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.

doi: 10.31721/2306-5435-2017-1-102-100-107

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 гідротранспортні комунікації поверхневого комплексу циркуляційної системи бурової установки.

Для цього важливо виконати дослідження впливу статичного міксерів 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 $\varnothing 114 \times 9 \text{ мм}$	без змішувача
2	Труба $\varnothing 114 \times 9 \text{ мм}$, з додатково встановленим статичним змішувачем № 1
3	Труба $\varnothing 114 \times 9 \text{ мм}$, з додатково встановленим статичним змішувачем № 2 (спіраль I)
4	Труба $\varnothing 114 \times 9 \text{ мм}$, з додатково встановленим статичним змішувачем № 3 (спіраль II)

Розрахуємо такі параметричні поля гідросуміші у робочій зоні труби, яка охоплює власне змішувач і відтинки 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 $v(L)$): а - дослід 1 (труба без статичного змішувача); б - дослід 2 (змішувач № 1); в - дослід 3 (змішувач № 2); з - 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 $n(L)$): а - дослід 1 (труба без статичного змішувача); б - дослід 2 (змішувач № 1); в - дослід 3 (змішувач № 2); з - 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 (Ibd/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.

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 дослідження	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 , c^{-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 $786,5 \text{ с}^{-1}$), 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 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 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 (с^{-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 гудкування 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.gidravll.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.

А.М. РОЄНКО, д-р техн. наук, проф., Національний гірничий університет
С.А. ХАРІН, д-р техн. наук, проф., В.М. КНУРЕНКО, старш. викладач
КВНЗ «Інститут підприємництва «Стратегія» ДОР»

АНАЛІЗ ТЕМПІВ БУДІВНИЦТВА СТОЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ JAVA-ДОДАТКУ

Мета. Метою даної роботи є розробка програмного забезпечення та дослідження проблеми організації проходки стволів глибоких шахт під впливом зміни параметрів бурового устаткування і гірничо-геологічних умов, зокрема, зміни темпів будівництва. Необхідно також виконати аналіз отриманих в ході дослідження результатів, встановити закономірності зміни відповідних параметрів і виробити рекомендації щодо раціонального ведення прохідницьких робіт.

Методи дослідження. У роботі використано комплексний підхід, що включає узагальнення і аналіз літературних джерел і досліджень в галузі будівництва шахт, теоретичні дослідження, що базуються на методах математичного моделювання.

Наукова новизна. Встановлено, що швидкість проходки виробки логарифмічно залежить від продуктивності бурового обладнання.

Практична значимість. Дана категорія складається в знаходженні оптимальних проектних рішень щодо будівництва комплексу виробок горизонтів на великих глибинах для діючих шахтах Криворізького басейну, що дозволяють забезпечити своєчасне введення горизонтів в експлуатацію.

Результати. Реконструкція виробничих потужностей шахт в умовах значних глибин розробки повинна супроводжуватись послідовними зусиллями в напрямку досліджень, що спрямовані на удосконалення всіх технологічних процесів, які вимагають відповідної автоматизації для забезпечення оперативності результатів. Аналіз схем розкриття глибоких залізрудних родовищ показує, що найбільш раціональним для умов Криворізького басейну є ступеневий розтин з використанням сліпих вертикальних стволів. Оптимальними є перш за все схеми розкриття, які дозволяють реалізувати можливість ведення робіт за допомогою кількох точок докладання робіт. Вказується, що такі схеми доцільні для використання в умовах шахт з великою протяжністю рудного тіла за простяганням. На основі розробленого програмного забезпечення встановлено, що швидкість проходки виробки логарифмічно залежить від продуктивності бурового обладнання. Відзначено також, що, починаючи з певного моменту, зростання продуктивності засобів буріння практично не призводить до збільшення темпів проходки ствола і подальше нарощування зусиль в цьому напрямку недоцільно.

Ключові слова: реконструкція, схеми, швидкість, спорудження, програмне забезпечення, мова Java.

doi: 10.31721/2306-5435-2017-1-102-107-111

Проблема і її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Реконструкція виробничих потужностей шахт в умовах значних глибин розробки повинна супроводжуватись інтенсивними зусиллями в напрямку досліджень, спрямованих на вдосконалення всіх технологічних процесів, які вимагають відповідної автоматизації для забезпечення оперативного отримання результатів.

Аналіз досліджень і публікацій. Аналіз опублікованих робіт, які висвітлюють різні аспекти наукових досліджень, показує на значне число публікацій, присвячених вдосконаленню проектування глибоких шахт [1, 2]. В інших роботах отримані наукові результати, пов'язані з бурінням шахтних стволів як перспективному напрямку у шахтному будівництві, поліпшенню якості буропідричних робіт [3-8], а також комплексним питанням підземного будівництва [9, 10].

В цілому ж, аналіз літературних джерел, а також актуальних проблем будівництва залізрудних підприємств, показує, що питання впливу продуктивності бурового обладнання на тривалість прохідницького циклу і, відповідно, швидкість проведення стволів, незалежно від їх призначення, на сьогодні опрацьовані недостатньо детально.

Постановка задачі. Розробити програмне забезпечення та дослідити вплив продуктивності бурового обладнання на швидкість проведення стволів, виконати відповідний аналіз, встановити закономірності і виробити рекомендації.

Викладення матеріалу і результати. Стійке функціонування гірничого виробництва є умовою ефективного розвитку економіки України. Завдання реконструкції виробничих потужностей в умовах значних глибин розробки повинне супроводжуватись інтенсивними зусиллями в напрямку досліджень, спрямованими на вдосконалення всіх технологічних процесів, які вимагають відповідної автоматизації для забезпечення достовірності результатів.

Сучасний етап функціонування залізрудної промисловості України характеризується, зокрема, наступним: