

ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

УДК 69.002.5

Гамеляк І.П., д-р техн. наук, Бауман К.В., Коц І.В., канд. техн. наук

КІНЕТИКА УТВОРЕННЯ БІТУМНОЇ ЕМУЛЬСІЇ В УСТАНОВЦІ З КАВІТАЦІЙНИМ ДИСПЕРГАТОРОМ

Анотація. Досліджена кінетика емульгування бітуму у кавітаційній бітумно-емульсійній установці. Виконано математичне моделювання та встановлена аналітична залежність між конструктивними параметрами устаткування й технологічними параметрами процесу приготування та фізико-механічними властивостями отриманої бітумної емульсії. На основі експериментальних досліджень встановлені уточнюючі коефіцієнти математичної моделі процесу емульгування бітуму в запропонованій кавітаційній установці.

Ключові слова: бітумна емульсія, кавітація, математична модель, дисперсність, число кавітації.

Аннотация. Исследована кинетика эмульгирования битума в кавитационной битумно-эмульсионной установке. Установлена аналитическая зависимость между конструктивными параметрами оборудования, технологическими параметрами процесса приготовления и физико-механическими свойствами полученной битумной эмульсии. Рассмотрена математическая модель рабочего процесса эмульгирования битума в предложенной кавитационной установке, в основу которой положены ряд допущений, а также исходные и граничные условия, базирующиеся на основе проведенных экспериментальных исследований.

Ключевые слова: битумная эмульсия, кавитация, математическая модель, дисперсность, число кавитации.

Annotation. The kinetics of bitumen emulsification by emulsified bitumen plant is investigated. The mathematical modeling is executed. The analytical dependence of structural parameters of equipment and technological parameters of preparations process and physic-mechanical properties by emulsified bitumen are developed. The adjusted factors of mathematical model of process of making of emulsified bitumen by the new cavitation technologies from the experiments are developed.

Key words: emulsified bitumen, cavitation, a mathematical model, dispersion, a cavities number.

Постановка проблеми. Кавітація – розрив суцільності рідини під дією градієнта тиску, або швидкості у більшості технологічних процесів є небажаним явищем [1]. Але руйнівні властивості кавітації останнім часом почали застосовувати для інтенсифікації деяких технологічних процесів, зокрема, диспергування взаємно нерозчинних речовин. В лабораторії гідродинаміки ВНТУ розроблене устаткування для приготування бітумних емульсій, принцип роботи якого полягає у створенні вимушеної кавітації [2], супутні гідродинамічні чинники (фізичної та хімічної природи) [4] якої дозволяють емульгувати бітум у водному розчині поверхнево-активних речовин.

Для підтвердження ефективності запропонованого устаткування та виявлення залежностей між конструктивними параметрами устаткування, технологічними параметрами процесу приготування та фізико-механічними властивостями отриманої бітумної емульсії необхідно виконати дослідження кінетики утворення бітумної емульсії в кавітаційному диспергаторі запропонованої установки для приготування бітумних емульсій.

Аналіз останніх досліджень. Основним параметром, що характеризує процес кавітації є число кавітації [1], фізичний зміст якого полягає у співвідношенні перепаду тиску, який призводить до схлопування кавітаційної каверни, до швидкісного (динамічного) тиску цього потоку:

$$\chi = 2 \frac{P_3 - P_n}{\rho_c V_2^2}, \quad (1)$$

де p_3 – абсолютний тиск, Па; p_n – тиск насиченої пари, Па; ρ – густина сировини, кг/м³; v_2 – швидкість потоку рідини на виході з найвужчої ділянки кавітаційного диспергатора, м/с.

Зміна тиску на поверхню тіла або на стінки будь-якого обмежуючого потік рідини каналу, в основному пов'язана із зміною швидкості течії. Таким чином, швидкісний тиск можна розглядати як параметр, що визначає величину падіння тиску, внаслідок чого відбувається утворення та зростання каверни. Таким чином, число кавітації це співвідношення тиску, під дією якого відбувається схлопування кавітаційної каверни, до тиску який призводить до її утворення та зростання.

Формулювання мети і задач дослідження. Метою теоретичного дослідження робочого процесу емульгування бітуму за допомогою кавітаційного диспергатора запропонованої конструкції при виготовленні будівельної продукції, а саме бітумної емульсії, є: дослідження умов виникнення та розвитку кавітації у кавітаційному диспергаторі, розроблення моделі динаміки робочого процесу емульгування бітуму, вибір узагальнених функціональних залежностей, що дозволяють здійснювати вибір раціональних режимів та конструктивних параметрів вузла емульгування, аналіз за допомогою чисельного експериментування впливу параметрів та характеристик установки для приготування бітумної емульсії на характеристику вихідного матеріалу – бітумної емульсії.

Виклад основного матеріалу. При розробці математичної моделі робочого процесу приготування бітумної емульсії за допомогою кавітаційного диспергатора запропонованої конструкції були прийняті такі припущення: процес адіабатний; враховуючи незначну, порівняно з бітумом та водою, кількість соляної кислоти та емульгатора, вплив останніх на реологічні властивості суміші не враховуються; втрати тиску по довжині не враховуємо; приймаємо коефіцієнт кінетичної енергії потоку (коефіцієнт Коріоліса) $\alpha=1$ [3]; стисливістю робочої рідини нехтуємо; тиск насиченої пари для компонентів обирається згідно [3] в залежності від температури; густина кожного з компонентів та їх суміші залежить від фізико-механічних властивостей рідини і від температури [3].

Процес емульгування бітуму у водному розчині складових компонентів емульсії у запропонованій установці для приготування бітумних емульсій

відбувається так [2]: після рівномірного розподілення складових компонентів у потоці сировини, яке відбувається у статичному змішувачі, вона надходить до конфузорної частини 1 кавітаційного диспергатора (рис. 1), в якій відбувається поступове звуження потоку і, як наслідок, збільшується швидкість руху потоку, а отже тиск поступово зменшується.

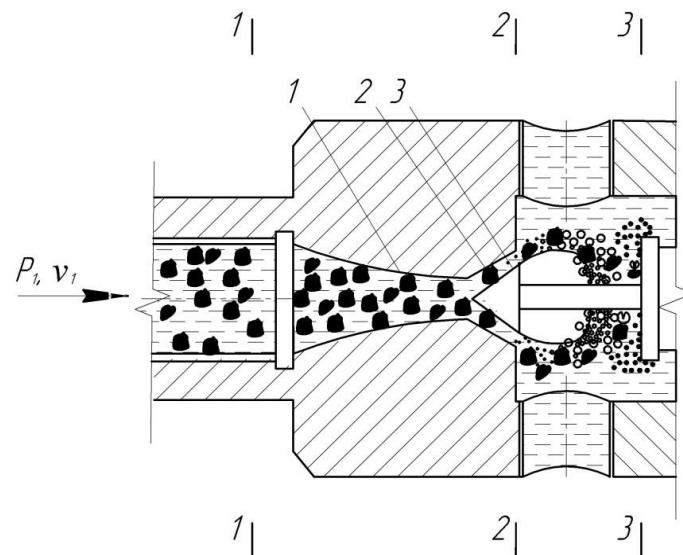


Рисунок 1 – Схема отримання бітумної емульсії в кавітаційному диспергаторі запропонованої конструкції

Далі потік змішаних компонентів із замкнутими локальними зонами кипіння водної складової, тому що відбувається змішування гарячого бітуму з температурою до 150°C і води з температурою приблизно 50°C , надходить у дифузійну частину 2 кавітаційного диспергатора, в якій влаштований конусоподібний робочий орган 3 кавітатора таким чином, що утворений зазор між внутрішньою поверхнею дифузійної частини 2 та зовнішньою поверхнею робочого органу диспергатора 3, забезпечує подальше падіння тиску до деякого критичного значення (до тиску насиченої пари для даної рідини). В рідині, що потрапляє у зону критичного тиску, відбувається подальша інтенсифікація процесу кипіння – утворення парогазових бульбашок (кавітація), які рухаються далі і при потраплянні у зону підвищеного тиску (за вузлом емульгування) інтенсивно схлопують. Крім того, щодо швидкості потоку, яку необхідно забезпечити для отримання кавітації, то слід зауважити, що запропонований багатостадійний процес поступового послідовного попереднього змішування у статичному змішувачі дозволяє мінімізувати витрати енергії на диспергацію.

Схлопування бульбашок відбувається в потоці за кавітатором, в результаті різкого зниження тиску в рідкій фазі, при цьому бульбашки розриваються зсередини. Виникаючі при цьому кумулятивні ефекти та інтенсивний теплообмін, забезпечує гасіння можливого спінювання. Ряд відомих чинників супутніх кавітації [4] також сприяють якісному диспергуванню бітуму у водному розчині ПАВ.

Швидкість проходження потоку рідини через зазор, утворений внутрішньою поверхнею конфузорної частини та поверхнею робочого органу кавітаційного диспергатора, визначається за формулою:

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{S_2^2}{S_1^2} (\xi_m - 1)}} \sqrt{2g \frac{p_1 - p_2}{\gamma}}. \quad (2)$$

де S_1, S_2 – площа поперечного перерізу прохідних отворів диспергатора 1-1 та 2-2, м²; p_1, p_2 – абсолютний тиск в перерізах 1-1 та 2-2, Па; ξ_m – коефіцієнт місцевого опору.

Коефіцієнт витрат визначаємо за формулою:

$$\mu_1 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{S_2^2}{S_1^2} (\xi_m - 1)}}. \quad (3)$$

У нашому випадку p_1 – абсолютний тиск в диспергаторі, p_2 – атмосферний тиск, різниця цих тисків дає нам надлишковий тиск p_m .

$$v_2 = \mu_1 \sqrt{2g \frac{p_m}{\gamma}}. \quad (4)$$

При розгляді перерізу 3-3 отримаємо значення абсолютного тиску p_3 , при якому відбувається схлопування парогазових бульбашок:

$$p_3 = \frac{\rho_c v_3^2}{2}, \quad (5)$$

де v_3 – швидкість руху потоку сировини в перерізі 3-3, м/с.

Оскільки відстань між перерізами 2-2 та 3-3 мала, то припустимо, що $v_3 \cong v_2$. Підставимо в (1) рівняння (5) та (4):

$$\chi = 1 - \frac{p_n \gamma}{\rho_c \mu_1^2 g p_m}. \quad (6)$$

Потім, підставляючи вираз (3) в рівняння (6), отримаємо наступне:

$$\chi = 1 - \frac{p_n \left(1 - \frac{S_2^2}{S_1^2} (\xi_m - 1)\right)}{p_m}. \quad (7)$$

З аналізу рівняння (7) видно, що із збільшенням тиску в системі p_m число кавітації збільшується. Окрім того, відбувається збільшення числа кавітації із збільшенням площі зазору між робочим органом та внутрішньою поверхнею дифузornoї частини диспергатора.

Розглянемо реальний процес приготування бітумної емульсії в кавітаційному диспергаторі коли параметри процесу наступні: тиск насиченої пари низькокиплячого компонента (води) при температурі потоку сировини $T=90^\circ$ [3], $p_n = 70927,5$ Па; площа поперечного перерізу вхідного патрубку конфузорної частини диспергатора, $S_1 = 0,000804$ м²; густина бітуму при нагріванні наближається до густини водного розчину емульгатора, на підставі проведених дослідів приймаємо густину механічної суміші вхідних компонентів сировини, $\rho_c = 1000$ кг/м³; із врахуванням наявних між перерізами 1-1 та 3-3 місцевих опорів: поступове звуження потоку, раптове звуження потоку та раптове розширення потоку, згідно [5] $\xi_m = 1,44$.

На основі цих даних можна побудувати залежність числа кавітації χ від тиску в системі p_m (рис. 2) та числа кавітації χ від площі зазору між робочим

органом та внутрішньою поверхнею дифузорної частини кавітаційного диспергатора S_2 (рис. 3).

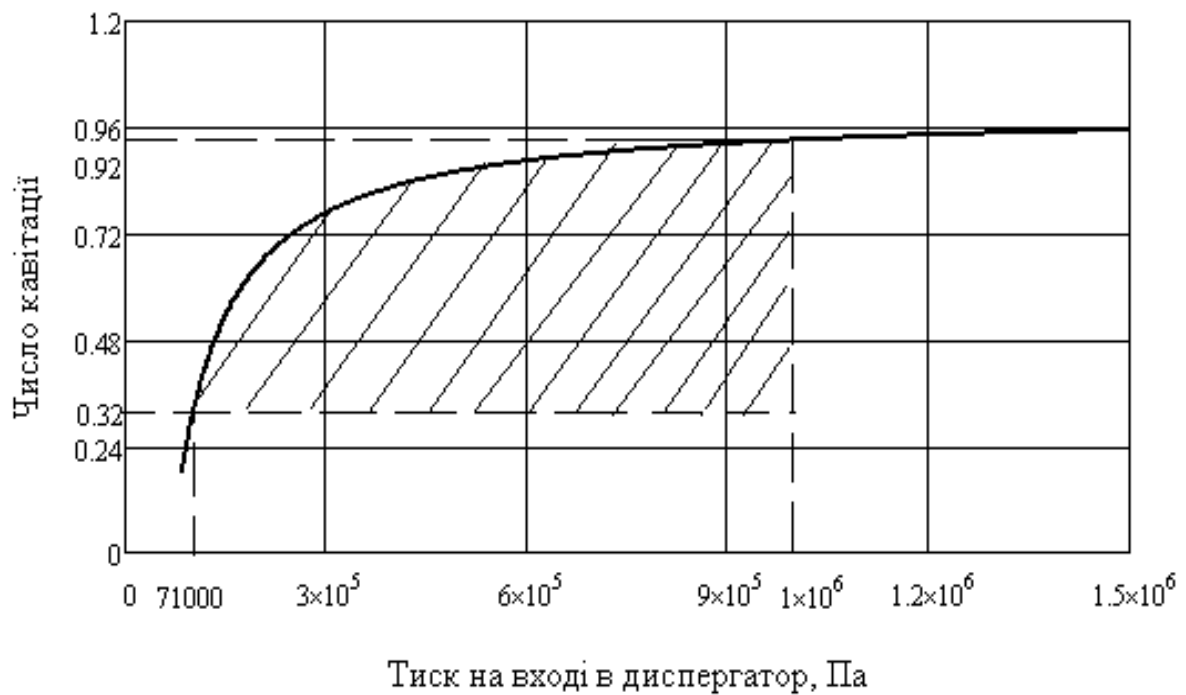


Рисунок 2 – Залежність числа кавітації від тиску на вході в диспергатор

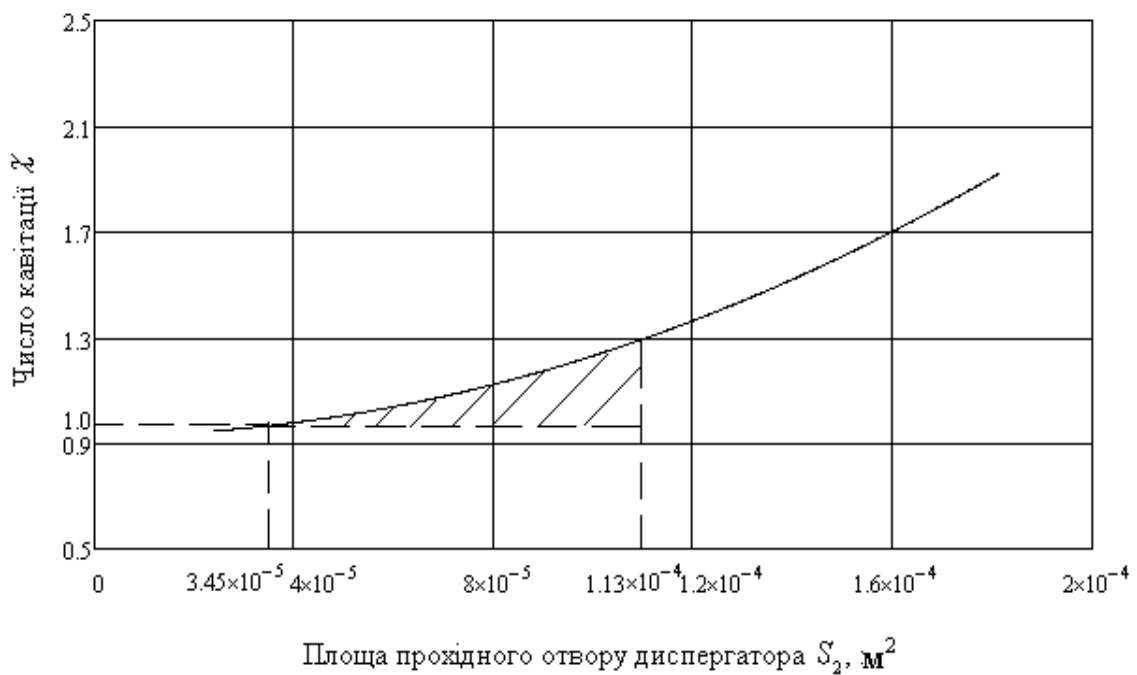


Рисунок 3 – Залежність числа кавітації від площі прохідного отвору диспергатора

Збільшення числа кавітації χ при збільшенні тиску на вході у вузол диспергування та збільшенні зазору між робочим органом та внутрішньою поверхнею дифузornoї частини диспергатора, пояснюється зростанням швидкості витоку сировини через переріз 2-2.

Знайдемо швидкість руху сировини через переріз 1-1:

$$v_1 = \frac{v_2 S_2}{S_1}. \quad (8)$$

Підставимо вираз (4) в (8) і отримаємо наступну залежність:

$$v_1 = \frac{\mu_1 S_2}{S_1} \sqrt{2g \frac{P_m}{\gamma}}. \quad (9)$$

Як зазначалося в [6] «...Якість емульсії, за інших однакових умов, визначається її дисперсністю, тобто розміром дисперсної фази. Висока дисперсність бітуму в дорожніх емульсіях і пастах обумовлює їх стійкість і суттєво впливає на основні технологічні властивості – в'язкість, швидкість розпаду, однорідність, товщину плівки в'язучого та зчеплення з мінеральними матеріалами...».

Аналіз попередніх досліджень показав, що прямої залежності між числом кавітації та дисперсністю отриманої за допомогою цієї кавітації емульсії не встановлено. Попередні експериментальні дослідження показали, що крива залежності між дисперсністю та числом кавітації має вигляд параболи, що обмежена граничними умовами. Отже, залежність між числом кавітації та розміром частинок бітуму можна наближено виразити квадратичним рівнянням:

$$d_{ч1} = ax^2 + bx + c, \quad (10)$$

де a , b , c – коефіцієнти, що визначаються експериментально, м; x – число кавітації.

Підставимо (7) в (10):

$$d_{\text{ч1}} = a \cdot \left[1 - \frac{p_{\text{н}} \left(1 - \frac{S_2^2}{S_1^2} (\xi - 1) \right)}{p_{\text{м}}} \right]^2 + b \cdot \left[1 - \frac{p_{\text{н}} \left(1 - \frac{S_2^2}{S_1^2} (\xi - 1) \right)}{p_{\text{м}}} \right] + c. \quad (11)$$

Згідно з [7], коефіцієнти a , b , а також вільний член c залежності (11), які встановлюються експериментально, можна визначити за формулами:

$$a = \frac{y_3 - \frac{x_3(y_2 - y_1) + x_2 y_1 - x_1 y_2}{x_2 - x_1}}{x_3(x_3 - x_1 - x_2) + x_1 x_2}, \quad b = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} - a(x_1 + x_2), \quad c = \frac{x_2 y_1 - x_1 y_2}{x_2 - x_1} + a x_1 x_2,$$

де x_1, x_2, x_3 – абсциси трьох будь-яких точок, що знаходяться на експериментальній кривій; y_1, y_2, y_3 – відповідно ординати цих точок.

Наприклад, згідно експериментальних даних залежність дисперсності від площі прохідного отвору диспергатора при сталому тиску $P = 0,9$ МПа та розміру частки бітуму в емульсії $n = 60\%$ наведена на рис. 4.

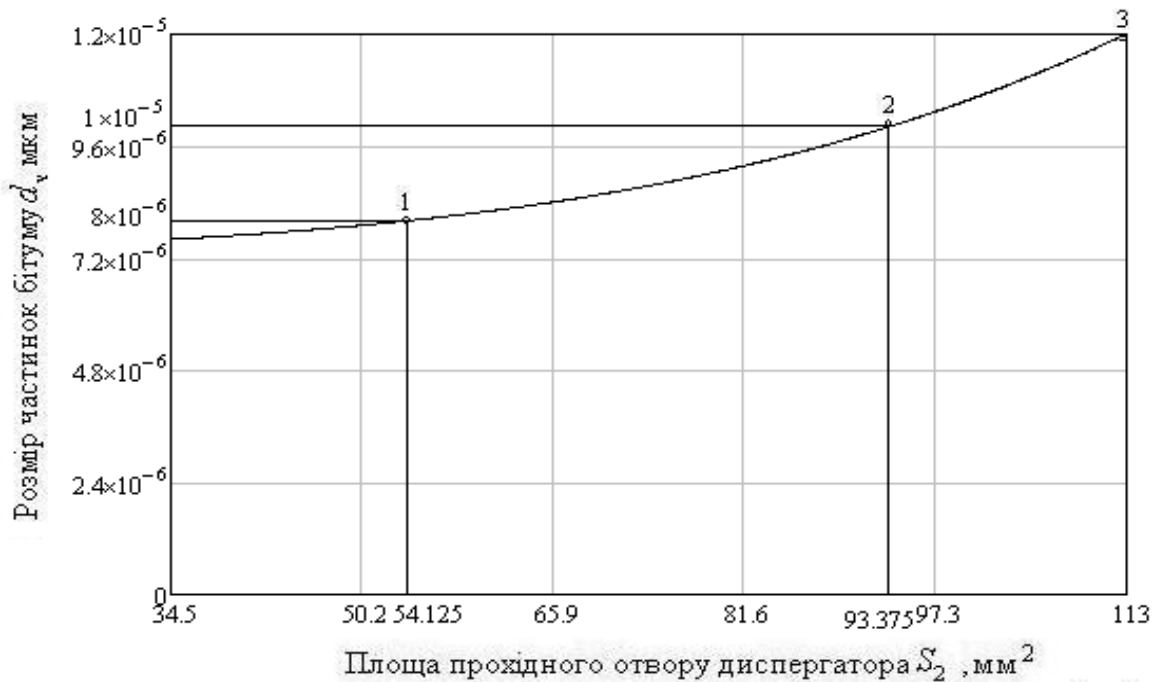


Рисунок 4 – Залежність діаметра частинки бітуму від площі прохідного отвору диспергатора при $P = 0,9$ МПа та $n = 60\%$

У даному випадку рівняння (11) набуває вигляду:

$$d_{ч1} = 5,2425 \cdot \left[1 - \frac{p_n \left(1 - \frac{S_2^2}{S_1^2} (\xi - 1) \right)}{P_m} \right]^2 - 9,65553 \cdot \left[1 - \frac{p_n \left(1 - \frac{S_2^2}{S_1^2} (\xi - 1) \right)}{P_m} \right] + 4,445847. \quad (12)$$

Зведена таблиця 1 ілюструє значення старшого a , другого b коефіцієнтів та значення вільного члена c в залежності від параметрів обробки компонентів емульсії.

Таблиця 1 – Уточнюючі коефіцієнти математичної моделі процесу емульгування бітуму в запропонованій кавітаційній установці

Параметри диспергування			Коефіцієнти		Вільний член, c
Площа прохідного отвору диспергатора, S , мм ²	Частка бітуму в емульсії, n , %	Тиск на вході в диспергатор P , МПа	старший, a	другий, b	
			1	2	3
var	40	0,9	6,491444	-11,95647	5,505604
var	60	0,9	5,2425	-9,65553	4,445847
var	40	1,1	23,666031	-	20,712804
var	60	1,1	-0,000663	0,01434	-0,012833
var	50	1	0,12056	-0,070093	0,010189
73,5	50	var	-0,000417	0,0006707	-
					0,00025488

Висновки

На підставі прийнятих припущень досліджено кінетику емульгування бітуму в кавітаційному диспергаторі та виконано математичне моделювання процесу кавітаційного диспергування складових потоку сировини, яке

відображує конструктивні особливості запропонованого вузла диспергування. Встановлена аналітична залежність, яка пов'язує між собою конструктивні та технологічні параметри приготування емульсії: площу прохідного отвору кавітаційного диспергатора S_2 , тиск на вході в диспергатор P_m та характеристику отриманої бітумної емульсії – розмір частки бітуму в емульсії d_c . На основі попередньо проведених експериментальних досліджень виведені уточнюючі коефіцієнти математичної моделі процесу емульгування бітуму в запропонованій кавітаційній установці.

Література

1. Федоткин И. М., Немчин А. Ф. Использование кавитации в технологических процессах / Федоткин И. М., Немчин А. Ф. – Киев, Высшая школа, 1984. – 68 с.
2. Пат. 37338 Україна, МПК₈ E01C 19/00 Установка для приготовления битумных эмульсий / Борисенко А. А., Бауман К. В., Коц І. В.– № u200807653; заявл. 04.06.08; опубл. 25.11.08, Бюл. № 22.
3. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. Изд. 5, переработанное / Лойцянский Л. Г. – ГРФМЛ издательства Наука, М., 1978. – 736 с.
4. Кулагин В. А. Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации: Дис. доктора техн. наук : 01.04.11, 01.02.05 / Кулагин В. А. - Красноярск, 2004. – 299 с.
5. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/ Под ред. М. О. Штейнберга. — 3-е изд., перераб. и доп.— М.: Машиностроение, 1992. — 672 с.
6. Радовський Б. С. Дисперсність емульсії при гідродинамічному проточно-кавітаційному способі її отримання / Радовський Б. С., Мозговий В. В., Гамеляк І. П., [та ін.] // Автомоб. дороги і дор. буд-во. – 1997. – Вип. 54. – С. 115-119.
7. Акопян А. А. Геометрические свойства кривых второго порядка. / Акопян А. А., Заславский А. В. – [М.](#): МЦНМО, [2007](#). — 136 с. – ISBN 978-5-94057-300-5.