і режимів гранулювання біомаси засновано на математичному моделюванні процесу екструзії дисперсних матеріалів крізь канали матриці. Ці методи враховують конструктивні особливості пресувального вузла, реологічні властивості біомаси під час її гранулювання. Запропоновані методи розрахунку параметрів пресувального вузла матричного гранулятора у вигляді наведених рівнянь узагальнюють методичні положення щодо проведення аналітичних досліджень фізичного явища утворення біопаливних гранул способом сухої екструзії біомаси. Тому наведені математичні вирази приймаємо за методичну основу для розроблення в подальших дослідженнях математичних моделей процесу гранулювання вторинної біомаси на енергетичні цілі.

### **Бібліографія**

1. *Альтернативна енергетика: навч. посібник для студ. вищ. навч. закл.* / [М.Д. Мельничук, В.О. Дубровін, В.Г. Мироненко та ін.] — К.: Аграр Медіа Груп, 2011. — 612 с.
2. *Новітні технології біоенергоконверсії: монографія* / [Я.Б. Блюм, Г.Г. Гелетуха, І.П. Григорюк та ін.] — К.: Аграр Медіа Груп, 2010. — 360 с.
3. *Єременко О.І.* Аналіз стану та тенденції розвитку твердопаливних виробництв / О.І. Єременко, О.В. Паянок, Д.М. Усенко // Науковий збірник «Вісник Степу», ч. 2. — Кіровоград: КОД, 2012. — С. 234-240.
4. *Періодичне видання по біопаливній енергетиці* [електронний ресурс] / The Bioenergy International. Режим доступу до журн.: [www.bioenergyinternational.ru](http://www.bioenergyinternational.ru); [www.infobio.ru](http://www.infobio.ru)
5. *Єременко О.І.* Аналіз енергетичного потенціалу біомаси в Україні / О.І. Єременко // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. — К., 2013. — Вип. № 185. — Ч. 3. — С. 347-355.
6. *Риндюк Д.В.* Методика визначення оптимальних конструктивно-технологічних параметрів процесу грануляції дисперсних матеріалів шляхом ущільнення / Д.В. Риндюк, С.В. Штефан // Наукові праці НУХТ. — 2008. — № 25. — Ч. 2. — С. 81-83.



7. Дубровін В.О. Методика розрахунку параметрів матриці твердопаливних грануляторів / В.О. Дубровін, О.І. Єременко, С.М. Виговський, Р.М. Чорний // Міжвідомчий тематичний науковий збірник «Механізація та електрифікація сільського господарства». — Глеваха: ННЦ«ІМЕСГ», 2013. — Вип. № 98. — Т. 2. — С. 280-289.
8. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм / С.В. Мельников. — Л.: Колос, 1978. — 560 с.
9. Кукта Г.М. Машины и оборудование для приготовления кормов / Г.М. Кукта. — М.: Агропромиздат, 1987. — 303 с.

#### **ТЕХНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ГРАНУЛИРОВАНИЯ БИОМАССЫ НА ТОПЛИВО**

*Проведен анализ процесса гранулирования биомассы в топливные изделия. Определены технико-технологические предпосылки получения биотопливных гранул в матричном прессе.*

**Ключевые слова:** биомасса, гранулирование, экструзия, предпосылки, методика, параметры.

#### **TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL PRE-CONDITIONS OF GRANULATION BIOMASS ON FUEL**

*The analysis of process of granulation of biomass is conducted in fuel wares. Technical and technological pre-conditions of receipt are certain biological fuel granules in a matrix press.*

**Key words:** biomass, granulation, extrusion, pre-conditions, method, parameters.