

УДК 665.775.5

**К. В. БАУМАН, І. В. КОЦ**

Вінницький національний технічний університет

## **ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПРИГОТУВАННЯ БІТУМНОЇ ЕМУЛЬСІЇ НА КАВІТАЦІЙНІЙ УСТАНОВЦІ**

Розроблена конструкція експериментальної установки, принцип роботи якої оснований на кавітаційній обробці компонентів бітумної емульсії. В установці регулюється тиск на вході в кавітаційний диспергатор, положення кавітатора відносно дифузорної частини диспергатора, контролюються температури компонентів і готової емульсії, фіксується тиск на вході і на виході з диспергатора. За допомогою планування багатфакторного експерименту отримані квадратичні рівняння регресії, які дають можливість встановити залежності значень величин дисперсності від основних регульованих параметрів процесу виготовлення бітумної емульсії: тиску на вході в диспергатор, площі поперечного перерізу прохідного отвору диспергатора і кратності оброблення компонентів. Проведена параметрична оптимізація значень величин дисперсності, отримані оптимальні значення параметрів процесу приготування бітумних емульсій:  $S = 70 \text{ мм}^2$ ;  $n = 7$ ;  $p = 1,2 \text{ МПа}$  і мінімальні значення критерію оптимізації  $D = 3 \text{ мкм}$ . Побудовані поверхні відгуків критеріїв оптимізації і їх двомірні перерізи, які наочно ілюструють залежності значень величин дисперсності  $D$  від окремих параметрів.

**бітумна емульсія, планування багатфакторного експерименту, дисперсність, кавітаційна технологія приготування емульсій**

### **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ**

На сьогоднішній день більшість промислово розвинутих країн світу відмовляється від застарілих способів розрідження бітуму. Все ширшого застосування набувають бітумні емульсії [1]. Але емульгування таких взаємонерозчинних речовин, як бітум та вода, вимагає спеціального обладнання. У переважній більшості існуючих бітумно-емульсійних установок як пристрої емульгування застосовуються колоїдні млини різних модифікацій, використання яких потребує великих затрат енергії, установки мають велику металоємність та габарити, а тому їх застосування є не досить ефективним і вимагає подальшого вдосконалення.

### **АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Останнім часом велику увагу привертає використання нетрадиційних методів змішування взаємонерозчинних компонентів, в основу яких покладені гідродинамічні явища та процеси, що відбуваються в системі дисперсна фаза – дисперсне середовище.

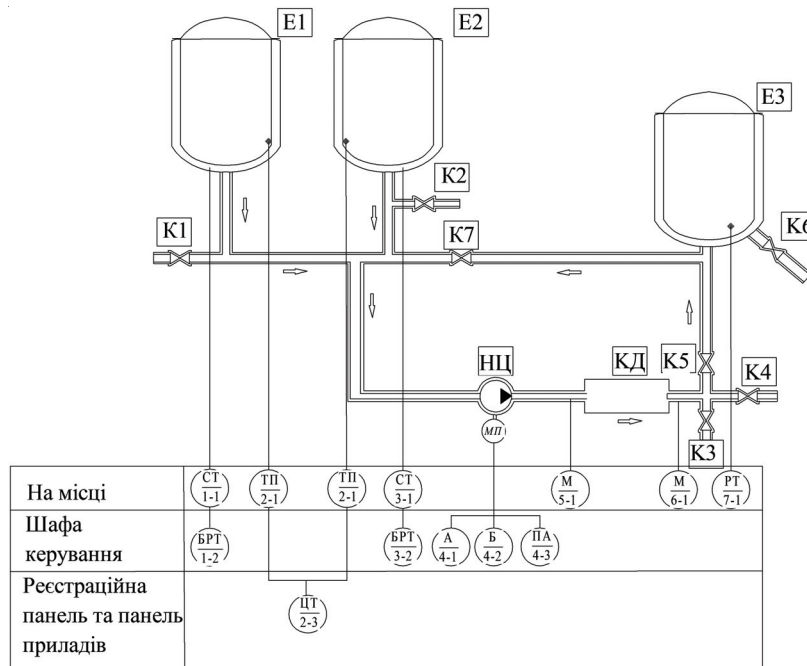
Досить перспективним для перемішування рідких гетерогенних середовищ є обладнання, в основу роботи якого покладено штучне створення кавітації у потоці оброблюваної рідини – кавітаційні диспергатори [2]. Розрізняють акустичні та механічні кавітаційні технології для оброблення гетерогенних середовищ [3]. Широкий спектр недоліків, серед яких кавітаційна ерозія робочого обладнання, значні енерговитрати, локальне зосередження кавітаційно-кумулятивного впливу на оброблюване середовище, суттєво обмежує використання акустичної технології, особливо у великомасштабному виробництві. Аналіз обладнання, що реалізує механічну технологію оброблення рідких гетерогенних середовищ, доводить основні переваги СК-апаратів: простота конструкцій, менша енергоємність, можливість регулювання інтенсивності кавітаційного впливу.

## ФОРМУЛЮВАННЯ МЕТИ І ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

В науково-дослідній лабораторії гідродинаміки Вінницького національного технічного університету спільно з ДП НВЦ «Композит» (м. Київ) розроблена конструкція установки для приготування бітумної емульсії, в якій вузол емульгування представлений кавітаційним диспергатором [4, 5]. Метою даного дослідження є встановлення залежності між властивостями оброблюваної сировини та параметрами і характеристиками нового устаткування.

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Для реалізації поставленої мети був спроектований та виготовлений стенд, принципова схема якого наведена на рис. 1.



**Рисунок 1** – Принципова схема експериментального стенда. Позначення: Е1, Е2 – ємності для збереження компонентів емульсії; Е3 – ємність для збереження готової емульсії; К1...К7 – запірно-регулювальна арматура установки; КД – кавітаційний диспергатор; НЦ – насос циркуляційний.

Експериментальний стенд складається з наступних блоків: контуру циркуляції; шафи керування та контрольно-вимірювального вузла. Контрольно-вимірювальна апаратура стенда наведена в таблиці 1.

**Таблиця 1** – Контрольно-вимірювальна апаратура стенда

Позначення	Назва	Кількість
1-1	Термопара ТХА (К)	1
1-2	Блок регулювання температури БРТ-3 ТУ УЗ.11-05814256-107-98	1
2-1	Термопара занурювальна контактна АТА-2102 тип ТХА (К)	1
2-2	Термопара занурювальна контактна АТА-2102 тип ТХА (К)	1
2-3	Цифровий ресструвальний пристрій Meterman TMD 90	1
3-1	Термопара ТХА (К)	1
3-2	Блок регулювання температури БРТ-3 ТУ УЗ.11-05814256-107-98	1
4-1	Амперметр Э 8030-М1, ТУ25-04.4050-81	1
4-2	Вольтметр Э 8030 ТУ25-04.4050-81	1
4-3	Пускова апаратура для керування електродвигуном	1
5-1	Манометр МТП-100 клас точності 2,5 ГОСТ 2405-80	1
6-1	Манометр МТП-100 клас точності 2,5 ГОСТ 2405-80	1
7-1	Ртутний термометр 2-1972 ГОСТ 2823-59 (°С)	1

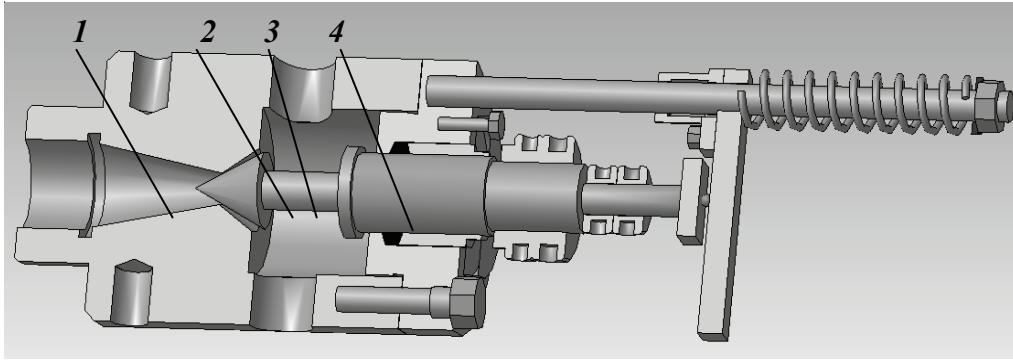


Рисунок 2 – Експериментальний кавітаційний диспергатор.

Базовими елементами кавітаційного диспергатора є: конфузорна 1, дифузорна 2 частини кавітаційного диспергатора та кавітатор 3, виконаний у вигляді конуса. За рахунок зміни площі поперечного перерізу отвору між внутрішньою поверхнею дифузорної частини кавітаційного диспергатора 2 та зовнішньою поверхнею кавітатора 3 регулюванням положення кавітатора 3 вздовж осі за допомогою напрямивного стержня 4 в кавітаційному диспергаторі виникають значні градієнти гідродинамічних та термодинамічних параметрів (тиску, температури, швидкості та інші), що забезпечують умови динамічного подрібнення дисперсної фази гетерогенної системи в камері змішування 5.

Для удосконалення технології отримання та поліпшення якості емульсії, такої як бітумна необхідні дослідження процесів диспергування дисперсних частинок в системі «рідина – рідина». 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. До виконання експериментальних досліджень було здійснено планування експерименту. Параметром оптимізації була обрана дисперсність емульсії. Дослідження процесів диспергування бітуму в розчині емульгатора відбувалося шляхом варіювання наступних факторів:  $S$  – площі прохідного отвору кавітатора,  $\text{мм}^2$ ;  $N$  – кратності оброблення компонентів емульсії;  $p$  – тиску на вході в кавітатор, МПа.

Кавітаційний диспергатор КД представлений статичним СК – апаратом із симетрично розміщеним відносно осі кавітатором у вигляді тіла обертання (рис. 2).

Отже, дисперсність бітумної емульсії є функцією від 3 параметрів:

$$D = f(S, N, p). \quad (1)$$

Дослідження впливу перерахованих вище факторів на дисперсність готової бітумної емульсії при проведенні однофакторних експериментів пов'язаний із значними труднощами і обсягами робіт. Тому, на наш погляд, доцільно провести багатофакторний експеримент для отримання рівнянь регресії для функцій відгуку  $D$  за допомогою повнофакторного експерименту методом Бокса-Уілсона [7].

З метою визначення діапазонів варіювання факторів функції (1) були проведені пошукові експерименти. Основна вимога – сукупність факторів в передбачених планом експерименту діапазонах має бути чітко реалізована та не приводити до протиріч. Для кожного фактора встановлені наступні значення:  $X_{j0}$  – основний рівень фактора;  $X_{j\max}$ ,  $X_{j\min}$  – верхній та нижній рівні фактора;  $\alpha X_{j\max}$ ,  $\alpha X_{j\min}$  – зіркові верхній та нижній рівні фактора;  $\alpha$  – зіркові плечі;  $I_j$  – інтервал варіювання.

Фактори, що впливають на дисперсність бітумної емульсії, розрізняються як за розмірністю, так і за порядками значення цих факторів. Для отримання поверхні відгуку цих функцій було проведено операцію кодування факторів, що являє собою лінійне перетворення факторного простору:

$$x_j = \frac{(X_j - X_{j0})}{I_j}. \quad (2)$$

Встановлено наступні значення рівнів факторів в умовному масштабі: мінімальний – 1, середній 0, максимальний +1 та зіркові значення -1,682, +1,682.

Основні рівні, інтервали варіювання та межі області експериментальних досліджень наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Рівні факторів та інтервали варіювання

Фактори	Рівні факторів					Інтервал варіювання
	-1,682	-1	0	+1	+1,682	
$x_1$ – площа прохідного отвору кавітатора, мм <sup>2</sup>	70	77,5	85	92,5	100	7,5
$x_2$ – кратність оброблення компонентів емульсії	1	2,25	4	5,75	7	1,75
$x_3$ – тиск на вході в кавітатор, МПа	0,8	0,9	1	1,1	1,2	0,1

Кількість дослідів для дрібнофакторного експерименту при квадратичній регресії визначалась за формулою [8]:

$$N = 2^{k-1} + 2k + N_0, \quad (3)$$

де  $k$  – кількість факторів; 2 – кількість рівнів;

$N_0$  – кількість дослідів в центрі плану, приймаємо  $N_0 = f(k) = f(3) = 10$  відповідно.

Для даного випадку  $N = 2^{3-1} + 2 \cdot 3 + 10 = 20$  дослідів.

Для побудови регресійної моделі досліджуваної системи використовуємо квадратичне рівняння регресії з ефектами взаємодії 1-го порядку, яке має вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (4)$$

де  $y$  – дисперсність емульсії;

$b_0, b_1, \dots, b_3, b_{12}, \dots, b_{13}, b_{11}, \dots, b_{33}$  – коефіцієнти регресії.

Для функції відгуку  $D$  рівняння регресії згідно з проведеним багатофакторним експериментом для кодованих значень має вигляд:

$$D = 7,67 + 1,59x_1 - 0,86x_2 - 0,15x_3 - 0,25x_1x_2 + 1,25x_1x_3 + 0,75x_2x_3 - 0,5x_1^2 + 0,21x_2^2 + 0,03x_3^2. \quad (5)$$

При цьому  $S_{\text{адом}}^2 = 0,66$ ;  $S_{\text{до}}^2 = 1,59$ ;  $F = 2,38 < [F] = 2,64$ , отже регресійна модель (5) адекватна [7]. Коефіцієнт кореляції  $R^2 = 0,79$ .

Як видно із табл. 2, всі коефіцієнти рівняння регресії (5) виявились значимими.

Для дійсних значень факторів рівняння регресії для функції відгуку  $D$  має вигляд:

$$D = -8,57 - 1,45S - 5,57n - 160,6p - 0,02Sn + 1,67Sp + 5np - 0,008S^2 + 0,09n^2 + 3,27p^2. \quad (6)$$

Отримане рівняння регресії (6) дозволяє провести параметричну оптимізацію дисперсності бітумної емульсії  $D$  з мінімальним її значеннями.

Експерименти показали, що значення величини дисперсності  $D$  залежить від наступних параметрів: площі прохідного отвору кавітатора  $S$ , кратності оброблення компонентів емульсії  $n$  та тиску до кавітатора  $p$  і носять квадратичний характер, а також мають місце ефекти взаємодій факторів.

За допомогою пакету прикладних програм MathCAD 14 було проведено оптимізацію значень дисперсності  $D$  шляхом їх мінімізації. В результаті отримані наступні оптимальні значення параметрів площі прохідного отвору кавітатора і кратності оброблення компонентів при різних значеннях тиску на вході в кавітатор:

– для мінімального значення величини дисперсності емульсії  $D = 3$  мкм:

$$S = 70 \text{ мм}^2; n = 7; p = 1,2 \text{ МПа.}$$

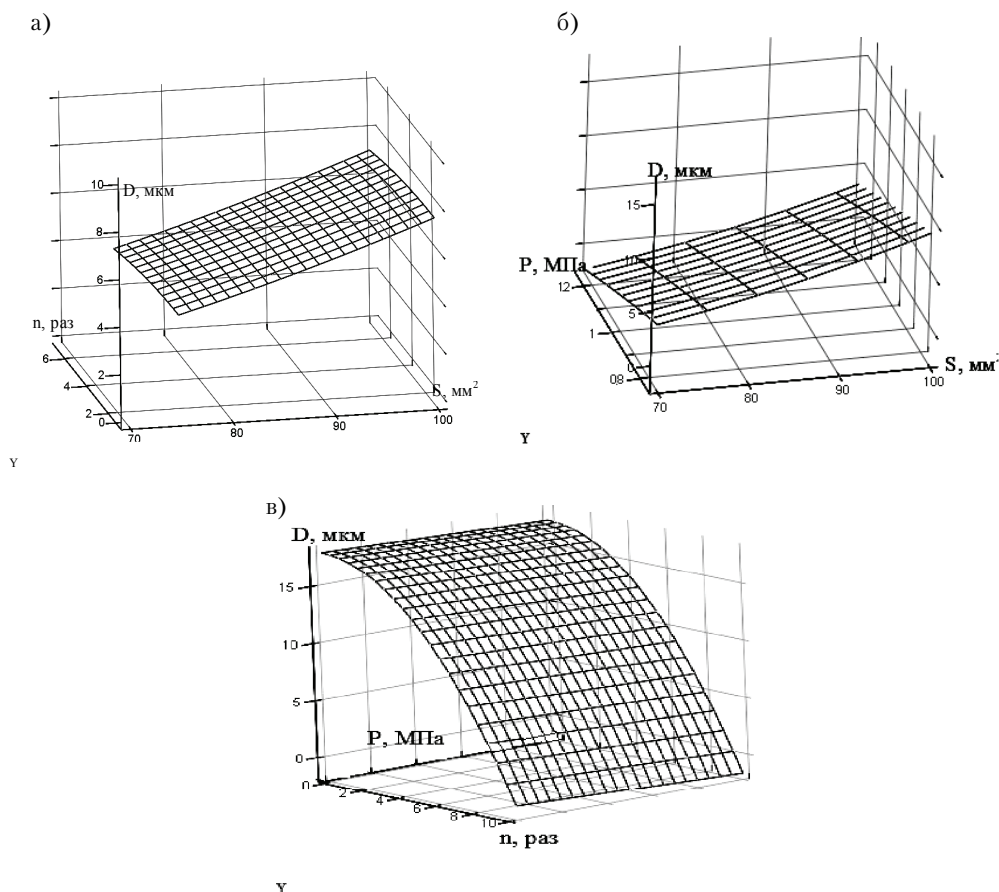
На рис. 3 наведені поверхні відгуків критеріїв оптимізації та їх двомірні перерізи залежності значень величин дисперсності  $D$  від окремих параметрів оптимізації.

Поверхні відгуків дозволяють наочно проілюструвати залежність значень величин дисперсності від параметрів площі поперечного перерізу  $S$ , кратності оброблення компонентів та тиску до кавітатора.

## ВИСНОВКИ

Розроблена конструкція експериментальної установки, принцип роботи якої полягає у кавітаційному обробленні компонентів бітумної емульсії. В установці регулюється тиск на вході в кавітатор, положення кавітатора відносно дифузійної частини кавітатора, контролюються температури компонентів та готової емульсії, фіксується тиск на вході та на виході з кавітатора.

Методом планування багатофакторного експерименту було отримано квадратичні рівняння регресії, які дозволяють встановити залежності значень величин дисперсності від основних регулюва-



**Рисунок 3** – Поверхні відгуків та їх двомірні перерізи залежності значень величини дисперсності в площинах параметрів оптимізації: а)  $S - n$ ; б)  $S - p$ ; в)  $n - p$ .

них параметрів процесу виготовлення бітумної емульсії: тиску на вході в кавітатор, площі поперечного перерізу прохідного отвору кавітатора та кратності оброблення компонентів. Адекватність математичної моделі процесу приготування емульсії підтверджена.

Проведена параметрична оптимізація значень величин дисперсності дозволила отримати оптимальні значення параметрів процесу приготування бітумних емульсій:  $S = 70 \text{ мм}^2$ ;  $n = 7$ ;  $p = 1,2 \text{ МПа}$  і мінімальні значення критерію оптимізації:  $D = 3 \text{ мкм}$ .

Побудовано поверхні відгуків критеріїв оптимізації та їх двомірні перерізи, які дозволяють наглядно проілюструвати залежності значень величин дисперсності  $D$  від окремих параметрів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Научно-практические аспекты получения водоземulsionных материалов дорожно-строительного назначения [Электронный ресурс] / А. Ф. Кемалов, Р. А. Кемалов, Н. Р. Муллахметов [и др.] // Научный электронный архив. – Режим доступа : <http://econf.rae.ru/article/4542>.
2. Промтов, М. А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов [Текст] / М. А. Промтов // Вестник ТГТУ. – 2008. – Том 14, № 4. – С. 861–869.
3. Кулагин, В. А. Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации [Текст] : дис. ... доктора техн. наук : 01.04.11, 01.02.05 / Кулагин В. А. – Красноярск, 2004. – 299 с.
4. Сердюк, В. Р. Нова технологія та устаткування для виготовлення гідроізоляційних матеріалів на основі бітумних емульсій [Текст] / В. Р. Сердюк, К. В. Бауман // Будівельні матеріали, виробі та санітарна техніка. – 2009. – № 34. – С. 35–42.
5. Пат. 37338 Україна, МПК8 Е 01 С 19/00 Установка для приготування бітумних емульсій [Текст] / Борисенко А. А., Бауман К. В., Коц І. В. ; заявник і власник Вінницький національний технічний університет. – № u200807653 ; заявл. 04.06.08 ; опубл. 25.11.08, Бюл. № 22. – 3 с.

6. Радовський, Б. С. Дисперсність емульсії при гідродинамічному проточно-кавітаційному способі її отримання [Текст] / Б. С. Радовський, В. В. Мозговий, І. П. Гамеляк [та ін.] // Автомоб. дороги і дор. буд-во. – 1997. – Вип. 54. – С. 115–119.
7. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 280 с.
8. Чкалова, О. Н. Основы научных исследований [Текст] / О. Н. Чкалова. – К. : Вища школа, 1987 – 120 с.

Получено 21.12.2011

Е. В. БАУМАН, І. В. КОЦ  
ОПТИМИЗАЦІЯ ПРОЦЕСА ПРИГОТОВЛЕННЯ БИТУМНОЇ ЕМУЛЬСІЇ  
НА КАВІТАЦІЙНІЙ УСТАНОВКІ  
Вінницький національний технічний університет

Разработана конструкция экспериментальной установки, принцип работы которой основан на кавитационной обработке компонентов битумной эмульсии. В установке регулируется давление на входе в кавитационный диспергатор, положение кавитатора относительно диффузорной части диспергатора, контролируются температуры компонентов и готовой эмульсии, фиксируется давление на входе и на выходе из диспергатора. С помощью планирования многофакторного эксперимента получены квадратичные уравнения регрессии, которые дают возможность установить зависимости значений величин дисперсности от основных регулируемых параметров процесса изготовления битумной эмульсии: давления на входе в диспергатор, площади поперечного сечения проходного отверстия диспергатора и кратности обработки компонентов. Проведена параметрическая оптимизация значений величин дисперсности, получены оптимальные значения параметров процесса приготовления битумных эмульсий:  $S = 70 \text{ мм}^2$ ;  $n = 7$ ;  $p = 1,2 \text{ МПа}$  и минимальные значения критерия оптимизации  $D = 3 \text{ мкм}$ . Построены поверхности откликов критериев оптимизации и их двухмерные сечения, которые наглядно иллюстрируют зависимости значений величин дисперсности  $D$  от отдельных параметров.  
**битумная емульсія, планування багатофакторного експеримента, дисперсність, кавітаційна технологія приготування емульсій**

KATERYNA BAUMAN, IVAN KOTS  
PROCESS OPTIMIZATION OF THE BITUMINOUS EMULSION PREPARATION  
ON THE CAVITATION PLANT  
Vinnitsa National Technical University

The construction of the experimental plant, the working principle of which is based on cavitation bituminous emulsion components processing, has been developed. In the plant the pressure at the cavitation dispersgator input and the cavitator position relatively the diffuser part of the dispersgator are regulated. The components and prepared emulsion temperatures are controlled. The pressure at the input and the output of the dispersgator is fixed. Quadratic equations of regression are received with the help of multivariable experiment planning. These equations give an opportunity to determine dependences of dispersion values on the basic managed parameters of the bituminous emulsion making process: the pressure at the dispersgator input, the cross-sectional area of the dispersgator bore and the components processing multiplicity. Parametric optimization of dispersion values has been conducted. The optimal parameters values of the bituminous emulsions preparation process have been obtained:  $S = 70 \text{ mm}^2$ ;  $n = 7$ ;  $p = 1,2 \text{ MPa}$  and the minimum values of the optimization criterion  $D$  is 3 mkm. The surfaces of the optimization criterions responses and their two-dimensional sections, which evidently illustrate the dependences of dispersion  $D$  values on separate parameters, have been plotted.  
**bituminous emulsion, multivariable experiment planning, dispersion, cavitation technology of emulsions preparation**

**Бауман Катерина Володимирівна** – інженер кафедри промислового та цивільного будівництва Вінницького національного технічного університету. Наукові інтереси: процеси та устаткування для диспергації та механоактивації гетерогенних середовищ.

**Коц Іван Васильович** – професор кафедри теплозапобігання, науковий керівник та завідувач науково-дослідною лабораторією гідродинаміки Вінницького національного технічного університету, дійсний член Академії будівництва України. Наукові інтереси: розробка, дослідження та моделювання робочих процесів гідродинамічних і гідравлических ударно-вібраційних пристроїв для гірничої та інших галузей промисловості, розробка й дослідження нових високоефективних теплогенеруючих машин та обладнання.

**Бауман Катерина Владимировна** – инженер кафедры промышленного и гражданского строительства Винницкого национального технического университета. Научные интересы: процессы и оборудование для диспергирования и механоактивации гетерогенных сред.

**Коц Иван Васильевич** – профессор кафедры теплогоснабжения, научный руководитель и заведующий научно-исследовательской лабораторией гидродинамики Винницкого национального технического университета, действительный член Академии строительства Украины. Научные интересы: разработка, исследование и моделирование рабочих процессов гидродинамических и гидравлических ударно-вибрационных устройств для горной и других отраслей промышленности, разработка и исследование новых высокоэффективных теплогенерирующих машин и оборудования.

**Kateryna Bauman** – engineer; Department of Industrial and Civil Building, Vinnytsa National Technical University. Scientific interests: processes and equipment for dispersion and mechanoactivation of heterogeneous mediums.

**Ivan Kots** – PhD (Eng), Associate Professor; Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Research Manager and Head of the SIL of hydrodynamics of Vinnytsa National Technical University. Actual member of the Ukrainian Building Academy. Scientific interests: development, research and simulating of hydrodynamic and hydraulic shock-and-vibration facilities operation for mining and other industrial sectors, new high-efficiency heat-generating machines and equipment research and development.