

СИНЮК ОЛЕГ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9615-0729>e-mail: oleg.synuk@khmnu.edu.ua**ФЕДУХ МИКОЛА**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0003-6017-9313>e-mail: nik_feduh@i.ua**ЮНАС ЮРІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0006-7521-4208>e-mail: unas_1@ukr.net

МОДЕЛЬ ГІДРОДИНАМІЧНОГО РУЙНУВАННЯ ТЕКСТИЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ

У статті досліджено механізм гідродинамічного розволокнення текстильних відходів із використанням кавітаційного впливу. Обґрунтовано неефективність традиційних механічних методів для подрібнення текстильного матеріалу та показано переваги гідродинамічного підходу у водному середовищі, зокрема з використанням кавітаційної обробки. На основі аналізу фізико-хімічних процесів розроблено математичну модель, яка описує проникнення кумулятивного струменя, утвореного при схлопуванні кавітаційної бульбашки, у волокнисту структуру текстильного матеріалу. Отримано аналітичні рівняння для визначення глибини проникнення струменя, враховуючи характеристики суспензії, геометричні параметри кавітаційної вставки, а також пластичні властивості оброблюваного матеріалу. Проведено чисельне моделювання процесу, що дозволило визначити оптимальні технологічні режими та конструктивні параметри кавітаційного розволокнювача. Встановлено, що для ефективного руйнування волокнистої структури необхідно дотримуватися діапазону швидкостей струменя 200...1400 м/с та тиску в каналі розволокнювача 0,01...0,35 МПа залежно від товщини текстильного матеріалу.

Ключові слова: відходи, текстиль, руйнування, волокна, гідродинаміка, кавітація, розволокнення

SYNYUK OLEG**FEDUKH MYKOLA****YUNAS YURIY**

Khmelnytskyi National University

HYDRODYNAMIC MODEL OF TEXTILE MATERIAL DESTRUCTION

The article investigates the mechanism of hydrodynamic defibering of textile waste using cavitation effects. The inefficiency of traditional mechanical methods for disintegrating textile materials – such as knife mills and rotor-stator systems – is substantiated due to their high energy consumption and limited effectiveness when processing multilayered or heavily worn fabrics. The advantages of the hydrodynamic approach in an aqueous medium are demonstrated, especially through the application of cavitation treatment. This method, due to localized zones of high pressure and temperature generated by collapsing cavitation bubbles, ensures targeted destruction of the fibrous structure and facilitates deeper penetration into the textile mass. A detailed physical and chemical analysis of the cavitation phenomenon led to the development of a mathematical model describing the penetration of the cumulative jet – formed upon the collapse of a cavitation bubble – into the fibrous structure of the textile material. The model takes into account the dynamics of jet formation, the physical properties of the working suspension (including viscosity and density), as well as the geometric parameters of the cavitation insert. Analytical equations were derived to determine the jet's penetration depth depending on the suspension characteristics, structural properties of the treated textile, and the plastic deformation parameters relevant to the material. Numerical simulation of the process was performed using finite element methods, which made it possible to identify critical technological regimes, deformation thresholds, and optimal operational parameters for effective defibering. The study revealed that effective destruction of the fibrous matrix is achieved when the velocity of the cumulative jet is maintained within the range of 200-1400 m/s, and the pressure inside the defibering channel is kept between 0.01 and 0.35 MPa, depending on the thickness and composition of the textile waste. Based on the obtained results, a set of practical recommendations was proposed for the design and optimization of industrial cavitation-based defibering equipment. These findings may be effectively applied in the development of sustainable textile waste recycling technologies, contributing to resource conservation and reduction of environmental impact.

Keywords: waste, textile, destruction, fibers, hydrodynamics, cavitation, defibering

Вступ

Механічні методи, розглянуті в [1-3], показали низьку ефективність при обробці текстильних відходів. Останнім часом надається перевага гідродинамічним способам розволокнення у водному середовищі [4-6].

У процесі рідинного розмелювання у воді відбувається руйнування структури текстильного матеріалу, що супроводжується виокремленню волокон [4, 6.]. Згідно з сучасними фізико-хімічними уявленнями, в результаті цього утворюється двофазна система [5], у якій частина матеріалу зберігає зв'язок з волокнами, здатними акумулювати значну кількість води [6]. Така структура є стабільною лише до певного ступеня диспергування, після чого можливе руйнування на мікроскопічні частинки [4].

Для забезпечення ефективного розволокнення текстильних відходів необхідно дотримуватися оптимальної концентрації оброблюваної маси. Надмірне розбавлення призводить до надмірного

подрібнення і формування дуже коротких волокон. У промисловості здебільшого застосовуються конічні роли та дискові млини. Їх робота базується на подрібненні й розтягуванні волокнистої маси між робочими поверхнями [7-9].

Останнім часом значного поширення набула гідродинамічна кавітаційна обробка двофазних суспензій, що дозволяє суттєво зменшити енерго- та ресурсовитрати при дезінтеграції матеріалу. Існує багато теорій щодо механізму дії кавітації, проте вони часто суперечать одна одній і потребують подальших досліджень [4-6].

На сьогодні більшість науковців підтримують концепцію, що кавітаційний вплив реалізується переважно через механічну дію. Саме в цьому контексті розглядатиметься підхід до гідродинамічного розволокнення текстильних відходів.

Припустимо, що дезінтеграція волокон текстильного матеріалу зумовлене імпульсним тиском гідродинамічних ударів і проникненням кумулятивних струменів у міжволоконний простір кавітаційних бульбашок та їх схлопуванням у ньому. Крім наведених міркувань, у процесі викладення матеріалу будуть розглянуті також додаткові припущення.

Математична модель процесу.

При впливі кавітаційної бульбашки, що схлопнулася, на частинку текстильного матеріалу, виникає ударне зусилля, яке перевищує когезійну міцність волокон текстилю. При цьому контактне зусилля кумулятивного струменя на текстильний матеріал можна представити схематично таким чином (рис.1) [10].

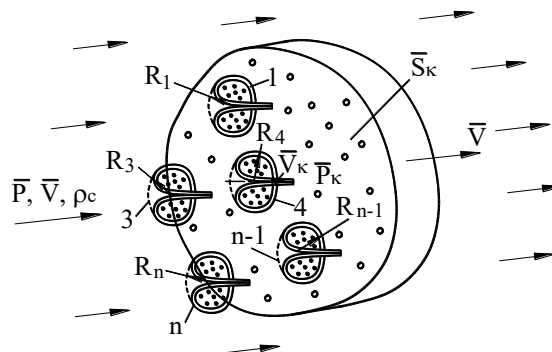


Рис. 1. Початковий розподіл тиску при гідродинамічному руйнуванні текстильного матеріалу [10, 11]:

1, 2, 3, ..., n - 1, n – кавітаційні бульбашки;

v_k, v – відповідно швидкість кавітаційної струминки і елемента волокнистого середовища площею S_k ; p, p_k – тиск відповідно суспензії і кавітаційної струминки.

Рівняння для визначення зусилля кумулятивного струменя можна представити згідно з [11, 14] у такий спосіб:

$$p = \frac{1}{2} \rho_k (v_k - v)^2, \quad (1)$$

де v – швидкість руху контактної поверхні, ρ_k – густина рідини в кумулятивній струминці, v_k – швидкість кумулятивної струминки.

Як показано в роботах [4, 6], за умов кумулятивного впливу текстильний матеріал проявляє властивості в'язкої рідини, тому для частинок цього матеріалу можна застосувати рівняння Бернуллі [11].

$$p = \frac{1}{2} \rho_c v^2 + \sigma_T, \quad (2)$$

де ρ_c – густина в'язкої рідини; σ_T – границя текучості текстильного матеріалу.

Оскільки в кожен момент часу має місце рівність тисків, прирівнюємо вирази (1) і (2), в результаті чого отримуємо:

$$\frac{1}{2} p = \rho_k (V_k - V)^2 = \frac{1}{2} \rho_c V^2 + \sigma_T. \quad (3)$$

Розв'язавши рівняння (3) відносно швидкості частинки, яка вступає в контакт, знаходимо:

$$v = \frac{1}{1-v} \left(v_k - v \sqrt{\frac{v_k^2 + A}{v}} \right), \quad (4)$$

$$\text{де } v = \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_k}}; \quad A = \frac{2\sigma_T(1-v)}{\rho_c}.$$

Припустимо, що дія кумулятивного струменя на частинку текстильного матеріалу ідентична впливу клину на в'язкопружне середовище. Відповідно до цього припущення, проаналізуємо рух межі контакту середовища зі струменем. Поверхня в'язкопружного середовища, що контактує з клиноподібним струменем та перпендикулярна до осі струменя, за інтервал часу dt зміщується на величину $dl_b = Vdt$ (l_b – глибина проникнення клину).

Як початковий механізм будемо розглядати схлопування кавітаційної бульбашки [4-6, 10], при якому кумулятивний струмінь, утворений протягом часу dt , зменшує свій радіус з $2R$ до $2r$ та

видовжується на величину $dl_c = V_k dt$. Тоді тривалість проникнення клину у середовище визначатиметься так:

$$dt = \frac{dl_b}{v} = \frac{dl_c}{v_k}. \quad (5)$$

Глибина проникнення струменя у матеріал визначатиметься інтегруванням (5) за довжиною проникнення:

$$l_b = \int_{2r}^{2R} \frac{v}{v_k} dl_c. \quad (6)$$

Швидкості v та v_k залежать від динаміки схлопування бульбашки та визначають ефективність процесу кавітаційного руйнування волокнистого середовища.

Підставивши вираз для v і (4) у формулу (6), отримаємо вираз для визначення глибини проникнення струменя у текстильний матеріал:

$$l_b = \int_{2r}^{2R} \frac{1}{1-v} \left(v_k - v \sqrt{\frac{v_k^2 + A}{v}} \right) dl_c. \quad (7)$$

Інтегрування формули (7) дає змогу обчислити глибину проникнення струменя l_b у текстильний матеріал при пружно-пластичному зіткненні, коли контакт відбувається по всій довжині струменя, яка дорівнює початковому радіусу бульбашки $l_c = 2R$.

Під мінімальним радіусом при повному схлопуванні мається на увазі найменший діаметр кумулятивного струменя у зоні зіткнення з фрагментом текстильного матеріалу. Місцеве руйнування матеріалу відбудеться, якщо глибина проникнення l_b перевищить або буде дорівнювати її середньому поперечному розміру в напрямку дії струменя. Оскільки міжволоконний простір має значно меншу міцність, ніж текстильні волокна [12], кумулятивні струмені переважно спрямовані на руйнування саме цієї частини структури.

У сучасних кавітаційних установках діаметри кавітаційних бульбашок можуть коливатися в межах до 50 мм, а їх кількість - від 1 тис. до 30 млн. за секунду через 1 см² поперечного перерізу потоку. Схлопування бульбашок породжують кумулятивні мікрострумені з діаметрами від 5 до 200 мкм і тиском до 1,5 ГПа при швидкості струменя до 1,5 км/с [12].

Жодна механічна система розволокнення не здатна забезпечити подібний рівень впливу на волокнисту структуру текстильного матеріалу. Тому для ефективного розволокнення текстильних відходів при відомих середніх розмірах волокон необхідно створювати в кавітаційному пристрої бульбашки радіусу $R = l_c$, щоб глибина проникнення l_b перевищувала товщину матеріалу h_k . У цьому випадку глибина проникнення струменя зі швидкістю v_k у текстильний матеріал дорівнюватиме:

$$l_b = \int_{2r}^{2R} \frac{2v_k}{(1-v)} \left(1 - \sqrt{v \left(1 + \frac{A}{v_k^2} \right)} \right) dR. \quad (8)$$

Аналізуючи рівняння (6) та (8), можна припустити, що руйнівний вплив на глибину проникнення струменів у текстильний матеріал мають: швидкість кавітаційних бульбашок v_k , ударне зусилля p у момент зіткнення і границя текучості текстильного матеріалу σ_T .

Для визначення розподілу тиску, що впливає на елемент із типовими геометричними характеристиками, використаємо наступне рівняння [10, 12]:

$$\frac{\partial P(x, y, z, t)}{\partial t} - \gamma P(x, y, z, t) = \frac{4}{bc} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \bar{R}(x) \sin \psi_n y \right\} \sin \lambda_n z, \quad (9)$$

Для того, щоб розв'язати рівняння (9), потрібно задати початковий розподіл тиску $P_0(x, y, z)$ в зоні дії кавітаційного пристрою. В усталеному режимі розподіл тиску (9) можна визначити таким чином:

$$P_0(x, y, z) = P_K = \frac{2\rho_c(V_K - V)^2 \bar{S}_K}{\pi R_K^2}, \quad (10)$$

де $\bar{S}_K$ – усереднена площа текстильних обрізків, які підлягають розволокненню (див. рис. 1); R_K – радіус кавітаційної бульбашки, що утворюється внаслідок роботи кавітаційного пристрою.

Компоненти швидкості, з якою суспензія проникає у міжволоконну область $V_K - V$, визначаються за такими співвідношенням:

$$V_x = -\frac{k_x}{\eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \cdot \frac{\zeta}{1+\zeta}; \quad V_y = -\frac{k_y \zeta}{\eta(1+\zeta)} \cdot \frac{\partial P}{\partial y}; \quad V_z = -\frac{k_z \zeta}{\eta(1+\zeta)} \cdot \frac{\partial P}{\partial z}; \quad (11)$$

де k_x, k_y, k_z – коефіцієнти, що визначають здатність волокнистої структури текстильного матеріалу пропускати рідину вздовж координатних осей x, y, z ; ζ – коефіцієнт пористості текстильного матеріалу.

Визначення основних параметрів процесу гідродинамічного руйнування текстильного матеріалу

Аналітичні вирази, розроблені у попередньому розділі, дають змогу оцінити основні технологічні параметри процесу гідродинамічного руйнування текстильних матеріалів. Зокрема, визначається глибина проникнення кавітаційного струменя у волокнисту структуру текстильного матеріалу залежно від його типу та швидкості струменя, що утворюється при схлопуванні кавітаційної бульбашки.

На рис. 2 наведено графік залежності глибини проникнення струменя від його швидкості, що дозволяє встановити максимально допустиму товщину текстильного матеріалу для ефективного руйнування його структури при заданих параметрах.

З графіка (рис. 2) видно, що для забезпечення результативного розщеплення текстильних матеріалів на волокна за допомогою гідродинамічного кавітатора, їх товщина не повинна перевищувати певного граничного значення.

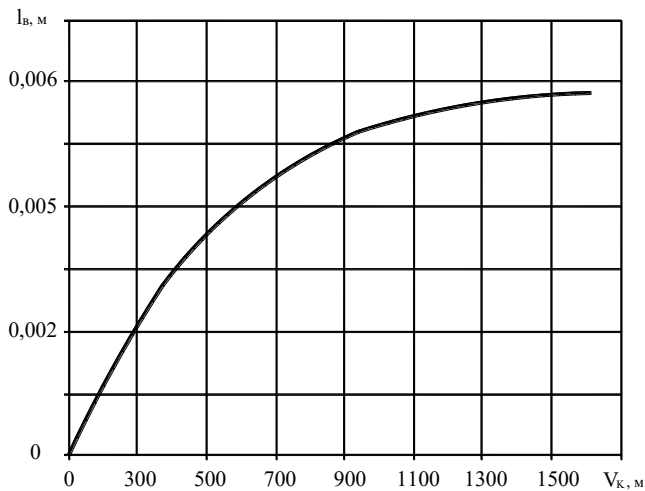


Рис. 2. Графік залежності глибини проникнення струменя у тканину від кумулятивної швидкості

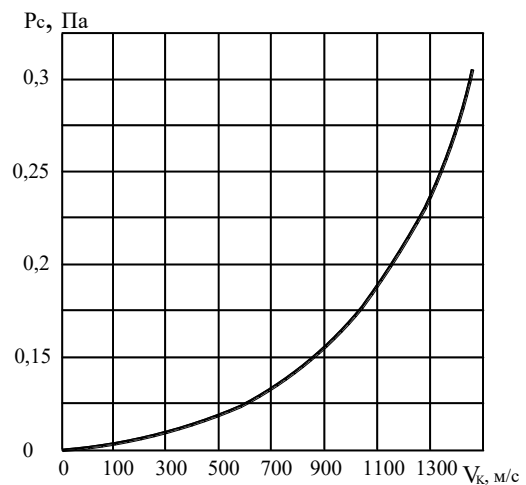


Рис. 3. Залежність тиску P_c в каналі розволокнювача від швидкості струменя V_k

З метою забезпечення технологічного резерву за швидкістю струменя, оптимальним вважається інтервал швидкостей у межах 1200...1400 м/с. Цей діапазон забезпечує ефективне проникнення струменя в текстильний матеріал.

У випадку обробки тонких фракцій текстильних відходів товщина яких не перевищує 1,5 мм, доцільно застосовувати струмені з кумулятивною швидкістю в діапазоні $v_k = 200 \dots 400$ м/с.

Зниження швидкості більш ніж утричі позитивно впливає на зменшення робочого тиску в каналі кавітатора, що, у свою чергу, дозволяє знизити енергоспоживання і водночас підвищити продуктивність системи руйнування матеріалу.

На рис. 3 наведений графік залежності тиску у каналі кавітаційного пристрою з круглим кавітатором від величини швидкості струменя. Ця залежність отримана на основі рівняння (10).

Зіставлення результатів з рис. 2 і 3 дозволяє зробити висновок, що оптимальний робочий тиск у каналі розволокнювача для руйнування текстильних матеріалів товщиною 1,5...2 мм становить 0,25...0,35 МПа. Для текстильних матеріалів з товщиною, меншою за 1,5 мм найбільш ефективним буде діапазон тисків у межах 0,01...0,05 МПа.

При обчисленні в'язкості суспензії, що піддається розщепленню, використовується формула Епштейна [4]:

$$\eta = \eta_1 (1 + k_E \xi), \quad (12)$$

де η_1 – в'язкість рідкої фази; k_E – емпіричний коефіцієнт Епштейна; ξ – коефіцієнт об'ємної концентрації твердих включень (частинок текстилю)

Вирішуючи рівняння (9), з урахуванням проникності волокнистого середовища, отримаємо рішення задачі про зміну тиску кавітаційної струминки P_k та тиску в каналі кавітаційного розволокнювача P_c залежно від об'ємного наповнення суспензії.

Сталі, що враховують проникність текстильного матеріалу, визначатимемо, відповідно до [Ста або дис. Скиби], за такими рівняннями:

$$\alpha_x = \frac{k_x \rho_c}{\eta}; \quad \alpha_y = \frac{k_y \rho_c}{\eta}; \quad \alpha_z = \frac{k_z \rho_c}{\eta}. \quad (13)$$

де ρ – густина суспензії.

На рис. 4 зображено вплив ступеня заповнення суспензії на відносну зміну тиску: крива 1 – показує відносну зміну тиску струменя; крива 2 – зміну тиску у каналі кавітаційного пристрою. Точками (●) позначено експериментальні дані щодо зміни тиску в каналі [12].

Аналіз результатів, поданих на рис. 4, свідчить про те, що зі збільшенням об'ємної концентрації частинок текстилю у суспензії, за умови фіксованої геометрії каналу та використання круглого кавітатора, тиск у кавітаційній струмині P_k знижується відносно теоретичного значення для чистої рідини P_k^T . Це пояснюється зростанням в'язкості суспензії η , що, своєю чергою, спричиняє зменшення швидкості струменя v_k та, відповідно, зниження створюваного ним тиску.

Одночасно підвищення в'язкості η через збільшення концентрації твердих частинок ускладнює рух потоку в каналі, що призводить до збільшення робочого тиску системи в порівнянні з випадком обробки чистою рідиною. Експериментальні дані підтверджують: у розпилювачах прохідного типу [12] спостерігається зростання робочого тиску в межах похибки 5...12 %.

Точка перетину графіків (позначена як точка А на рис. 4) вказує на оптимальний рівень об'ємного наповнення, при якому не спостерігається суттєвого зниження тиску струменя або зростання робочого тиску – тобто забезпечується найефективніший режим розволокнення.

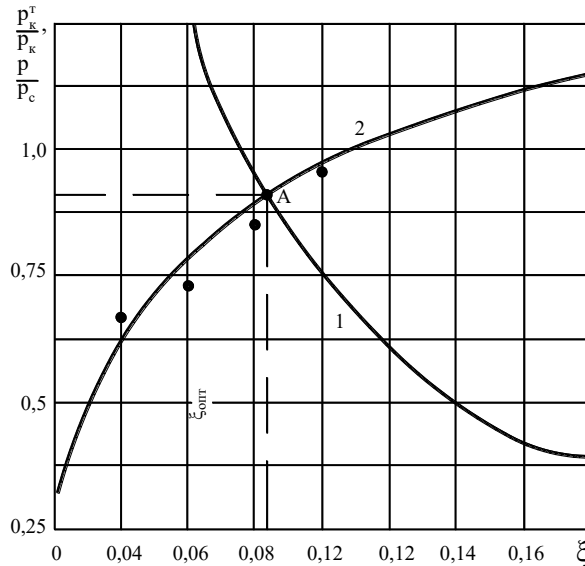


Рис. 4. Залежність зміни відносного тиску кавітаційного струменя (крива 1) та тиску в каналі кавітаційного розволокнювача (крива 2) від рівня об'ємного наповнення суспензії шматками текстильного матеріалу

Отримані результати добре корелюють із практичними даними подрібнення відходів на вальцях [7].

Чисельне моделювання процесу кавітаційного розщеплення текстильних відходів відкриває можливості для детального дослідження динаміки потоку рідини з домішками у внутрішньому об'ємі кавітаційного розволокнювача. Такий підхід дозволяє точно визначати як оптимальні режими роботи, так і конструктивні характеристики обладнання, що забезпечують ефективну дезінтеграцію текстильних волокон [4, 6].

Ефективність розщеплення текстильного матеріалу значною мірою визначається параметрами як процесу, так і пристрою, в якому він реалізується. Аналіз цих чинників можливий лише шляхом моделювання руху середовища, яке містить частинки текстилю (далі – «в'язка рідина» або «в'язка суспензія»), у робочій камері пристрою.

Питання математичного опису руху в'язких середовищ висвітлювались у низці наукових досліджень. Зокрема, варто згадати праці [12, 13, 14], які запропонували методики розрахунку одномірних течій. Проте запропоновані ними моделі не придатні для опису процесів у просторово складній геометрії кавітаційних пристроїв, що унеможливило їх використання для аналізу кавітаційного розщеплення текстильних відходів.

Для опису руху в'язкої рідини в порожнині розволокнювача доцільно використовувати рівняння Нав'є-Стокса для тиску в циліндричній системі координат [10], записаного у скінченорізницевої формі. Відповідно до [12, 14], це рівняння набуває такого вигляду:

$$p_{i,j} = \frac{1}{4} \cdot \left[\left(\frac{2r_{j-h}}{2r_j} p_{i,j-1} + \frac{2r_{j+h}}{2r_j} p_{i-1,j} + p_{i,j+1} + p_{i,j-1} \right) - v \left(\frac{2r_{j-h}}{2r_j} D_{i,j-1} + \frac{2r_{j+h}}{2r_j} D_{i-1,j} + D_{i,j+1} + D_{i,j-1} \right) \right]. \quad (14)$$

де r_j – радіус кавітаційного струменя в поточні комірці, $p_{i,j+1}$, $p_{i,j-1}$ – тиск в комірці зверху та знизу, відповідно; $p_{i-1,j}$, $p_{i+1,j}$ – тиск в комірці ліворуч та праворуч, відповідно; $D_{i,j+1}$ – дивергенції векторів швидкостей, відповідно, в комірці зверху, знизу, праворуч та ліворуч; h – крок (або розмір комірки).

Перепишемо вираз (14) із врахуванням граничних умов біля твердих стінок, осі симетрії і границь втікання [12, 14]:

$$p_{i,j} = p_{i+1,j} + \frac{v}{h} \cdot \left[\left(\frac{r_{j+1}r_{j-1}}{r_j^2} + 2 \right) u_x - \frac{r_{j+1}}{r_j} u_x^{j+1} - \frac{r_{j-1}}{r_j} u_x^{j-1} - 2u_{i+1,j} \right], \quad (15)$$

де $u_x^{i,j+1}$, $u_x^{i,j-1}$ визначаються з рівняння, шляхом підстановки значення j :

$$u_x = \frac{4Q}{\pi \cdot D^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{2r}{D} \right) \right], \quad (16)$$

де r – радіус кавітаційного струменя, м; D – діаметр впускного каналу, м; Q – об'ємна витрата в'язкої суспензії, м³/с.

Запропонований у статті чисельний підхід до моделювання кавітаційного процесу переробки текстильних відходів дозволяє глибше зрозуміти особливості руху в'язкої рідини всередині робочої камери кавітаційного апарата. Застосування цього методу забезпечує можливість точного визначення ключових технологічних та конструктивних параметрів, що впливають на ефективність процесу кавітаційного руйнування текстильного матеріалу.

Варіювання основних параметрів кавітаційної обробки дозволяє здійснювати оптимізацію конструкції устаткування (рис. 5) для розщеплення текстильних відходів на волокна. Правильно підібрані технічні режими в поєднанні з оптимальною конструкцією пристрою дозволять забезпечити отримання волокнистої маси високої якості завдяки зменшенню ймовірності руйнування волокон.

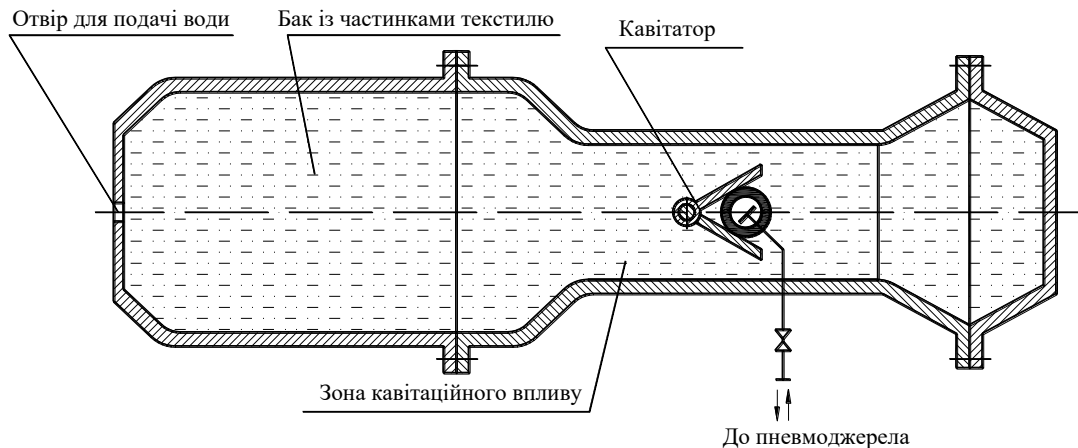


Рис. 5. Кавітаційний пристрій

Особливо вагомим чинником, що впливає на результат розщеплення, є форма і розміри кавітаційної вставки. Зміна її форми здатна суттєво впливати на розвиток гідродинамічних процесів, а також на інтенсивність та якість розволокнення. Саме геометричні особливості кавітатора мають найвагомійший вплив на характер утворення довгих волокон і зниження рівня надмірної дефібриляції.

Для вивчення впливу форми і розмірів кавітатора на перебіг процесу кавітації планується проведення чисельного моделювання потоку рідини з текстильними частинками в робочій зоні пристрою.

Висновки

Запропонована концепція і побудована модель гідродинамічного розволокнення відходів текстильних матеріалів, що ґрунтується на кавітаційному механізмі проникнення кумулятивних струменів у міжволоконний простір. При впливі кавітаційної струминки на частинку текстильного матеріалу, яка знаходиться в завислому стані в суспензії, виникає ударний тиск, що долає не тільки когезійну міцність текстилю, але й енергію її руху.

На основі припущення про вплив на частинку текстильного матеріалу кумулятивного струменя як рідинного клину на в'язкопружне середовище, отримане рівняння, що дозволяє визначити глибину проникнення кавітаційної струминки в частинку волокнистого середовища за умови пружно-пластичного удару, коли частинка торкається бульбашки, а зіткнення відбувається по довжині струминки, яка дорівнює початковому радіусу бульбашки.

Аналітично встановлено, що вирішальний вплив на глибину проникнення кумулятивних струменів у товщу текстильного матеріалу мають швидкість руху частинок суспензії, контактний тиск у момент зіткнення і пластичні властивості матеріалу частинок.

Література

1. Tang, K. H. D. (2023). State of the art in textile waste management: A review. *Textiles*, 3(4), 454–467. <https://doi.org/10.3390/textiles3040027>
2. Lamtai, A., Elkoun, S., Robert, M., Mighri, F., & Diez, C. (2023). Mechanical recycling of thermoplastics: A review of key issues. *Waste*, 1(4), 860–883. <https://doi.org/10.3390/waste1040050>
3. Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24–58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
4. Dzido, A., Walczak, J., Jankowska, H., Krawczyk, P., Özbayram, E. G., & Żubrowska-Sudoł, M. (2024). Hydrodynamic disintegration effects assessment by CFD modelling integrated with bench tests. *Journal of Environmental Management*, 367, 121948. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121948>