

В.С. БІЛЕЦЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.,
Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”
Ю.С. МІЩУК, асистент, Р.І. МАЙЛОВ, магістрант
Полтавський національний технічний університет ім. Юрія Кондратюка

ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ ЗМІШУВАЧІВ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ БУРОВОГО РОЗЧИНУ

Метою цього дослідження є вивчення і компаративний аналіз роботи трьох конструкцій статичного змішувача неньютонівської рідини з параметрами бурового розчину: густина - 1250 кг/м^3 , динамічна в'язкість - $0,02 \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Методи дослідження. Для дослідження роботи статичного змішувача неньютонівської рідини використано модуль Flow Simulation програмного середовища SolidWorks.

Наукова новизна. Одержані параметричні поля гідросуміші у робочій зоні труби, яка охоплює власне змішувач і відтинки труби за ним довжиною до 20 діаметрів труби: поле швидкостей гідросуміші v (м/с); поле завихреності n (с^{-1}); поле інтенсивності турбулентності I (%), поле масштабу турбулентностей по довжині шляху перемішування l_m (м).

Практична значимість. За одержаними даними встановлено, що кращі технологічні характеристики перемішування бурового розчину за швидкістю і завихреністю потоків пульпи забезпечують спіральні змішувачі № 2 і № 3, які рекомендуються для впровадження в системі приготування бурового розчину на ділянці змішування його з реагентами.

Результати. Виконані порівняльні дослідження роботи трьох конструкцій статичного змішувача в циркуляційній системі промивальної рідини бурових установок. Виконано комп'ютерне моделювання та отримано параметричні поля гідросуміші у робочій зоні труби, а саме в місці установки статичного змішувача і в зоні трубопроводу за ним. Побудовано графіки зміни досліджуваних параметрів відносно осі труби, зокрема: графіки зміни швидкості потоку бурового розчину по довжині трубопроводу (криві $v(L)$), графіки зміни завихреності n (с^{-1}) відносно осі труби L (м), (криві $n(L)$), графіки зміни інтенсивності турбулентності I (%) відносно осі труби L (м), (криві $I(L)$), графіки зміни масштабу турбулентностей l_m (м) відносно осі труби L (м), (криві $l_m(L)$). Виконано порівняльний аналіз моделей та кривих. Обґрунтовано раціональну конструкцію спірального статичного змішувача для отримання оптимальних технологічних характеристик перемішування бурового розчину.

Ключові слова: статичний змішувач, буровий розчин, комп'ютерне моделювання, модуль Flow Simulation, програмне середовище SolidWorks, швидкість гідросуміші, завихреності, інтенсивність турбулентності, масштаб турбулентності.

Постановка проблеми. Останнім часом статичні змішувачі все ширше використовуються в ряді галузей промисловості, що обумовлено їх перевагами, зокрема великою кількістю можливих варіантів конструктивного рішення, відсутністю рухомих елементів, привода, енергоспоживання, можливістю суміщення з гідро- та пневмо-транспортними мережами, а також різноманітністю технологічних функцій, які вони здатні виконувати: змішування газоподібних, рідких і сипучих твердофазних компонентів, диспергування твердофазних компонентів у рідких та незмішуваних рідинах, флокуляція твердої фази в рідинних потоках, інтенсифікація розчинення реагентів у рідинах тощо [1].

У системах циркуляції бурового розчину використовують різні конструкції механічних мішалок: лопатеві, роторні, кульові та ін. Статичні змішувачі розглядаються як перспективні [2].

Разом з тим їх конструкція повинна відповідати вимогам ефективного перемішування бурового розчину з реагентами, інтегруватися у наявні гідротранспорти комунікації поверхневого комплексу циркуляційної системи бурової установки.

Для цього важливо виконати дослідження впливу статичного міксеру на параметричні поля гідросуміші, зокрема за швидкістю й завихреністю.

Аналіз останніх джерел досліджень і публікацій. Розроблення технічних рішень та активне дослідження статичних змішувачів розпочинається з 1980-90-х років [1,3,4]. У роботі [1] підкреслюється, що конструювання статичних змішувачів першого покоління базувалося головним чином на інтуїції з наступною емпіричною апробацією варіантів. Кращий з них обирався на основі порівняльного аналізу. Натомість сучасні технології широко використовують моделювання течії гідросуміші. У роботі [5] розроблено чисельні інструменти для аналізу складних змішувальних пристроїв, 3D. Розрахунки засновані на методі скінченних елементів.

Автор у роботі [6], використовуючи засоби обчислювальної гідродинаміки для моделювання, показав, що статичний змішувач формує складну вихреву систему, яка включає

стаціонарний поздовжній вихровий потік і перехідні (вторинні) потоки (вихори), що, за В.Г. Левічем [7], може розглядатися як розвинена турбулентність.

У роботі [8] досліджено залежність перепадів тиску в турбулентному потоці ($Re=1000-5000$), створюваному в статичному змішувачі, від числа Re .

У роботі [9] досліджено Kenics static mixer у широкому діапазоні турбулентності потоку ($Re=1-25000$). Чисельним моделюванням одержано картину поля швидкостей та перепадів тиску для трьох модифікацій Kenics-міксера і потоків рідини та повітря.

Автори роботи [10] застосовують «продуктивність змішування» як характеристику статичного змішувача і показують її залежність від енергії, затраченої на змішування, та різниці перепадів тисків у змішувачі.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Разом з тим у вітчизняній і закордонній практиці невідомі дослідження роботи статичного змішувача в циркуляційних системах промивальної рідини бурових установок.

Метою цього дослідження є вивчення роботи трьох конструкцій статичного змішувача неньютонівської рідини з параметрами бурового розчину: густина - 1250 кг/м^3 , динамічна в'язкість - $0,02 \text{ Па}\cdot\text{с}$ із застосуванням модуля Flow Simulation програмного середовища SolidWorks.

Завдання: виконати порівняльні дослідження спіральних статичних змішувачів для систем перемішування бурового розчину.

Основний матеріал і результати. Для дослідження прийнято три конструкції статичного змішувача, які належать до різних класів пристроїв (табл. 1).

Таблиця 1

Досліджувані об'єкти «трубопровід – статичний змішувач»

Номер досліджу	Опис конструкції	3D-модель змішувача
1	Труба $\text{Ø}114 \times 9 \text{ мм}$	без змішувача
2	Труба $\text{Ø}114 \times 9 \text{ мм}$, з додатково встановленим статичним змішувачем № 1	
3	Труба $\text{Ø}114 \times 9 \text{ мм}$, з додатково встановленим статичним змішувачем № 2 (спіраль I)	
4	Труба $\text{Ø}114 \times 9 \text{ мм}$, з додатково встановленим статичним змішувачем № 3 (спіраль II)	

Розрахуємо такі параметричні поля гідросуміші у робочій зоні труби, яка охоплює власне змішувач і відтинок труби за ним довжиною до 20 діаметрів труби:

поле швидкостей гідросуміші v (м/с);

поле завихреності n (с^{-1}) (середня колова швидкість рідини у вихорі потоку);

поле інтенсивності турбулентності I (%) [11]

$$I \equiv u'/U, \quad (1)$$

де середньоквадратична швидкість турбулентних пульсацій

$$u' \equiv \sqrt{\frac{1}{3}u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2} = \sqrt{\frac{2}{3}k}; \quad (2)$$

середня швидкість турбулентного потоку

$$U \equiv \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}; \quad (3)$$

поле масштабу турбулентностей по довжині шляху перемішування l_m (м).

Для отримання моделей зазначених параметричних полів використано модуль Flow Simulation програмного середовища SolidWorks [12,13].

Результати досліджень наведено в табл. 2.

Графіки зміни швидкості потоку бурового розчину по довжині трубопроводу (криві $v(L)$) зображено на рис. 1.

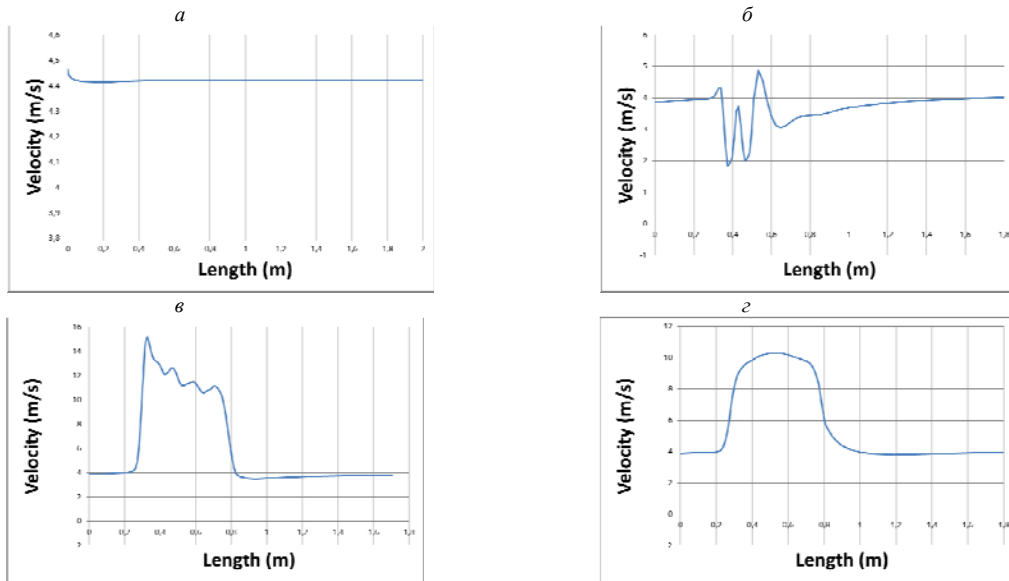


Рис. 1. Графіки зміни швидкостей v (м/с) відносно осі труби L (м), (криві $v(L)$): *a* - дослід 1 (труба без статичного змішувача); *б* - дослід 2 (змішувач № 1); *в* - дослід 3 (змішувач № 2); *г* - дослід 4 (змішувач № 3)

Графіки зміни завихреності n (c^{-1}) відносно осі труби L (м), (криві $n(L)$) наведено на рис. 2.

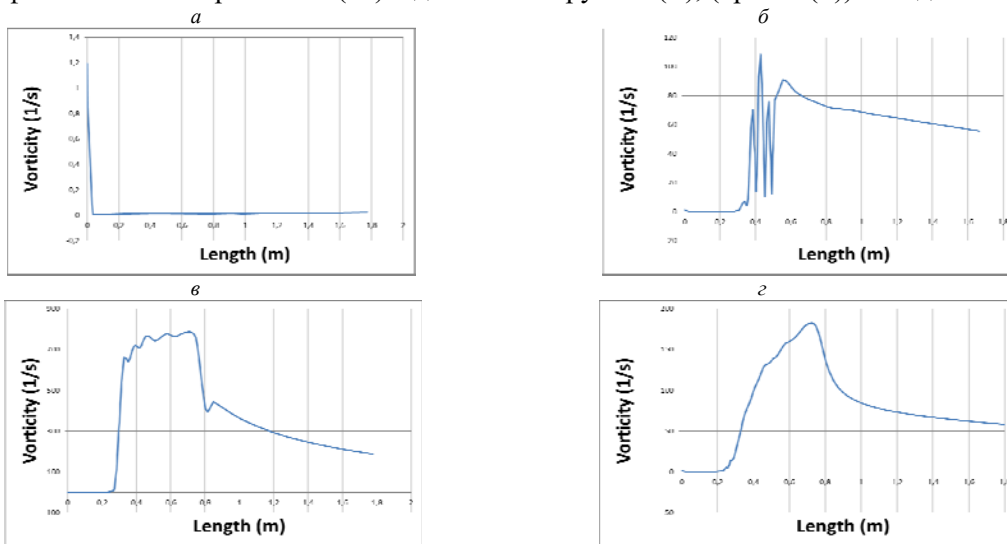


Рис. 2. Графіки зміни завихреності n (c^{-1}) відносно осі труби L (м), (криві $n(L)$): *a* - дослід 1 (труба без статичного змішувача); *б* - дослід 2 (змішувач № 1); *в* - дослід 3 (змішувач № 2); *г* - дослід 4 (змішувач № 3)

Графіки зміни інтенсивності турбулентності I (%) відносно осі труби L (м), (криві $I(L)$) зображено на рис. 3.



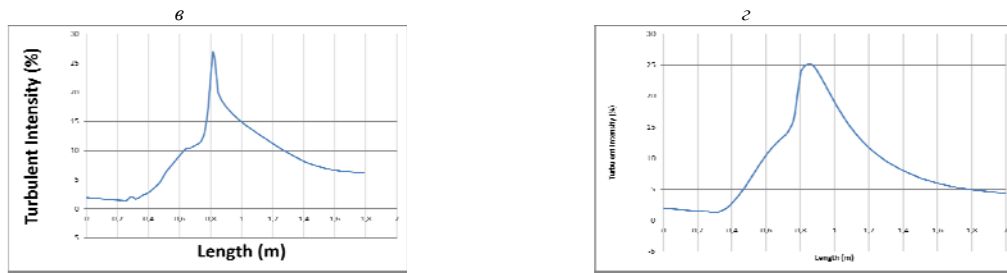


Рис. 3. Графіки зміни інтенсивності турбулентності I (%) відносно осі труби L (м), (криві $I(L)$):
 а - дослід 1 (труба без статичного змішувача); б - дослід 2 (змішувач № 1); в - дослід 3 (змішувач № 2);
 г - дослід 4 (змішувач № 3)

Графіки зміни масштабу турбулентностей l_m (м) відносно осі труби L (м), (криві $l_m(L)$) наведено на рис. 4.

Одержані результати характеризують картину зміни турбулентності бурового розчину вздовж трубопроводу в місці установки статичного змішувача і в зоні трубопроводу за ним. Як бачимо, оцінки турбулентності, представлені кривими $v(L)$, $I(L)$, $l_m(L)$, та $n(L)$ кореспондуються між собою (Ібд/рис. 1-4).

Середня колова швидкість рідини у вихорі потоку n , інтенсивність турбулентності I та масштаб турбулентностей l_m набувають максимальних значень у місці установки статичного змішувача, а далі зменшуються по довжині труби на відстані до 10 діаметрів труби (10D).

Аналогічні експериментальні дані стосовно числа Re отримані в роботах [11,14].

Разом з тим кожний з досліджених різновидів статичного змішувача по-різному впливає на окремі характеристики турбулентності.

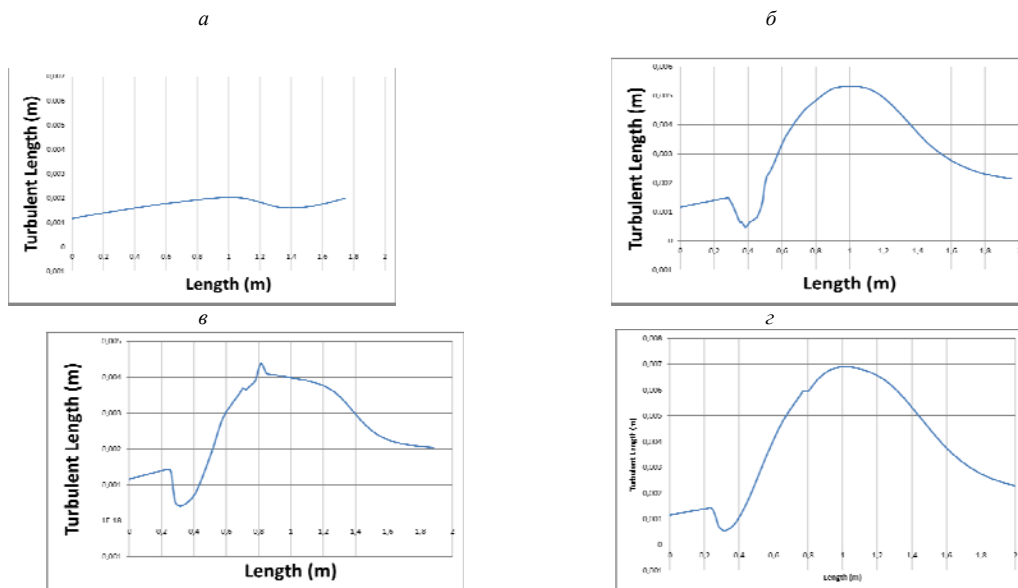


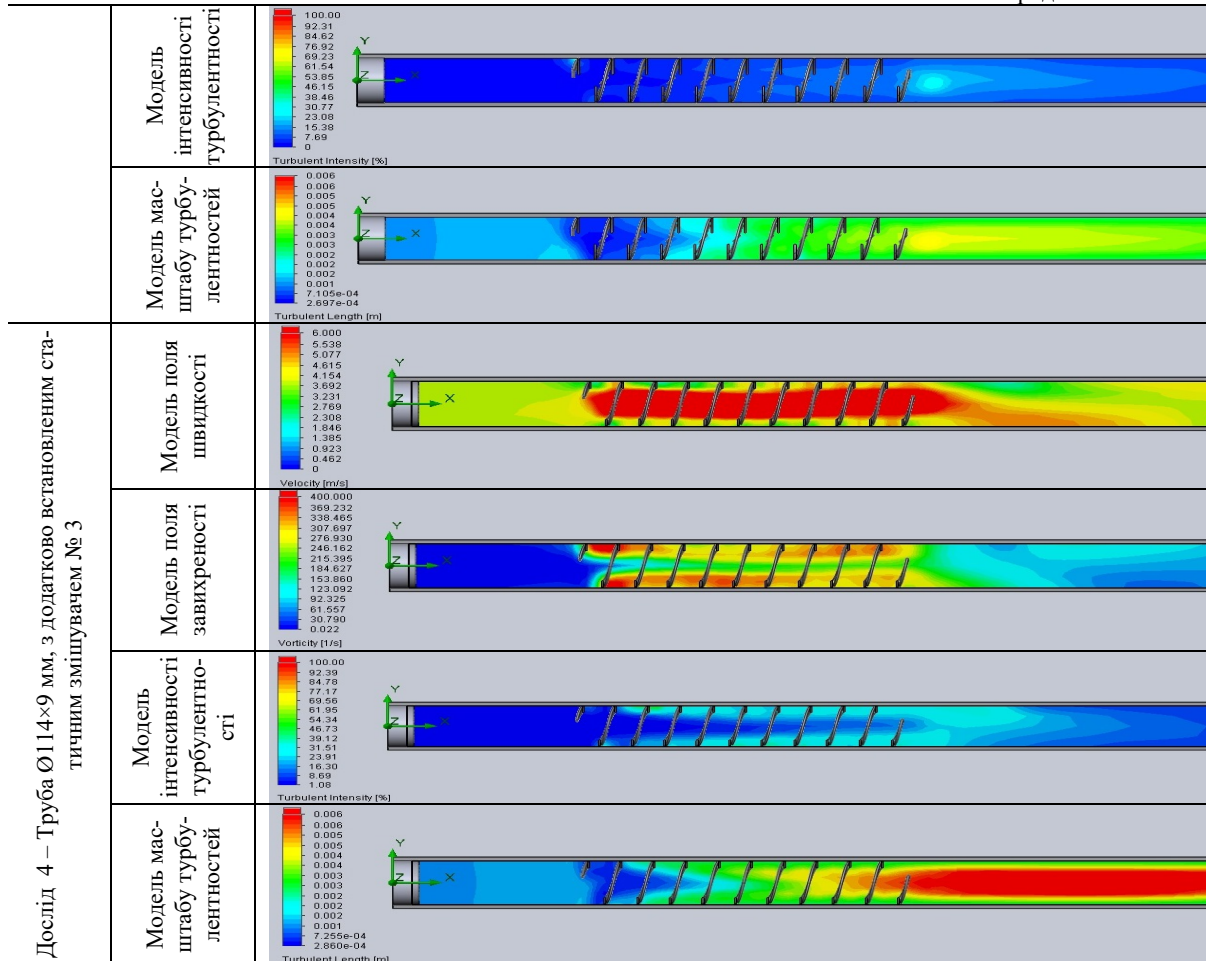
Рис. 4. Графіки зміни масштабу турбулентностей l_m (м) відносно осі труби L (м), (криві $l_m(L)$): а - дослід 1 (труба без статичного змішувача); б - дослід 2 (змішувач № 1); в - дослід 3 (змішувач № 2); г - дослід 4 (змішувач № 3)

Максимальні та мінімальні значення параметрів швидкості v , завихреності n , інтенсивності турбулентності I та масштабу турбулентності l_m наведено в табл. 3.

Порівняльний аналіз кривих швидкості $v(L)$ показує, що змішувачі № 2 й 3 вигідно відрізняються від змішувача № 1, дають близькі значення характеристик поля швидкості потоку в трубі.

Результати моделювання статичного змішувача за допомогою модуля Flow Simulation

Номер дослідів	Модель параметричного дослідів	
Дослід 1 – Труба Ø114×9 мм без статичного змішувача	Модель поля швидкості	
	Модель поля завихреності	
	Модель інтенсивності турбулентності	
	Модель масштабу турбулентностей	
Труба Ø114×9 мм, з додатково встановленим статичним	Модель поля швидкості	
	Модель поля завихреності	
	Модель інтенсивності турбулентності	
	Модель масштабу турбулентностей	
Дослід 3 – Труба Ø114×9 мм, з додатково встановленим статичним змішувачем № 2	Модель поля швидкості	
	Модель поля завихреності	



Максимальна швидкість потоку для них знаходиться на рівні 11–15 м/с, що суттєво більше від показників для змішувача № 1 (відповідно 4,9 м/с), а також у 3,5 рази переважає максимальну швидкість потоку без змішувача.

Таблиця 3

Максимальні та мінімальні значення параметрів

Параметр	Номер дослід	Опис конструкції	max значення	min значення
Швидкість v (м/с)	1	Труба без статичного змішувача	4,43	4,41
	2	зі змішувачем № 1	4,88	1,83
	3	зі змішувачем № 2	15,19	3,53
	4	зі змішувачем № 3	11,198	3,59
Завихреність n , с^{-1}	1	Труба без статичного змішувача	1,19	0,01
	2	зі змішувачем № 1	108,5	0,01
	3	зі змішувачем № 2	786,5	0,01
	4	зі змішувачем № 3	499,796	0,022
Інтенсивність турбулентності I (%)	1	Труба без статичного змішувача	2,27	0,89
	2	зі змішувачем № 1	28,13	1,28
	3	зі змішувачем № 2	27,01	1,41
	4	зі змішувачем № 3	25,8	1,08
Масштаб турбулентностей l_m , м	1	Труба без статичного змішувача	0,0020	0,0011
	2	зі змішувачем № 1	0,0053	0,0005
	3	зі змішувачем № 2	0,0044	0,0004
	4	зі змішувачем № 3	0,007	0,0003

Аналіз кривих завихреності $n(L)$ показує, що найкращі дані демонструє змішувач № 2 (максимально $786,5 \text{ c}^{-1}$), гірші - змішувач № 3 (499,796), на порядок нижчі характеристики маємо для змішувача № 1 (108,5).

Порівняльний аналіз кривих зміни інтенсивності турбулентності $I(L)$ показує суттєву перевагу змішувачів порівняно з трубопроводом без змішувача: трубопровід $I=2,27 \%$; для статичних змішувачів результати інтенсивності турбулентності близькі і знаходяться в межах: $I=25,8-28,13 \%$.

Аналіз кривих зміни масштабів турбулентних завихрень уздовж трубопровода $l_m(L)$ демонструє практично близьку картину для змішувачів № 1,2 - максимальний масштаб турбулентностей відповідно 0,0053 і 0,0044.

Для змішувача № 3 максимальний масштаб турбулентностей l_m 0,007.

Аналізуючи криву $l_m(L)$ бачимо, що діаметр вихорів у турбулентних потоках закономірно зменшується на ділянці після змішувача. Темп цих змін масштабу турбулентності ідентичний для конструкцій №№ 1,2,3.

Висновки. Виконані дослідження роботи трьох конструкцій статичного змішувача ньютонівської рідини з параметрами бурового розчину: густина - 1250 кг/м^3 , динамічна в'язкість - $0,02 \text{ Па}\cdot\text{с}$ із застосуванням модуля Flow Simulation програмного середовища SolidWorks дозволили одержати параметричні поля гідросуміші у робочій зоні труби, яка охоплює власне змішувач і відтинок труби за ним довжиною до 20 діаметрів труби: поле швидкостей гідросуміші v (м/с); поле завихреності n (c^{-1}); поле інтенсивності турбулентності I (%), поле масштабу турбулентностей по довжині шляху перемішування l_m (м).

За одержаними даними кращі технологічні характеристики перемішування бурового розчину за швидкістю і завихреністю потоків пульпи забезпечують спіральні змішувачі № 2 і № 3, які рекомендуються для впровадження в системі приготування бурового розчину на ділянці змішування його з реагентами.

Список літератури

1. Characterization of flow and mixing in an SMX static mixer [Electronic resource] / **J. M. Zalc, E. S. Szalai, F. J. Muzzio, S. Jaffer** // *AIChE Journal*. – 2002. – Vol. 48, Issue 3. – P. 427 – 436. – Access mode: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aic.690480303/abstract>.
2. Білецький В. С. Збагачувальна техніка та технології при приготуванні й регенерації бурових розчинів // **В. С. Білецький, М. В. Ткаченко** // Збагачення корисних копалин : наук.-техн. зб. – 2017. – Вип. № 66 (106). – С. 41 – 47.
3. Викладена заявка №58-104997, Японія. МКІЗ С10L5/00. Пристрій грудкування вугілля у трубопроводі. – заявл. 22.06.83.
4. **Nienow A.W.** Mixing in the Process Industries: Second Edition / **A.W. Nienow, M.F. Edwards, N. Harnby** // Butterworth-Heinemann, 1997. – 432 p.
5. **Avalosse Th.** Finite-element simulation of mixing: 2. Three-dimensional flow through a kenics mixer [Electronic resource] / Th. Avalosse, M. J. Crochet. // *AIChE Journal*. – 1997. – Vol. 43, Issue 3. - P. 588 – 597. – Access mode: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aic.690430304/abstract>.
6. **Bakker A.** Modeling of the Turbulent Flow in HEV Static Mixers [Electronic resource] / **A. Bakker, Richard D. LaRoche** // *The Online CFM Book*. - 1998. – Access mode: <http://www.bakker.org/cfmbook/turbhev.pdf>.
7. **Левич В. Г.** Физико-химическая гидродинамика / **В. Г. Левич**. - М.: Физматгиз, 1959. – 700 с.
8. **Stec M.** Numerical method effect on pressure drop estimation in the Koflo® static mixer / **M. Stec, P. M. Synowiec** // *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 2015. - Vol. 2. - P. 48-50.
9. **Kumar V.** Performance of Kenics static mixer over a wide range of Reynolds number [Electronic resource] / **V. Kumar, V. Shirke, K.D.P. Nigam** // *Chem. Eng. Journal*. - 2008. - Vol. 139. – P. 284-295. Access mode: <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/performance-of-kenics-static-mixer-over-a-wide-range-of-reynolds-efUty67Y9m>.
10. **Singh M. K.** Analysis and optimization of low-pressure drop static mixers [Electronic resource] / **M. K Singh, T.G. Kang, P.D Anderson, H.E.H Meijer** // *AIChE Journal*. - 2009. - Vol. 55, Issue 9. – P. 2208 – 2216. - Access mode: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aic.690430304/abstract>.
11. Основы гидравлики [Электронный ресурс] / **А. А. Кононов, Д.Ю. Кобзов, Ю.Н. Кулаков, С.М. Ермашонок**. - Братск: ГОУВПО «БрГТУ», 2004. – 92 с. Режим доступа: <http://www.gidravl.com/>.
12. **SOLIDWORKS Flow Simulation**. [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.solidworks.com/sw/products/simulation/flow-simulation.htm>.
13. **Darin Grosser.** The Future of SolidWorks Has Always Been [Electronic resource]. - 2011. - Access mode: <http://blog.dasisolutions.com/2011/09/27/the-future-of-solidworks-has-always-been-in-your-hands/>.
14. Білецький В. С. Застосування статичних змішувачів для селективної агрегації тонкодисперсного вугілля / **В. С. Білецький, Н. В. Сургова** // Вісті Донецького гірничого інституту. - 2011. - № 2(30). - С. 56-59.