

УДК 655.531.022

DOI: 10.20535/2077-7264.3(73).2021.253702

© **Є. В. Штефан**, д-р техн. наук, проф., **О. В. Зоренко**, канд. техн. наук, доц., КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ЗНЕВОДНЕННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ДРУКАРСЬКОГО ПАПЕРУ

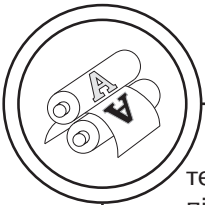
Розглянуто теоретичні аспекти процесу пресування паперового полотна з позицій механіки дисперсних вологонасичених матеріалів. Розроблено математичну модель процесу пресування паперового полотна, що дозволяє враховувати форму і розміри часток матеріалу та кінетику відокремлення води, а також визначити екологічні режими зневоднення паперових півфабрикатів шляхом зменшення використання води та викиди парникових газів.

Ключові слова: паперове полотно; папероробна машина; зневоднення паперової маси; пресування полотна; екологія виробництва.

Постановка проблеми

Папір — один з основних елементів в системі матеріально-технічного забезпечення сучасного поліграфічного виробництва. Потреби споживання друкарського паперу у світі постійно зростають при тому, що у зв'язку із забороною використання полімерних пакувальних плівок (поліетиленових пакетів) та збільшення попиту на чистоцелюлозні пакувальні матеріали, у 2021 р. виробництво друкарського паперу в Європі зменшилось на 4 млн т, а вартість зросла більше ніж вдвічі (з 650 до 1,5 тис. євро за тону) [1]. Матеріально-технічне забезпечення сучасних підприємств поліграфічної галузі обумовлює наявність друкарського паперу з необхідними експлуатаційними технологічними властивостями, зокрема деформаційними та всо-

тувальною здатністю, що мають значний вплив на якість друкованої продукції. Це призводить до необхідності вдосконалення процесів та обладнання з виробництва друкарського паперу. Технологія виготовлення паперу є енерго- та ресурсозатратним процесом, в якому найбільш тривалим і вартісним етапом є видалення води з паперового полотна задля досягнення необхідного рівня його вологості. Сучасна тенденція організації процесу зневоднення паперової маси характеризується необхідністю відокремлення найбільшої кількості води на етапі механічних технологічних операцій, що дозволяє зменшити тривалість наступного етапу — сушіння паперового півфабрикату і тим самим знизити витрати на теплову енергію. Таким чином, більш ефективна



технологія пресування паперових півфабрикатів дозволяє вирішити проблему зниження собівартості готових виробів.

Теоретичні аспекти процесу пресування паперового полотна є одним з найбільш складних завдань сучасної механіки дисперсних матеріалів. Проблема полягає у розв'язанні зв'язаної задачі фільтрації води і повітря в деформуючому пористому середовищі та ущільнення самого пористого каркасу. Крім того, необхідно враховувати технологічні параметри процесу пресування паперового полотна (вологість, температура, композиція паперової маси та ступінь її розмелювання; швидкість обертання та діаметр пресувальних валів, кінетика виходу рідини, ступінь ущільнення тощо).

Для створення ефективної системи керування процесом пресування паперового полотна, яка б враховувала конструкційно-технологічні параметри процесу відокремлення рідини та сучасні вимоги до ресурсо- та енергозбереження, необхідно розв'язати наступні основні завдання:

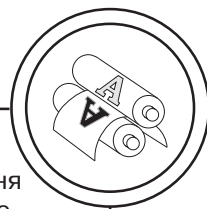
— проаналізувати закономірності процесу зневоднення паперових мас та на їх основі розробити математичну модель процесу фільтраційного відокремлення рідкої фази з паперового півфабрикату;

— дослідити ефективність розробленої теоретичної методики розрахунку кінетики відокремлення рідини та ущільнення паперового полотна.

Аналіз попередніх досліджень

Проблемі зневоднення паперового полотна присвячена знач-

на кількість досліджень [2]. Можна виділити два основних механізми відокремлення рідкої фази: фільтраційний (відбувається за рахунок наявності градієнту тиску в об'ємі паперової маси) та вологоперенесення за рахунок градієнта температур в об'ємі паперової маси (сушіння) [3]. Оскільки процес сушіння є достатньо енергоємним, то у сучасних технологіях виготовлення паперу приділяється велика увага процесам механічного відокремлення рідкої фракції у паперових півфабрикатах. Для цього розроблено різноманітні конструкції пресувальних пристроїв та багатоступеневі режими пресування паперових виробів [4]. Для удосконалення процесів пресування вологонасичених паперових мас необхідно враховувати численні конструктивно-технологічні чинники: структурно-механічні показники паперового полотна (розміри та орієнтація волокон, вміст та кінетика руху рідини тощо), величина тиску між пресувальними валами, тривалість процесу пресування, в'язкість води тощо. Створення відповідної математичної моделі процесу пресування вологонасичених паперових матеріалів пов'язано зі значними математичними труднощами [5]. При цьому континуальна теорія суцільного середовища повинна враховувати елементи структурного моделювання дисперсного середовища [6], яке в контексті моделі континуума припускає, що дисперсійна фаза, що утримується в матеріалі, розглядаються як безперервна та має інші механічні властивості (на відміну від властивостей твердої фази) і може змінювати свій об'єм. Для цього



використовується принцип еквівалентності [7], згідно з яким усі властивості матеріалу твердої фази в мікро-об'ємах дисперсної системи співпадають із властивостями макроскопічного компактного однорідного матеріалу. Цей підхід вимагає використання концепції представницького елемента (ПЕ) [8], відповідно до якого точка континуума ототожнюється з областю, розміри якої малі порівняно з розмірами зразка матеріалу, але й водночас великі порівняно з окремими структурними елементами (окремими частками) цього матеріалу. Ці структурні елементи можуть мати довільну хаотичну геометрію, а ПЕ є нижчим рівнем застосування структурної моделі дисперсного матеріалу в рамках континуального підходу. Структурні характеристики ПЕ визначаються властивостями речовин складових фаз і зовнішніми (технологічними) умовами оброблення матеріалу. З метою спрощення математичного опису формоутворення дисперсних матеріалів у роботі [7] запропоновано використовувати для відповідних параметрів просторове усереднення по твердій та рідкій фазах у межах ПЕ.

Тому, проектування нових та удосконалення існуючих технологічних операцій пресування паперового полотна проводиться на основі наближених емпіричних залежностей та накопиченого практичного досвіду [3]. В роботах [3, 4] обґрунтовано необхідність розроблення розрахункових методів визначення раціональних експлуатаційних режимів роботи пресів паперобробних машин з метою забезпечення ресурсозберігаючих процесів зневоднення паперових

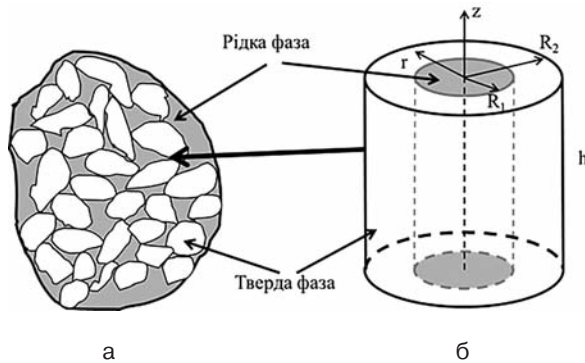
півфабрикатів та прогнозування показників якості готових паперових виробів необхідних для відповідного поліграфічного оформлення. Як показано в роботі [9] нормативні показники кінцевої продукції визначаються середньою довжиною волокон, величиною питомої поверхні та міжволоконними силами зв'язку, що в сукупності забезпечує фізико-механічні властивості паперу.

Мета роботи

Розроблення математичної моделі процесу формоутворення та пресування паперових водонасичених дисперсних систем для визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів режимів зневоднення та ущільнення паперових півфабрикатів.

Результати проведених досліджень

Розглядаючи технологію формоутворення паперових виробів, приймаємо концепцію подання відповідних сировинних дисперсних мас як двофазних сумішей пористої або зернистої твердої деформованої структури з рідиною та газом, яку надалі будемо розглядати у виді моделі суцільного текучого середовища з приписуваними їй фізичними властивостями, які феноменологічно відображають неоднорідну (дискретну) структуру дисперсної фази (тверді частки та волокна) і внутрішні рухи газорідкого дисперсійного середовища, що відбуваються в ній. Для описання механічної поведінки таких матеріалів використовуємо поняття напружень, деформацій, щільності, а також швидкості зміни



Зображення умовного макрофрагменту (а) та варіант ідеалізованого ПЕ мікрофрагменту (б) дисперсного матеріалу

цих параметрів. Ці тензорні та скалярні характеристики мають локальну природу і визначаються за допомогою операцій граничного переходу, коли елементи простору (об'єми і поверхні) стягуються до точок (матеріальних). У традиційних моделях континуума точки ототожнюють з частками середовища (нескінченно малий об'єм матеріального континуума), а ті, у свою чергу, є елементарними носіями властивостей матеріалу.

Надалі використовуються два рівні розгляду поведінки дисперсної системи. На першому проводиться макроаналіз, зв'язаний з розглядом окремого фрагмента дисперсної маси (рис., а). Вибір структури даного фрагмента визначається як реальною геометрією розташування окремих часток, так і розуміннями, зв'язаними зі зручністю аналізу даного фрагмента. У ході мікроаналізу необхідно визначити розподіл швидкостей в елементарній частці середовища. З його допомогою за відомими формулами механіки суцільного сере-

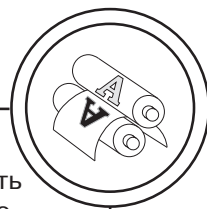
довища будується поле швидкостей деформацій. Отримане в такий спосіб поле описує мікроскопічну поведінку середовища. Макроскопічна поведінка визначається операцією осереднення за макрооб'ємом.

Для проведення мікроаналізу пропонуємо ввести у розгляд ПЕ типу ідеалізованого мікрофрагменту дисперсного матеріалу — елементарний об'єм у виді кругового порожнього циліндра (рис., б). Матеріал даного циліндра (тверда фаза дисперсного матеріалу на мікрорівні) вважається нестисливим, а його вісь збігається з напрямом одного з головних компонентів тензора швидкостей деформації.

В області зайнятий циліндром $R_1 < r < R_2$; $0 < z < h$ розглядаються тільки два компоненти швидкості переміщення точок матеріалу v_r і v_z , які задовольняють рівнянню нерозривності:

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

Для нівелювання результатів введеної ідеалізації розглядається



параметр швидкості локальної (на мікрорівні) енергії деформування твердої фази з подальшим її осередненням по всьому об'єму циліндра [7]:

$$D = \sigma_0 \gamma_0 \cdot \left(\frac{1}{\alpha_1} \sqrt{\frac{\psi e^2}{\gamma_0^2} + \frac{\phi \Gamma^2}{\gamma_0^2}} \right)^{n+1} + \sigma_T \gamma_0 \frac{1}{\alpha_1} \sqrt{\frac{\psi e^2}{\gamma_0^2} + \frac{\phi \Gamma^2}{\gamma_0^2}} \quad (2)$$

При виведенні (2) враховані параметри дисперсності матеріалу

$\alpha_2 = 1 - \alpha_1 = \frac{R_1^2}{R_2^2}$ — об'ємний

вміст газорідкої фази; $\phi = \alpha_1$ — об'ємний вміст твердої фази;

$\psi = \frac{\alpha_1}{2\alpha_2}$, а також узагальнена

реологічна модель матеріалу

твердої фази $\sigma = \sigma_0 \left(\frac{\dot{\gamma}}{\gamma_0} \right)^n + \sigma_T$,

де σ_T — границя текучості матеріалу твердої фази паперової маси,

$\gamma = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{R_4^2}{r^4} e^2 + \Gamma^2}$ — параметр

інтенсивності швидкостей деформацій ПЕ, σ_0 , γ_0 , n — константи апроксимації експериментальних даних; e , Γ — перший та другий інваріанти тензора швидкостей

деформацій; $w = \frac{1}{\alpha_1} \sqrt{\psi e^2 + \phi \Gamma^2}$.

На основі рівняння (2) формулюється загальна структура визначальних (реологічних) співвідношень через компоненти тензорів напружень σ_{ij} і швидкостей

деформацій e_{ij} , які враховують структурно-механічні властивості паперових мас [S]:

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{\sigma_0 \left(\frac{w}{\gamma_0} \right)^n + \sigma_T}{w} \right) \cdot \left[\phi e_{ij} + \left(\psi - \frac{1}{3} \phi \right) e \delta_{ij} \right] \quad (3)$$

Реологічну модель (3) доповнимо співвідношеннями для твердої фази ПЕ:

$$P = \left(\sigma_0 \left(\frac{w}{\gamma_0} \right)^n + \sigma_T \right) \psi \frac{e}{w}, \quad (4)$$

$$\tau = \left(\sigma_0 \left(\frac{w}{\gamma_0} \right)^n + \sigma_T \right) \phi \frac{\Gamma}{w},$$

де $P = \frac{1}{3} \sigma_{ii}$ — перший інваріант тензора напружень;

$$\tau = \left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \right) \left(\sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \right)^{\frac{1}{2}} -$$

другий інваріант тензора напружень.

Як відомо, деформаційна обробка водонасичених дисперсних матеріалів супроводжується двома одночасно плинними процесами: деформуванням твердої фази і відокремленням дисперсійного рідкого середовища.

Вважаємо, що твердий каркас дисперсного матеріалу являє собою капілярно-пористе тіло,



усередині якого можливий рух рідини. Припускаємо далі, що закони такої течії контролюються звичайною фільтрацією. На основі аналізу введеної елементарної комірки (ПЕ) дисперсного матеріалу (рис., б), визначимо швидкість рідини, що рухається в стінках комірки. Відповідно до закону фільтрації у формі рівняння Дарсі маємо:

$$v = -\frac{k^P}{\alpha_1} \cdot \text{grad}P, \quad (5)$$

де k^P — коефіцієнт проникності (фільтрації) макрофрагменту (рис., а).

На відміну від традиційних задач фільтрації, де рівняння (4) варто доповнювати рівнянням нерозривності для рідкої фази, у даному випадку швидкість руху рідини може бути визначена безпосередньо. Адже аналіз процесу фільтрації у межах мікрофрагменту (рис., б) може проводитися з використанням кінематики деформування відповідного циліндра. Приймаємо, що осьовий компонент швидкості в елементарному осередку лінійно залежить від координати z , тому остання складова у рівнянні (1) не залежить від r і z . Тому рівняння (1) можна представити у виді:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) = -e_z, \quad (6)$$

де $e_z = \frac{\partial v_z}{\partial z}$.

Перетворимо (6) у:

$$\frac{\partial}{\partial r} (r v_r) = -e_z r. \quad (7)$$

Інтегруючи рівняння (7) і позначаючи константу інтегрування через c , знаходимо:

$$v_r = \frac{c}{r} - \frac{1}{2} e_z r. \quad (8)$$

Обидві компоненти тензора швидкостей деформацій знаходимо за формулами:

$$\begin{aligned} e_r &= \frac{\partial v_r}{\partial r} = \\ &= -\frac{c}{r^2} - \frac{1}{2} e_z, \end{aligned} \quad (9)$$

$$e_\theta = \frac{v_r}{r} = \frac{c}{r^2} - \frac{1}{2} e_z. \quad (10)$$

Константу c знаходимо з умови, що швидкість на зовнішній поверхні циліндра визначається граничними умовами:

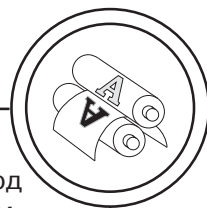
$$v_r \Big|_{r=R_2} = v_2, \quad (11)$$

$$c = \frac{1}{2} R_2^2 \left(e_z + 2 \frac{v_2}{R_2} \right). \quad (12)$$

На відміну від мікроскопічних швидкостей деформацій, що задовольняють умові нестисливості, макроскопічні швидкості деформації задовольняють умові стисливості елементарного об'єму (рис., б):

$$e_z + 2e_r = e, \quad (13)$$

де e — швидкість зміни об'єму ПЕ. Можливість такої зміни, незважаючи на нестисливість матеріалу циліндра, зумовлена наявністю внутрішньої порожнини.



Компоненти мікроскопічних швидкостей деформації (9) і (10) з врахуванням (12), (13) можуть бути представлені:

$$e_r = \frac{1}{2} \frac{R_2^2}{r^2} e - \frac{1}{2} e_z, \quad (14)$$

$$e_\theta = \frac{1}{2} \frac{R_2^2}{r^2} e - \frac{1}{2} e_z. \quad (15)$$

Введемо у розгляд другий інваріант девіатора макроскопічних швидкостей деформацій (швидкість зміни форми):

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2}{3}} |e_z - e_r|. \quad (16)$$

Тоді компоненти тензора швидкостей деформацій у межах ПЕ можуть бути представлені

$$\begin{aligned} e_r &= \pm \frac{1}{\sqrt{6}} \Gamma + \\ &+ \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2} \frac{R_2^2}{r^2} \right) e, \\ e_\theta &= \mp \frac{1}{\sqrt{6}} \Gamma + \\ &+ \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2} \frac{R_2^2}{r^2} \right) e, \\ e_z &= \pm 2 \frac{1}{\sqrt{6}} \Gamma + \end{aligned} \quad (17)$$

Гідростатичний тиск P , що фігурує в законі Дарсі (5), визначається компонентами тензора напружень σ_r , σ_ϕ , σ_z :

$$P = \frac{1}{3} (\sigma_z + \sigma_r + \sigma_\phi). \quad (18)$$

Нижче пропонується метод визначення напружень шляхом, що не потребує необхідності інтегрувати будь-які рівняння. Спочатку використовуються співвідношення подібності девіаторів напружень і швидкостей деформацій (4). Записавши перші два з них у виді:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_z - \sigma_r}{e_z - e_r} &= \\ &= \frac{\sigma_z - \sigma_\phi}{e_z - e_\phi}, \end{aligned} \quad (19)$$

знаходимо

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \frac{e_r - e_\phi}{e_r - e_\phi} \sigma_r - \\ &- \frac{e_z - e_r}{e_r - e_\phi} \sigma_\phi. \end{aligned} \quad (20)$$

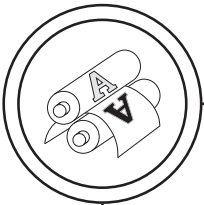
Підстановка (19) у (20) дозволяє визначити гідростатичний тиск через радіальні компоненти напружень та деформацій

$$P = \sigma_r - \frac{\sigma_r - \sigma_\phi}{e_r - e_\phi} e_r. \quad (21)$$

Диференціювання (21) по r , дає:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial r} &= \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} - \\ &- e_r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\sigma_r - \sigma_\phi}{e_r - e_\phi} \right) - \\ &- \frac{\sigma_r - \sigma_\phi}{e_r - e_\phi} \frac{\partial}{\partial r} e_r. \end{aligned} \quad (22)$$

Використовуючи рівняння рівноваги елементарного об'єму в циліндричній системі координат, першу складову рівняння (22) можна представити у виді:



$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = -\frac{\sigma_r - \sigma_\phi}{r}. \quad (23)$$

Враховуємо реологічні властивості матеріалу твердої фази в узагальненому виді:

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} \right)^n + \sigma_m. \quad (24)$$

Далі, використовуючи (24), запишемо

$$\frac{\sigma_r - \sigma_\phi}{e_r - e_\phi} = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} \right)^{n-1}, \quad (25)$$

і взявши, згідно (14, 16, 17) похідну від e_r , отримаємо:

$$\frac{\partial e_r}{\partial r} = \frac{R_2}{r^2} \frac{e}{r}. \quad (26)$$

Підставляючи отримані рівняння (23)–(26) в (22) і, виконуючи нескладні перетворення, знаходимо

$$\frac{\partial P}{\partial r} = -\frac{\sigma_0}{\gamma_0} e_r \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[\left(\frac{\gamma}{\gamma_0} \right)^{n-1} \right]. \quad (27)$$

Нарешті, виконуючи диференціювання в (27), знаходимо

$$\frac{\partial P}{\partial r} = -(1-n) \cdot \frac{\sigma_0}{\gamma_0} e_r \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} \right)^{n-1} \cdot \frac{1}{\gamma_0 - \gamma} \cdot \frac{R_2^4}{r^4} \cdot \frac{e^2}{r}. \quad (28)$$

Кінетика відокремлення рідкої фази у стаціонарному режимі пресування дисперсного матеріалу

На основі рівняння (5) можна визначити закономірності відокремлення рідкої фази залежно від макроскопічного деформованого стану дисперсного вологонасиченого матеріалу. Критерієм зневоднення на макрорівні вважаємо швидкість зменшення маси рідкої фази у просторі між твердими частками згідно рис., а. На мікрорівні, згідно прийнятому варіанту ПЕ (рис., б), зміна маси рідини у порожнині циліндра визначається рівнянням:

$$\frac{dM}{dt} = \rho_2 \cdot v(r) \Big|_{r=R_1} \cdot R_1 \cdot h, \quad (29)$$

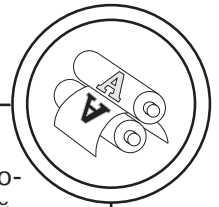
або швидкість зміни її об'єму:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{\rho_2} \cdot \frac{dM}{dt} = v(r) \Big|_{r=R_1} \cdot R_1 \cdot h. \quad (30)$$

де ρ_2 — густина рідкої фази.

Величину (30) будемо надалі відносити до об'єму твердої фази $h(R_2^2 - R_1^2)$. Таким чином, подальшому аналізу підлягає величина, яка визначає відносну зміну рідкої фази:

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = \frac{v(r)}{R_1} \Big|_{r=R_1} \cdot \frac{R_1^2}{R_2^2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{R_1^2}{R_2^2}}, \quad (31)$$



або з врахуванням співвідношень для об'ємного вмісту твердої α_1 та рідкої α_2 фаз

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = \frac{v(r)}{R_1} \Big|_{r=R_1} \cdot \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \quad (32)$$

Скориставшись законом Дарсі за формулою (5), а також виразом для зміни тиску за формулою (28), одержимо рівняння, що описує кінетику відокремлення рідкої фази:

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = \frac{1}{\alpha_1} \cdot (n-1) \frac{\sigma_0 k^p}{R_1 \alpha_1} \cdot \frac{\left(\mp \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{\Gamma}{\gamma_0} \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2} \frac{1}{\alpha_2} \right) \frac{e}{\gamma_0} \right) e^2}{\left(\frac{1 e^2 + \Gamma^2}{\sqrt{2 \alpha_2^2 + \Gamma^2}} \right)^{3-n} \frac{1}{\alpha_2}} \quad (33)$$

Та обставина, що показник ступеня n для більшості дисперсних матеріалів коливається в межах між нулем і одиницею, ($0 < n < 1$) не складно оцінити швидкість відокремлення рідкої фази залежно від об'ємного вмісту рідкої фази. Таким чином, на основі (33) можна отримати наближену пропорцію:

$$\frac{d\bar{V}}{dt} \sim \alpha_2^{1-n} \quad (34)$$

Слід відмітити, що коефіцієнт n можна інтерпретувати, як показник вологонасиченості матеріалу. Чим n ближче до нуля, тим менший вміст вологи у відповід-

ному матеріалі. Тому можна зробити висновок: чим більш «сухий» матеріал, тим менша швидкість виходу рідкої фази за одного і того ж об'ємного вмісту твердої фази. Даний висновок хоча і представляється тривіальним, проте може розглядатися як непряме підтвердження правильності модельних побудов, що представлені вище.

Кінетика ущільнення твердого каркаса дисперсного матеріалу

Загалом, вихід рідкої фази приводить до зменшення вологонасичення дисперсного матеріалу, тому повне дослідження кінетики відокремлення твердої фази необхідно проводити одночасно з аналізом кінетики ущільнення твердого каркаса дисперсного матеріалу. З цією метою варто скористатися макроскопічними визначальними співвідношеннями (3), (4), які перетворимо з використанням перших інваріантів тензорів напружень (18) та швидкостей деформацій (13) для прийнятого варіанту ПЕ (рис., б):

$$e = \gamma_0 \frac{1}{\Psi} \frac{P}{\sigma_0} \frac{1}{\left(\frac{\sqrt{\frac{P^2}{\Psi} + \frac{\tau^2}{\phi}}}{\sigma_0} \right)^{n-1}} \quad (35)$$

З врахуванням, що $e = \frac{1}{\alpha_1} \frac{d\alpha_1}{dt}$, маємо:



$$\frac{d\alpha_1}{dt} = \alpha_1 \gamma_0 \cdot \frac{1}{\Psi \sigma_0} \cdot \left(\frac{\sqrt{\frac{P^2}{\Psi} + \tau^2}}{\phi} \right)^{n-1} \cdot \frac{1}{\sigma_0} \quad (36)$$

Рівняння (33) і (36) дозволяють у загальному випадку однорідного напружено-деформованого стану ПЕ вологонасиченого дисперсного паперового матеріалу провести спільне дослідження закономірностей відокремлення рідкої фази та ущільнення твердого каркасу. Відмітимо, що процедура визначення об'ємного вмісту твердої фази в дисперсному матеріалі і об'єму рідини, що виділилася, істотно полегшується тою обставиною, що рівняння (33) містить швидкість об'ємної зміни (абсолютний параметр) і об'ємний вміст (відносна величина), а рівняння (36) не містить параметрів вмісту вологи. Тому рівняння (36) може бути розв'язане незалежно від (33). Відмітимо, що практичне використання отриманих рівнянь (28, 33, 36) не пов'язано із суттєвими математичними труднощами. Це обумовлює їх інженерне значення у можливості використання при створенні

відповідних інформаційних систем типу [10] для ефективного супроводження функціонування технологічних процесів виготовлення паперу.

Висновки

1. Запропоновано методологічний підхід до створення математичної моделі процесу пресування паперових півфабрикатів в папероробній машині з позиції механіки дисперсних вологонасичених матеріалів.

2. Отримано аналітичні рівняння, що описують закономірності кінетики відокремлення рідкої фази та ущільнення твердого каркасу дисперсної системи.

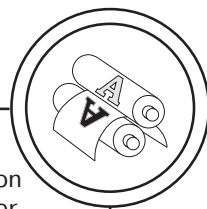
3. Розроблено методику визначення технологічних параметрів зневоднення паперової маси при пресуванні в папероробній машині.

4. Запропоновані методологічні аспекти можна використовувати для визначення раціональних режимів експлуатації пресового обладнання у технологіях виготовлення паперу різного поліграфічного призначення.

5. Моделювання процесів зневоднення паперових мас з врахуванням їх структурних особливостей дозволить підвищити екологічність технологій виготовлення паперу за рахунок зменшення витрат води та викидів парникових газів.

Список використаної літератури

1. Прокопишина О. Чому в Україні не вистачає паперу для книжок / О. Прокопишина. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://biz.censor.net/resonance/3316342/chomu_v_ukrayini_ne_vystachaye_paperu_dlya_knyjok.
2. Плосконос В. Г. Нові тенденції в методології дослідження стану складних систем картонно-паперового виробництва / В. Г. Плосконос // Вісник НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2020. № 1(19). С. 65–70.



3. Ajit K Ghosh. Fundamentals of Paper Drying — Theory and Application from Industrial Perspective, Evaporation, Condensation and Heat transfer, Dr. Amimul Ahsan (Ed.) / Ghosh A. K. InTech. 2011. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.intechopen.com/books/evaporation-condensation-and-heat-transfer/fundamentals-of-paper-drying-theory-and-application-from-industrial-perspective>.

4. Bajpai P. Pulp and Paper Production Processes and Energy Overview / P. Bajpai // Pulp and Paper Industry. 2016. pp. 15–49.

5. Штефан Е. В. Построение аналитической модели процессов деформирования дисперсных материалов / Е. В. Штефан, С. И. Блаженко // Межд. период. сб. научн. тр. «Обработка дисперсных материалов и сред. Теория, исследования, технологии, оборудование». О.: НПО «ВОТУМ», 2003. № 13. С. 26–33.

6. Штефан Е. В. Інформаційні технології проектування обладнання для мундштучного пресування керамічних мас / Е. В. Штефан // Зб. наук. пр. ВАТ «УкрНДІВогнеупорів ім. А. С. Бережного». 2010. № 110. С. 593–598.

7. Shtefan E. Constitutive Equation for Numerical Simulation of Elastic-Viscous — Plastic Disperse Materials Deformation Process / E. Shtefan, S. Blagenko // Advances in Design, Simulation and Manufacturing Proceedings of the International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2018, June 12–15, Sumy, Ukraine, 2018. Springer International Publishing AG. Part of Springer Nature. Issue 1. 356–363 pp. ISBN 978-3-319-93586-7. <https://link.springer.com/b006Fok/10.1007%2F978-3-319-93587-4>.

8. Штефан Е. В. Експериментальний метод дослідження реологічних властивостей органічних матеріалів — відходів зернової промисловості / Е. В. Штефан, Д. В. Риндюк // Наукові праці НУХТ. 2008. № 25, 42. С. 106–108.

9. Derakhshandeh B. Rheology of pulp fibre suspensions: A critical review / B. Derakhshandeh, R. J. Kerekes, S. G. Hatzikiriakos, C. P. J. Bennington // Chemical Engineering Science. 2011. V. 66. P. 3460–3470.

10. Штефан Е. В. Методи цифрового управління поліграфічними процесами / Штефан Е. В., Т. А. Роїк, О. В. Зоренко, О. П. Шостачук // Технологія і техніка друкарства. 2021. № 2(72). С. 54–63. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(72\).2021.242474](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(72).2021.242474).

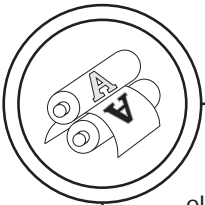
References

1. Prokopyshyna, O. *Chomu v Ukraini ne vystachaie paperu dlia knyzhok [Why there is a lack of paper for books in Ukraine]*. Retrieved from https://biz.censor.net/resonance/3316342/chomu_v_ukrayini_ne_vystachaye_paperu_dlya_knyzok [in Ukrainian].

2. Ploskonos, V. H. (2020). Novi tendentsii v metodolohii doslidzhennia stanu skladnykh system kartonno-paperovaloho vyrobnytstva [New tendencies in the methodology of research of the state of complex systems of cardboard and paper production]. *Visnyk NTUU 'KPI im. Ihoria Sikorskoho' Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia*, 1(19), 65–70 [in Ukrainian].

3. Ghosh, A. K. (2011). Fundamentals of Paper Drying — Theory and Application from Industrial Perspective, Evaporation, Condensation and Heat transfer, Dr. Amimul Ahsan (Ed.). InTech. Retrieved from <http://www.intechopen.com/books/evaporation-condensation-and-heat-transfer/fundamentals-of-paper-drying-theory-and-application-from-industrial-perspective> [in English].

4. Bajpai, P. (2016). Pulp and Paper Production Processes and Energy Overview. *Pulp and Paper Industry*, 15–49 [in English].



5. Shtefan, E. V., & Blazhenko, S. I. (2003). Postroenie analiticheskoy modeli protsessov deformirovaniya dispersnykh materialov [Construction of an analytical model of the processes of deformation of dispersed materials]. *Obработка dispersnykh materialov i sred. Teoriya, issledovaniya, tekhnologii, oborudovanie*, 13, 26–33 [in Russian].

6. Shtefan, Ye. V. (2010). Informatsiini tekhnologii proektuvannia obladnannia dlia mundstuchnoho presuvannia keramichnykh mas [Information technologies for designing equipment for mouthpiece pressing of ceramic masses]. *Zbirnyk naukovykh prats VAT 'UkrNDIVohneuporiv im. A. S. Berezhnoho'*, 110, 593–598 [in Ukrainian].

7. Shtefan, E., & Blagenko, S. (2018). Constitutive Equation for Numerical Simulation of Elastic-Viscous — Plastic Disperse Materials Deformation Process. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing Proceedings of the International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2018. Springer International Publishing AG. Part of Springer Nature*, Issue 1, 356–363 Retrieved from <https://link.springer.com/b006Fok/10.1007%2F978-3-319-93587-4> [in English].

8. Shtefan, Ye. V., & Ryndiuk, D. V. (2008). Eksperymentalnyi metod doslidzhennia reolohichnykh vlastyvopei orhanichnykh materialiv — vidkhodiv zernovoi promyslovosti [Experimental method of research of rheological properties of organic materials — waste of grain industry]. *Naukovi pratsi NUKhT*, 25, 42, 106–108 [in Ukrainian].

9. Derakhshandeh, B., Kerekes, R. J., Hatzikiriakos, S. G., & Bennington, C. P. J. (2011). Rheology of pulp fibre suspensions: A critical review. *Chemical Engineering Science*, V. 66, 3460–3470 [in English].

10. Shtefan, Ye. V., Roik, T. A., Zorenko, O. V., & Shostachuk, O. P. (2021). Metody tsyfrovoho upravlinnia polihrafichnymy protsesamy [Methods of Digital Control of Printing Processes]. *Tekhnolohiia i tekhnika druzarstva*, 2(72), 54–63. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(72\).2021.242474](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(72).2021.242474) [in Ukrainian].

The process of paper web pressing theoretical aspects are considered from the standpoint of the mechanics of dispersed moisture-saturated materials. The mathematical model of the paper web pressing process has been developed. It allows taking into account the shape and particle size of the material and the kinetics of water separation and development of ecological regimes for the paper semi-finished products dehydration by reducing the use of water and greenhouse gas emissions.

Keywords: paper canvas; paper machine; dehydration of paper pulp; pressing the canvas; production ecology.

Надійшла до редакції 05.10.21