14. Наливайко В.Г., Мовчан О.Г., Лосьев К. В. Важность определения травмоопасности основных видов ремонтных работ на теплогенерирующих предприятиях, Гірничий вісник, збірник наукових праць- 2018 Вип № 103. с 27-32.

15. Наливайко В.Г., Мовчан О.Г., Лосьев К. В. Влияние профилактических ремонтных работ на уменьшение заболеваемости работников предприятий теплоснабжения, Вісник КНУ, збірник наукових праць- 2019. Вип № 48. с 121-126.

Рукопис подано до редакції 06.04.2021

УДК 624.131:624.15

Р. О. ТІМЧЕНКО, д-р техн. наук, проф., Д. А. КРІШКО, канд. техн. наук, ст. викл.,
Д. Г. БРОНОВ, магістрант
Криворізький національний університет

ФАКТОРИ ГЕОТЕХНІЧНОЇ І ГЕОМЕХАНІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ВИСОТНИХ БУДІВЕЛЬ

Мета. Оцінка і прогнозування станів системи «основа – фундамент – висотна будівля», що впливають на стійкість і безпеку об'єктів капітального будівництва. При розробці проектних рішень конструкцій фундаментів висотних будівель забезпечення геотехнічної і геомеханічної безпеки є найбільш актуальною проблемою.

Методи дослідження. При будівництві фундаментів висотних будівель виникає ряд особливостей, які необхідно враховувати при проектуванні. Вибір конструкції фундаментів, крім перерахованих вище принципів, залежить від фізико-механічних характеристик і характеру нашарування ґрунтів основи і навантажень, що передаються на них, форми і розмірів висотної будівлі, розмірів будівельного майданчика, наявності навколишніх будинків, тунелів (метро) і підземних комунікацій. Розрахунки фундаментів висотних будівель виконуються, як і для фундаментів звичайних будинків, за двома групами граничних станів відповідно до нормативів з урахуванням особливостей. Визначення величин навантажень на основу і розрахунки основ, фундаментів і підземних частин будівлі слід виконувати, розглядаючи спільну роботу системи «основа – фундамент – висотна будівля». Система «основа – фундамент – висотна будівля» є областю системної взаємодії висотного споруди і ґрунтового масиву, умов якого визначаються складом інженерно-геологічних компонент і їх параметрів з урахуванням глибини закладення фундаменту, його конструктивних особливостей і величини силового навантаження, доданої в існуючу систему міської забудови.

Наукова новизна. Отримання комплексної інформації про компоненти сфери взаємодії основи з фундаментом і висотною будівлею дозволяє обґрунтувати вибір типу фундаменту, глибину його залягання, висоту (поверховість) та застосування інженерного захисту від екзогенних геологічних процесів.

Практична значимість. Проведення всебічного моніторингу на всіх етапах будівництва та після його завершення до стабілізації деформацій і науково-технічного супроводу проектування і будівництва.

Результати. Відзначено можливість розвитку негативних процесів, що впливають на стійкість і безпечно функціонування висотної будівлі, як на стадії розробки котловану, так і під час експлуатації висотної будівлі, пов'язана з особливостями інженерно-геологічних умов області взаємодії системи.

Ключові слова: система «основа – фундамент – висотна будівля»; навантаження; області взаємодії.

doi: 10.31721/2306-5435-2021-1-109-85-91

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Возведення висотних будівель в забудованих містах ведеться за принципом точкової забудови у знову сформованих умовах в результаті впливу існуючих будівель і споруд на інженерно-геологічні процеси. Весь світовий досвід будівництва та експлуатації великих споруд і висотних будівель підтверджує, що нерідко аварії і негативні явища пов'язані з недостатньою вивченістю геологічних умов і помилковим або неточним прогнозуванням розвитку інженерно-геологічних процесів, що мають місце в ґрунтових масивах. Тому найбільш актуальною проблемою при розробці проектних рішень конструкцій фундаментів висотних будівель є забезпечення геотехнічної і геомеханічної безпеки.

Аналіз досліджень і публікацій. Найбільш широкий розвиток висотне будівництво отримало в азійських країнах, що пов'язано з гострою нестачею територій. Так, в Японії висотний бум почався з 1970-х років. Його стимулювали з одного боку економічне зростання країни, а з іншого – технологічні успіхи в створенні висотних сейсмостійких конструкцій. Масове висотне будівництво почалося в містах-країнах Сінгапурі та Гонконгу в зв'язку з їх роллю міжнародних фінансових центрів Сходу. Концентрація найбільш високих будівель відзначається в найбільш

ших містах Східної і Південно-Східної Азії, де, починаючи з 1990 року, ростуть, як гриби, будівлі рекордних висот (445-508 м). Обмеження висоти будинків більше обумовлено економічними і естетичними міркуваннями, ніж інженерно-геологічними умовами будівництва.

Проблема зведення висотних будівель в різних країнах пов'язана з іменами відомих архітекторів: Ван дер Роє, Ле Корбюзьє, О. Німейєр, Н. Фостер та ін. Проектуванням висотного будівництва в складних інженерно-геологічних умовах і науково-практичним забезпеченням можливості висотного будівництва займалися: Р. Катценбах, А. Шмітт, Дж. Девіс, Г. Поулос, В.М. Улицький, В.І. Іллічов, В.П. Петрухін, В.І. Осипов, Р.С. Зіангіров, В.І. Кашірський, С.М. Клепиков, О.О. Петраков, В.Б. Швець, Р.О. Тімченко, З.Г. Тер-Мартirosян, В.І. Шейнін, І.В. Колибін, А.Г. Шашкін, О.А. Шулятьєв та ін. [1-18].

Постановка задачі. Метою досліджень є оцінка стану висотних будівель при забезпеченні факторів геотехнічної і геомеханічної безпеки.

Виклад матеріалу і результати. При будівництві фундаментів висотних будівель виникає ряд особливостей, які необхідно враховувати при проектуванні:

тиск на підшві фундаменту висотних будівель може бути на порядок вище, ніж для будівель заввишки до 75 м, що вимагає проведення спеціальних лабораторних і польових досліджень;

особливості інженерно-геологічних вишукувань;

діючі норми поширюються на розрахунок несучої здатності палі довжиною 35 м (опір на нижньому кінці палі) і 40 м (опір на боковій поверхні), що може бути недостатньо для проектування фундаментів висотних будівель;

великі навантаження (1-2 МПа), що передаються на ґрунт основи, вимагають враховувати в розрахунку міцності і деформаційні характеристики скельних і нескельних ґрунтів з $E > 100$ МПа, що вважаються відповідно до діючих норм нестисливими, а також збільшену зону розподілу напружень в ґрунті в плані і за глибиною, що може привести до збільшення шарів ґрунту, що сприймають навантаження від фундаменту. Особливо сильно це може позначитися при нерівномірному заляганні шарів;

збільшення розмірів (глибини і ширини) стиснутої товщини в масиві ґрунту призводить до збільшення термінів завершення консолідації ґрунту і розтягування процесу осідання у часі;

у разі, якщо основу складено ґрунтами з різними коефіцієнтами консолідації (як первинної, так і вторинної), необхідно враховувати можливість виникнення в результаті такого нерівномірного напружено-деформованого стану ґрунту (на проміжній стадії консолідації) неодноразового закінчення процесів консолідації різних видів ґрунтів і, як наслідок цього, виникнення крену будівлі, що перевищує граничні значення;

висока чутливість до крену;

збільшення розмірів області ґрунту основи, що деформується, призводить до надання більшого впливу на навколишні будівлі та споруди, в тому числі водонесучі комунікації, що необхідно враховувати в розрахунку.

У зв'язку з зазначеними вище особливостями при проектуванні висотних будівель були зроблені основні принципи:

прагнути створювати підземний об'єм такий, щоб вага вийнятого ґрунту при влаштуванні підземної частини будівлі дорівнював вазі будівлі;

знижувати тиск на підшві фундаменту шляхом збільшення його площі за рахунок створення коробчатого фундаменту і розвитку на площі підземної і стилобатної частин будівлі;

навантаження на фундаменти передавати симетрично щодо центральної осі, використовуючи відповідну конструктивну схему будівлі;

жорсткісні елементи (монолітні стіни, сходові клітини, ліфтові шахти і т.п.) розташовувати симетрично щодо центральної осі;

глибина закладення підшви фундаменту будівлі повинна зростати при збільшенні висоти будівлі;

застосовувати (при можливості) пірамідальну форму будівлі;

при збільшенні висоти будівлі знижувати гранично допустиме значення осідань фундаменту.

Вибір конструкції фундаментів, крім перерахованих вище принципів, залежить від фізико-механічних характеристик і характеру нашарування ґрунтів основи і навантажень, що передаються на них, форми і розмірів висотної будівлі, розмірів будівельного майданчика, наявності

навколишніх будинків, тунелів (метро) і підземних комунікацій і т. п.

Розрахунки фундаментів висотних будівель виконуються, як і для фундаментів звичайних будинків, за двома групами граничних станів відповідно до нормативів з урахуванням їх особливостей [19-22].

Відомо, що для висотних будівель не існує значень гранично допустимих величин деформацій земної поверхні, тому вони визначаються виходячи зі спільного розрахунку системи «основа – фундамент – висотна будівля» з урахуванням вимог нормальної експлуатації будівлі (робота ліфтів, водогінних комунікацій, осідання сусідніх будівель і споруд, в разі утворення єдиного підземного простору та інші), які повинні бути вказані в технічному завданні на проектування.

Визначення величин навантажень на основу і розрахунки основ, фундаментів і підземних частин будівлі слід виконувати, розглядаючи спільну роботу системи «основа – фундамент – висотна будівля».

При розрахунку основ фундаментів висотних будівель за деформаціями слід:

враховувати залежність деформаційних і міцнісних характеристик ґрунтів від тривалості прикладання навантажень;

розрахунок основи слід виконувати на основне сполучення постійних, тривалих і короточасних навантажень;

розрахунок кренів фундаментів слід виконувати на основне сполучення постійних, тривалих і короточасних (переважно вітрових) навантажень. При цьому величина крену повинна складатися з крену від дії постійних і тривалих навантажень і короточасних.

При проектуванні основ і фундаментів висотних будівель в складі різноповерхових комплексів рекомендується передбачати їх випереджаюче будівництво з відношення до прилеглих малоповерхових частин. Розрахунок основ фундаментів в цьому випадку, при фундаменті на природній основі, слід виконувати для будівельного випадку, відповідного відсутності привантаження і розпору від малоповерхової частини комплексу.

В умовах нерівномірності передачі навантажень, неоднорідності залягання ґрунтів і підвищеної їх деформованості при недостатньо ефективних проектних рішеннях можуть призвести до розвитку надмірних осідань, прогинів і кренів фундаментних частин будівель. Остання обставина обумовлює зміщення центру ваги будівлі і збільшення моментних навантажень на основу, що викликає ще більше посилення нерівномірності деформацій земної поверхні. При осіданні висотної будівлі порушується існуючий стан балансу ґрунтів і розвиваються значні зони деформацій ґрунтового масиву поза території будівлі. Це, разом зі збільшеними значеннями напружень в масиві ґрунту, призводить до того, що:

осідання висотних будівель стабілізуються відносно повільніше і досягають кінцевих значень за більш тривалі проміжки часу;

фундаменти існуючих будівель, що потрапили в зону впливу споруди, отримують незворотні деформації.

Збільшення розмірів зони впливу потрібно враховувати при проектуванні споруд, прилеглих до висотної будівлі, і при розробці заходів щодо захисту навколишньої забудови. Зазначені геотехнічні особливості висотних будівель роблять необхідним істотне підвищення вимог до детальності і змістовності інженерних вишукувань, до розрахунків основ і фундаментів, до вибору конструктивних типів фундаментів і технологій їх влаштування.

Ефективність технічного рішення фундаменту висотної будівлі істотно зростає при його заглибленні. Глибина закладення фундаментів може становити 15-25 м, а в окремих випадках – 50 м. В даний час при проектуванні і будівництві висотних будівель широке застосування отримали три типи фундаментів: пальові, плитні і пальово-плитні.

Висотні будівлі відносяться до числа найбільш складних об'єктів будівництва, тому ряд основних рекомендацій щодо їх проектування приймається узгоджено міжнародними громадськими організаціями інженерів і архітекторів.

Усередині групи висотних будівель зазвичай вдаються до додаткової рубрикації з градацією висоти в 100 м. Кількість хмарочосів висотою понад 400 м у всьому світі не досягає і 10; висотою від 300 до 400 - 30, від 200 до 300 трохи перевищує 100, а будівлі висотою від 100 до 200 м є найпоширенішими, і кількість таких об'єктів зростає безперервно.

Для класифікації хмарочосів був прийнятий критерій висоти в метрах, а не поверховості,

оскільки висоти поверхів приймаються різними в залежності від призначення будівлі та вимог національних норм проектування.

Система «основа – фундамент – висотна будівля» є областю системної взаємодії висотної споруди і ґрунтового масиву, умови якої визначаються набором інженерно-геологічних компонент і їх параметрів з урахуванням глибини закладення фундаменту, його конструктивних особливостей і величини силового навантаження, доданих в існуючу систему міської забудови.

При будівництві будь-яких споруд на ґрунтовій основі формується деяка система. Систему «основа – фундамент – висотна будівля» і її структуру можна представити у вигляді системи з декількох ієрархічних рівнів, головним елементом якої є область взаємодії або сфера взаємодії системи «основа – фундамент – висотна будівля» (рис. 1).

Області взаємодії і всі її складові умов функціонування характеризуються набором компонент, які визначають генетичні особливості і тенденції процесу зміни геологічного середовища. Вони взаємопов'язані, взаємозумовлені, мають своє призначення, внесок при формуванні і розвитку тих чи інших геологічних процесів у межах системи «основа – фундамент – висотна будівля».

Рис. 1. Схема системи «основа – фундамент – висотна будівля»

Оцінка і прогнозування станів системи «основа – фундамент – висотна будівля» вимагають виконання принципово нових методів, заснованих на аналізі різних взаємодій між компонентами основи і висотною будівлею. Реакція основи області взаємодії системи на техногенний вплив споруди «висотна будівля» приведена в табл.1.

Таким чином, існуючі взаємодії в системі «основа – фундамент – висотна будівля» показано на рис. 2. Звідси видно, що нормальне функціонування системи має бути забезпечено за умови роботи висотної будівлі в суворій відповідності з проектним режимом.

Рис. 2. Схема взаємодії системи «основа – фундамент – висотна будівля»

Безпечне функціонування системи «основа – фундамент – висотна будівля» буде забезпечено при рівноважному стані взаємодії її компонентів, тобто такому стані, при якому функціонування висотної будівлі відповідає його проектному режиму, не порушуючи при цьому динамічної рівноваги області взаємодії.

Своєрідність ґрунтових масивів формує стан стійкості системи «основа – фундамент – висотна будівля» і визначає умови і етапи будівельних робіт, елементів конструкції фундаменту і глибини його закладення.

Оцінка і прогноз розвитку інженерно-геологічних процесів повинні бути виконані аналітичними методами, що дозволяють оцінити етапність техногенного впливу на ґрунтовий масив, що дає можливість оптимально спроектувати споруду і забезпечити його безпечне функціонування.

Таблиця 1

Реакція середовища області взаємодії системи на техногенний вплив висотної будівлі

Вид техногенного впливу	Джерело впливу	Характеристики взаємодії	Компоненти інженерно-геологічних умов, інформація про які необхідна для оцінки процесу		Реакція основи геологічної та інженерно-геологічні процеси	Характер деформації будівель
			дисперсні ґрунти (суглинки, супіски, піски, щебеневі ґрунти)	скельні і напівскельні ґрунти		
Ущільнення статичне	Вага будівлі	Величина навантаження, розміри, глибина, форма закладення фундаментів	Потужність, мінеральний склад, фізико-механічні властивості (в т. ч. ступінь стисливості ґрунтів), гідрогеологічні умови	Залягання геологічних шарів, геолого-структурна будова потужності, фізико-механічні властивості ґрунтів (в т. ч. ступінь стисливості ґрунтів), гідрогеологічні умови	Статичне ущільнення	Нерівномірні опади (крен, прогин, перекис)
Ущільнення динамічне	Вібромашини, транспорт, катки	Інтенсивність, тривалість впливу і положення джерел	Потужність, мінеральний склад, фізико-механічні властивості, гідрогеологічні умови	Потужність напівскельних ґрунтів, гідрогеологічні умови	Ущільнення або вібраційне розрідження дисперсних і напівскельних ґрунтів	Нерівномірні осідання будівлі (крен фундаментів)
Внутрішнє руйнування масиву	Виймання ґрунту	Глибина, довжина, час, метеорологічного впливу	Неоднорідність ґрунтів і їх виходи, фізико-механічні властивості, гідрогеологічні умови	Залягання геологічних шарів, геолого-структурна будова, потужність, фізико-механічні властивості ґрунтів; гідрогеологічні умови	Вивітрювання, порушення поверхневого і підземного стоку, зсуви, пучення, набухання	Осідання, тріщини в стінах і фундаментах будівель, провали
Підтоплення	Водогінні комунікації, накопичення конденсаційних вод	Величина прибуткового потоку, механізм процесу підтоплення	Мінеральний склад (тип ґрунтів), фізико-механічні властивості ґрунтів, гідрогеологічні умови	Фізико-механічні властивості ґрунтів, гідрогеологічні умови	Зміна НДС, суфозія, зсуви, набухання, осідання	Випинання і нерівномірні осідання фундаментів, провали
Зниження напору	Дренажні споруди	Величини зниження РГВ	Неоднорідність гранулометричного складу, фізико-механічні властивості, градієнт напору	Характер заповнювача тріщин, гідрогеологічні умови	Фільтраційне ущільнення, суфозія	Нерівномірні осідання будівлі (прогин)

Головною особливістю висотних будівель в порівнянні зі звичайними спорудами є те, що питомий тиск на основу під фундаментною конструкцією досягає значних величин і в роботу залучаються великі маси ґрунтів, що володіють, як правило, істотною неоднорідністю в плані і за глибиною. Тому збільшення розмірів зони впливу потрібно враховувати при проектуванні споруд, прилеглих до висотної будівлі, і при розробці заходів щодо захисту навколишньої забудови.

Висновки та напрямки подальших досліджень. При проектуванні фундаментів висотних будівель необхідно враховувати особливості інженерно-геологічних вишукувань, розрахунків і проектування. У зв'язку з високою «чутливістю» висотних будівель до крену при розрахунку фундаментів важливим є врахування механічної анізотропії, початкового напружено-деформованого стану та консолідації ґрунту, а також вплив захисної конструкції котловану.

При визначенні розрахункових характеристик ґрунту коефіцієнт надійності з ґрунту повинен прийматися як в сторону підвищення механічних характеристик ґрунту, так і в бік зниження. Беручи до уваги унікальність висотних будівель і недосконалість нормативної бази, слід зазначити, що важливим є проведення всебічного моніторингу на всіх етапах будівництва та після його завершення до стабілізації деформацій і науково-технічного супроводу проектування і будівництва.

Висотні будівлі, що зводяться в складних інженерно-геологічних умовах, доцільно вивчати як систему «основа – фундамент – висотна будівля». Комплексна інформація про компоненти сфери взаємодії основи з фундаментом і висотною будівлею дозволяє обґрунтувати вибір типу фундаменту, глибину його залягання, висоту (поверховість) та застосування інженерного захисту від екзогенних геологічних процесів.

Відзначено, що можливість розвитку негативних процесів, що впливають на стійкості і безпечне функціонування висотної будівлі, як на стадії розробки котловану, так і під час експлуатації висотної будівлі, пов'язана з особливостями інженерно-геологічних умов області взаємодії системи.

Список літератури

1. Катценбах Р., Шмитт А., Рамм Х. Основные принципы проектирования и мониторинга высотных зданий Франфурта-на-Майне. Случаи из практики // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2005. – № 9. – С. 80-99.
2. Тер-Мартirosян З.Г. Современные проблемы механики грунтов при высотном строительстве // Инженерная геология. – М.: 2007. – С. 33-41.
3. Математичне моделювання нелінійно-непружних контактних задач / Р. О. Тімченко, Д. А. Кришко, А. В. Богатинський, В. О. Савенко // «Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури» – Дн-ск: ПДАБА, 2015. – № 8. – С. 50-58.
4. Тімченко Р. О., Кришко Д. А., Сушко О. С. Багатофункціональний житловий комплекс у міському середовищі // Містобудування та територіальне планування – К.: КНУБА, 2017. – Вип. 63 – С. 416-421.
5. Тімченко Р. О., Кришко Д. А., Савенко В. О. Моделювання роботи системи «основа – інженерна споруда» за допомогою програмних комплексів // Актуальні питання проблеми створення та експлуатації технічних систем – 2017: Матеріали Міжвузівської науково-практичної конференції молодих вчених та студентів (21 квітня 2017 р.). – Кривий Ріг: КНУ, 2017. – С. 130-133.
6. Тімченко Р. О., Кришко Д. А., Жуляєва П. Ю. Формування архітектурного середовища квартальної забудови // Міжвузівська науково-практична конференція молодих вчених та студентів «Актуальні питання проблеми створення та експлуатації технічних та електромеханічних систем». – Кривий Ріг. КНУ, 2018. – С. 63-65.
7. Применение геоинформационных систем в инженерно-геологических изысканиях / Р. А. Тимченко, Д. А. Кришко, С. О. Попов, М. О. Кравченко, Ю. В. Чугай // 36. наук. ст. "Галузеве машинобудування, будівництво". – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – Вип. 3 (38). – Т.2. – С. 359-367.
8. Тімченко Р. А., Кришко Д. А. Особенности совместного расчета системы «основание – фундамент – верхнее строение» высотных зданий // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг: КНУ, 2014. – Вип. 36. – С. 117-122.
9. Применение математического моделирования для оценки напряженно-деформированного состояния системы „основание – фундамент – верхнее строение” в сложных инженерно-геологических условиях / Р. А. Тимченко, Д. А. Кришко, С. О. Попов, А. П. Сухан // 36. наук. ст. "Строительство. Материаловедение. Машиностроение". Серия: Компьютерные системы и информационные технологии в образовании, науке и управлении. – Дн-ск: ПГА-СА, 2014. – Вип. 78. – С. 263-269.
10. Федоровский В. Г., Безволев С. Г., Дунаева О. М. Методика расчета фундаментных плит на нелинейно-деформируемом во времени основании // Нелинейная механика грунтов: Тр. IV Рос. конф. с иностр. участием. – СПб., 1993. – Т.1. – С. 81–86.
11. Пат. 13794 Україна, МПК 6 Е 02D 27/00. Фундамент будівлі, споруди: 13794 Україна, МПК 6 Е 02D 27/00 Тімченко Р. О. (Україна). – № u 2005 10214; Заявл. 31.10.2005; Опубл. 17.04.2006, Бюл. № 4. – 6 с.

12. Тімченко Р.О. Проектування і розрахунок урівноважуючих плитних фундаментів: Навч. посібн. для студентів будівельних спеціальностей. – Кривий Ріг, Мінерал, 2005. – 82 с.
13. Тимченко Р. А., Кришко Д. А. Работа плитных фундаментов-саморегуляторов (ПФС) на неравномерно-деформируемом основании // Современные проблемы строительства. – Донецк, 2010. – № 9. С. 173-177.
14. Ильичёв В. А., Петрухин В. П., Шейнин В. И. Принципы проектирования оснований и фундаментов высотных зданий, учитывающие их геотехнические особенности // Современное высотное строительство / ГУП «ИТЦ Москомархитектуры». – М., 2007. – С. 255-261.
15. Федоровский В. Г., Колыбин И. В. Расчеты и проектирование оснований и фундаментов // Современное высотное строительство / ГУП «ИТЦ Москомархитектуры». – М., 2007. – С. 255-261.
16. Hanisch J., Katzenbach R., König G. Kombinierte Pfahl-Plattengrundungen. Ernst&Sohn. – 2002. – 222 p.
17. Тер-Мартirosян З. Г., Теличенко В. И., Королев М. В. Проблемы механики грунтов, оснований и фундаментов при строительстве многофункциональных высотных зданий и комплексов // Вестник МГСУ. – 2006. – №1. – С.18–27.
18. Шашкин К. Г. Расчет напряженно-деформированного состояния основания фундаментов и здания с учетом их взаимодействия // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2003. – №4. – С. 15–25.
19. ДБН В.2.2-41:2019. Висотні будівлі. Основні положення. – К.: Мінрегіонбуд, 2019. – 59 с.
20. ДБН В.1.2-12:2008. Будівництво в умовах ущільненої забудови. Вимоги безпеки. – К.: Мінрегіонбуд, 2008. – 34 с.
21. ДБН В.2.2-15:2019. Житлові будинки. Основні положення. – К.: Мінрегіонбуд, 2019. – 42 с.
22. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. Основні положення – К.: Мінрегіонбуд, 2018. – 40 с.

Рукопис подано до редакції 06.04.2021

УДК 622.1

М.М. КОНДРАТЕНКО, ст. викл., С.Г. САВЕЛЬЄВ, д-р техн. наук, доц.
Криворізький національний університет

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ В ПРОЦЕСАХ ПІДГОТОВКИ МЕТАЛУРГІЙНОЇ СИРОВИНИ ДО ПЕРЕДІЛУ

Метою роботи є дослідження можливості застосування і ефективності ультразвукової обробки в процесах підготовки металургійної сировини до переділу.

Розглянуто відмітні особливості ультразвукових хвиль, явища стабільної та нестабільної кавітації, умови їх виникнення. Зазначено про необхідність процесів огрудування тонких концентратів залізорудних матеріалів для забезпечення початкової міцності агрегату дисперсних часточок після глибокого збагачення і важливості застосування зміцнювальних домішок в шихту огрудування. В якості останніх здебільшого використовують бентоніти, які задля поліпшення їх властивостей піддають хімічній або механічній активації.

Відзначено широке розповсюдження використання ультразвукових технологій у народному господарстві взагалі і наявність вдалих методик ультразвукової обробки бентонітів з метою покращення їх в'язучих властивостей зокрема. Ця обробка фактично є різновидом механічної активації. Проаналізовано можливі механізми впливу ультразвукової обробки на зміну властивостей оброблювального матеріалу. Зроблено висновок про можливість отримання позитивного результату ультразвукової активації бентонітів, які використовують при огрудуванні металургійної сировини.

Методи дослідження. В роботі використані загальнологічні методи наукового дослідження – аналіз і синтез, аналогія, узагальнення.

Наукова новизна роботи. На основі проведеного літературного аналізу встановлено, що за відповідних параметрів обробки застосування ультразвуку може дати позитивний ефект у покращенні в'язучих властивостей бентоніту, як зміцнювальної домішки в шихту огрудування.

Практична значущість роботи полягає у необхідності розробки та застосуванні ультразвукових, кавітаційних, бічастотних методів впливу на металургійну шихту в процесах її підготовки до огрудування.

Результати роботи свідчать про те, що застосування ультразвуку за відповідних параметрів обробки може дати позитивний ефект. Подальше проведення досліджень доцільно продовжити у напрямку вивчення прив'язки певних видів бентоніту до режимних параметрів його обробки ультразвуком для використання в якості зміцнювальних домішок у шихту огрудування.

Ключові слова: бентоніт, диспергування, ультразвук, кавітація, монтморилоніт, обкотиші, міцність

doi: 10.31721/2306-5435-2021-1-109-91-98

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. З початку промислового виробництва згрудкованої сировини для металургійного переділу досить гостро стоїть питання

покращення її міцнісних та термостійких властивостей. За останні 60-70 років було запропоновано безліч варіантів заміни існуючих домішок або покращення їх властивостей.

З одного боку існує проблема пошуку підвищення ефективності використання такої домішки у шихту огрудкування, як бентоніт. З іншого боку – відоме широке використання ультразвуку в самих різноманітних сферах народного господарства в якості інтенсифікатора технологічних процесів та засобу покращення властивостей речовин. Пошук шляхів реалізації поєднання цих двох передумов на сьогоднішній день є актуальним завданням в галузі підготовки сировини до металургійних процесів.

Аналіз дослідження публікацій. Вивчення звуку та його властивостей розпочалося з давніх давен. Піфагор, Аристотель, Ф. Савар, Д. Джоуль, П. Кюрі, Ж. Кюрі, Ф. Гальтон, П.Н. Лебедев, П. Ланжевен, Г.В. Пірс, Р. Вуд, К. Дуссик, Л.Д. Розенберг – ось далеко не повний перелік імен вчених, які зробили значний внесок у розвиток акустики – науки про звукові коливання [1]. У кожному епоху немало уваги приділялося вивченню звукових явищ та можливості їх практичного застосування. І зараз, у ХХІ сторіччі майже не залишилось галузі людської діяльності, де б не застосовувався ультразвук. Фармацевтика, медицина, ветеринарія, біологія, географія, екологія, косметологія, агрономія, тваринництво, сільське господарство, хімічна та харчова промисловості, машино- та приладобудування, метало- та матеріалознавство, металургія, збагачення корисних копалин, гальванотехніка, нанотехнології, рибна та легка промисловості, автоматизація та будівництво – у всіх цих галузях можливо застосування ультразвукових приладів та технологій.

Ультразвук – хвилеподібно розповсюджуваний коливальний рух часточок середовища, що характеризується низкою відмітних особливостей в порівнянні з коливаннями чутного діапазону [2]. У будь-якому суцільному середовищі – газі, рідині, твердому тілі – в разі виведення молекул чи атомів із положення рівноваги, саме пружні сили, діючі на них з боку сусідніх часточок, будуть повертати їх у положення рівноваги. При цьому часточки будуть виконувати коливальні рухи, які розповсюджуватимуться у вигляді пружних коливань, і у суцільному середовищі являтимуть собою хвилеподібний процес. Через наявність у будь-якому середовищі прагнення до зменшення вільної енергії звукові коливання згасатимуть після одноразового виведення із стану рівноваги частинки середовища. Тому для виникнення та існування у часі будь-яких хвильових процесів потрібне постійне джерело (випромінювач) – збудник коливань з потрібними параметрами частоти та інтенсивності.

За загальноприйнятою класифікацією коливання із частотою від 0 до 20 Гц називають інфразвуковими; діапазон від 20 Гц до $16 \div 20$ кГц утворює чутні для людського вуха звуки; вище цієї частоти розташовано діапазон ультразвукових коливань, а коливання з частотою понад 10^8 Гц отримали назву гіперзвуку [3]. Верхня межа частоти залежить від матеріального пружного середовища, в якому коливання можуть розповсюджуватись лише за умови, що довжина хвилі буде більше міжатомної відстані. На основі досліджень встановлено, що існує ультразвук з частотою понад 100 МГц. Коливання ж з більшою частотою згасають настільки, що поглинаються безпосередньо у поверхні випромінювача. На практиці застосовують ультразвукові коливання з частотою до 25 МГц, бо коливання з більшими частотами можуть розповсюджуватись лише у кристалах [4, 5].

Розглянемо низку відмітних особливостей, які має ультразвук [2].

Довжина будь якої хвилі λ обернено пропорційна частоті коливань f , а швидкість хвилі v дорівнює їх добутку: $v = \lambda f$. Тому у порівнянні зі звуковими коливаннями, ультразвук, який має набагато більшу частоту f , за однакової швидкості розповсюдження v відрізняється набагато коротшою довжиною хвилі λ . Ультразвукові коливання у різних середовищах з довжиною хвилі $1 \div 10$ мм за своїми властивостями аналогічні світловим променям. Вони також можуть заломлюватись та віддзеркалюватись у відповідності до законів оптики. Це дозволяє не лише фокусувати коливання, але й формувати направлене випромінювання у потрібному напрямку та зосереджувати його в потрібному об'ємі.

Розповсюдження ультразвуку можливе у будь-яких матеріальних середовищах незалежно від прозорості, щільності, електропровідності, магнітних властивостей, тощо. Крім того, сучасні технології найбільш часто реалізують гетерогенні процеси між двома чи більшою кількістю неоднорідних середовищ (рідина – газ, рідина – рідина, рідина – тверде тіло, тощо). Але саме в рідких середовищах вплив ультразвукових технологій має найбільш високу ефективність через

значно більший, ніж у газів, питомий хвильовий опір (для води в 3500 разів більше, ніж для газів). Тому за однакових параметрів (амплітуда коливань) із ультразвукової системи найбільша акустична потужність випромінюється саме у рідину [6].

Потужність хвилі пропорційна квадрату частоти, і тому в ультразвукових коливаннях має дуже великі значення – сягає сотень кіловат; інтенсивність (енергія, що розповсюджується через одиницю площі за одиницю часу) також величезна – $1 \div 1000 \text{ Вт/см}^2$. За такої інтенсивності ультразвукової хвилі енергія механічних коливань, розповсюджуваних всередині матеріальних тіл, дуже велика. Перепади звукового тиску перевищують десятки МПа та мають знакозмінні значення: стиснення змінюється розрідженням і навпаки – від 20 000 до 100 000 000 разів за секунду. При цьому часточки середовища коливаються з малими амплітудами (частки мікрона) і величезними прискореннями – близько $10^5 \cdot g$.

У рідинах завдяки отриманому порушенню однорідності середовища у фазі розрідження в найбільш слабких місцях починається виділення розчинених тут газів з утворенням бульбашок, які стабілізуються моношаром органічних речовин. Бульбашки спочатку лінійно, а, зі збільшенням інтенсивності хвиль, не лінійно коливаються з частотою ультразвуку відносно свого рівноважного радіусу, тому самі стають джерелами ультразвукових коливань. Це явище називають стадією стабільної кавітації. З подальшим збільшенням інтенсивності ультразвукового джерела утворюються швидко зростаючі парогазові бульбашки, що миттєво скорочуються в об'ємі та лускаються – настає колапс. Ця стадія називається стадією нестабільної кавітації, яка характеризується розігрівом парогазової суміші у бульбашках до $8\,000 \div 12\,000 \text{ }^\circ\text{K}$, створенням тисків понад 10 000 атм, високою радіальною швидкістю стінок бульбашки, більшою за швидкість звуку (340 м/с). На місті кульки, що луснула, утворюється ударна хвиля, подібна до точкового вибуху [8-10], виникає мікроточковий електричний розряд високої напруги (десятки мільйонів вольт). Все це породжує швидкі мікропотоки та течії. Ультразвукова кавітація забезпечує максимальний енергетичний вплив як на власне рідини, так і на тверді тіла у них [7].

В основу застосування ультразвуку покладено можливість введення всередину речовини величезних енергій, що дозволяє підвищувати ефективність безлічі різних технологічних процесів [11], створювати нові матеріали, отримувати нові речовини, вирішувати багато питань технологічного контролю і вимірів.

Так, в роботі [12] виконано детальний огляд методів переробки корисних копалин із застосуванням ультразвукових коливань. При переробці корисних копалин ультразвукові коливання використовують для руйнування мінеральної речовини і поверхневих плівок (при подрібненні і дезінтеграції мінералів), інтенсифікації процесу магнітної сепарації, флотації, обезводненні та сушці продуктів збагачення.

Використання ультразвуку для подрібнення і диспергування мінералів вважається особливо перспективним тоді, коли необхідно отримувати невеликі кількості матеріалу високої дисперсності або подрібнювати дорогі продукти. Процес ультразвукового подрібнення мінералів відбувається в основному за рахунок ерозії кавітації [9].

Кавітаційні процеси прискорюють процеси дезінтеграції та диспергування мінералів, емульгування флотреагентів і деструкції адсорбційних шарів реагентів, які знаходяться на поверхні часточок концентратів, інтенсифікують процеси очищення поверхні рудних частинок від плівок і налиплих забруднень, підвищують швидкість дифузії рідкої частини пульпи у пори та тріщини, що утворюються на поверхні мінеральних плівок завдяки кавітаційному руйнуванню [13].

Під дією потужного ультразвукового випромінювання в рідині виникають акустичні потоки, які інтенсивно перемішують пульпу, зменшують товщину ламінарного шару біля кордону з твердими тілами і сприяють усуненню дифузійних обмежень. Цей процес відіграє велику роль при ультразвуковому очищенні поверхні рудних часток від забруднень мінерального характеру [14].

При флотації мінералів у воді, заздалегідь оброблених ультразвуком, підвищується витягання мінералів в пінний продукт в порівнянні з флотацією без попередньої обробки води [15].

У зв'язку із залученням до сфери металургійного переділу бідних залізних руд, що заздалегідь піддаються збагаченню, залізорудний концентрат, особливо глибокого збагачення, є дрібним матеріалом, непридатним для безпосереднього проплавлення в доменних печах [16]. Згрудкування – обов'язкова стадія підготовки шихти при виробництві обкотишів, призначена для забезпечення початкової міцності агрегату дисперсних часточок [17]. Згрудкування пиловатих залізних руд і тонких концентратів перед доменною плавкою дозволяє суттєво покращити тех-

ніко-економічні показники роботи доменних печей, збільшити їх продуктивність. В наш час промисловістю найчастіше використовуються два методи згрудкування: агломерація залізних руд і концентратів і виробництво залізрудних обкотишів з концентратів [18]. Спікання тонких концентратів магнітної сепарації та флотації на агломераційних стрічках викликає зниження продуктивності установок і отримання низькоякісного агломерату. Тонкий концентрат навіть після попереднього огрудування створює значний опір проходженню газів, що примушує працювати з низьким шаром шихти на стрічці за мінімального розвитку регенерації тепла і за низької вертикальної швидкості спікання. Надмірна тонкість концентратів, яка є недоліком для агломерату, виявляється їх великою перевагою при огрудуванні. Найбільш міцні обкотиші може бути отримано саме з дуже тонких концентратів [19].

Сирі обкотиші повинні мати достатню міцність для запобігання деформації і руйнуванню під час транспортування до обпалювального агрегату та термостійкістю, тобто властивістю не руйнуватися під час обпалювання. Для підсилення цих властивостей до шихти перед огрудуванням вводять домішки [18].

За своїм складом зміцнювальні домішки можуть бути мінеральними (бентонітові глини, гашене вапно, крейда, хлористий кальцій, хлористий натр, сульфат заліза, залізні та марганцеві глинисті руди) і органічними (лужно-спиртова барда, торф, соєва мука, крохмаль, тощо) [20].

У промисловому виробництві обкотишів в якості зміцнюючих домішок використовують головним чином бентоніти – глини, що відрізняються тонкою дисперсністю і великою спроможністю набрякати при зволоженні, збільшуючись у об'ємі у 15÷20 разів. Для збільшення міцності обкотишів перед орудкуванням у шихту вводять 0,5÷1,5 % цієї глини. Вибір бентоніту зумовлений його властивістю утворювати гелі з надзвичайно розвиненою питомою поверхнею (600÷900 м²/г), яка приблизно у 7 разів більша за поверхні часточок інших сортів глини [18]. Під дією розклинювального ефекту молекул води бентоніт розпадається на дрібні часточки, що сильно гідратуються, завдяки чому об'єм бентоніту зростає у вищезазначену кількість разів. Заповнюючи простір між рудними часточками, колоїдизований бентоніт суттєво підвищує зчеплення в об'ємі концентрату [21]. Бентоніт збільшує пористість сирих обкотишів, що сприятливо відбивається на швидкості видалення вологи під час сушки обкотишів без зниження їх міцності.

Найбільшу гідрофільність, пластичність, водонепроникність і властивість набрякати мають глини з одновалентними катіонами – лужні натрієві та калієві бентоніти. Вони набрякають у 10 разів сильніше за кальцієві. У водних розчинах лужні бентоніти утворюють 70÷90 % колоїдних часточок розміром менше 0,015 мм, а лужноземельні – лише 30÷40 %.

Відома процедура хімічної активації природних лужноземельних бентонітів, яка полягає в обробці їх лужними розчинами, завдяки чому вони перетворюються в штучні лужні бентоніти. Це відбувається завдяки властивості глинистих мінералів віддавати у водний розчин позитивно заряджені іони замість поглинених катіонів. Ця реакція іонного обміну протікає в еквівалентних кількостях і в більшості випадків обернена [20].

В той же час відомі та широко використовувані на практиці механічні методи активації бентонітів, під час яких активність їх часточок різко збільшується. Класичним прикладом такого впливу є тонке здрібнення, шліфування та помел. В роботі [22] таким чином оброблялися Хакаські бентонітові глини: БП1Т₁ – бентоніт Чорногорського родовища, активований содою за фабричною технологією на ОАО «Хакбент» та БМ2Т₂ – бентоніт Чорногорського родовища в природному стані (з кар'єру). Після активації, яка відбувалася в енергонапруженому планетарно-відцентровому млині АГО-2, вміст часточок з розміром < 1мкм збільшився на 25 %. У своїх часточках матеріал «запасав» енергію, що надходить до нього під час механічної активації. Кількість цієї енергії залежить від природи і потужності діючих на нього сил. В статті [23] зазначено про велику увагу, що приділялась вивченню структурно модифікованих глинистих мінералів після механічної деформації за допомогою планетарного шарового млина, оскільки це викликає фізичні та хімічні зміни в оброблених матеріалах. В роботі [24] повідомлялося про вплив зменшення розмірів часточок монтморилонітів на їх властивості.

Як було показано вище, аналогічний вплив на гетерогенну систему має також і ультразвукова обробка. Збільшуючи міжфазну поверхню реагуючих елементів, ультразвукові коливання забезпечують надтонке диспергування, яке не реалізовується іншими способами. Це є одним з механізмів інтенсифікації процесів в рідких середовищах. Кавітація, яка виникає під дією коли-

вань в рідині, та найпотужніші мікропотоки, що її супроводжують, звуковий тиск і звуковий вітер впливають на пограничний шар і «змивають» його. Таким чином, усувається опір перенесенню реагуючих речовин та інтенсифікується технологічний процес. Гетерогенні процеси ультразвукового емульгування (диспергування рідин в рідинах) і диспергування (отримання тонкодисперсних суспензій) пов'язані зі збільшенням поверхні взаємодії і тому лежать в основі інтенсифікації безлічі інших процесів [2].

Бетоніти використовують у дуже широкому спектрі галузей народного господарства: виноробство та виробництво соків і олій (оклеювання для висвітлення вин та соків, екстракція олій); сільське господарство (меліорація та адсорбція при проведенні польових робіт); ливарне виробництво (в'язучий елемент для приготування формувальних та стрижневих сумішей, у проти пригарних покриттях); виготовлення речовин побутової хімії (поглинаючі властивості та домішки до миючих засобів для пом'якшення води, текстильних виробів); земляні роботи (зміцнення стінок свердловин і траншей); корми для тваринництва (харчові домішки, що збільшують показники); екологічні програми (для очищення стічних і оборотних вод, для гідроізоляції вододойм, для очищення питної води, для адсорбції забрудників) [25].

Постановка задачі. Проаналізувати і оцінити можливість ефективного використання ультразвуку для покращення в'язучих властивостей бентоніту, використовуваного у якості зв'язуючої домішки в процесах підготовки сировини до металургійного переділу.

Викладення матеріалу та результати. В роботі [23] вивчався впливу часу обробки ультразвуком на розмір часток і колоїдну стабільність сирового бентоніту з Саудівської Аравії. Зі збільшенням часу обробки ультразвуком від 0 до 120 хв. збільшувалася питома поверхня зразків бентоніту з 26,8 до 64,6 м²/г (рис. 1).

Рис. 1. Питома поверхня бентоніту як функція часу обробки ультразвуком

В роботі [26] було розроблено звукохімічний метод, за яким виготовлено нанобентоніт з новою морфологією нанодропинок. Зразок бентоніту було отримано від Merck. Суспензія бентоніту готувалася в етанолі й оброблялася високо інтенсивним ультразвуковим зондом, зануреним безпосередньо у розчин, з різною потужністю на протязі 0,5, 1, 2, 4 годин. Ультразвук викликає хімічні зміни через явища кавітації, які включають утворення, зростання і миттєве імпульсивне згортання бульбашок в рідині, що може створювати локальні гарячі точки з температурою приблизно 5 000 °С, тиском приблизно 500 атм і тривалістю декілька мікросекунд. Багатохвильовий ультразвуковий генератор (Sonicator 3000; Misonix, Inc., Farmingdale, Нью-Йорк, США), оснащений перетворювачем/приймачем і титановим осцилятором (рупором) діаметром 12,5 мм, працюючий на 20 кГц з максимальною вихідною потужністю 600 Вт, використовувався для створення ультразвуку при 25 °С. Найкраща морфологія і розміри часточок визначалися у зразка, який оброблявся на протязі 4 годин з потужністю ультразвуку 50 Вт. На рис. 2 показано зображення зі скануючого електронного мікроскопу (SEM) контрольного зразка бентоніту, отриманого за тих же температурних умов, але лише при перемішуванні та без ультразвукової обробки (рис. 2а) та нанобентоніту, отриманого методом ультразвукового руйнування (рис. 2б). Гістограма розмірів часток нанобентоніту (рис. 2с) показує, що розмір часток знаходиться в діапазоні від 5 до 50 нм. На зображенні, отриманому з електронного мікроскопу, що просвічує (ТЕМ), нанобентоніт має дрітязну або волокнисту структуру і дуже ефективно диспергує у воді (рис. 3). Проте, площа поверхні у нанобентоніту виявилася меншою (11,08 м²/г), ніж у контрольного зразка бентоніту (24,08 м²/г), а середній діаметр пор – більшим (2,34 нм), ніж у не обробленого зразка (1,97 нм). Автори пояснюють це набагато меншою кількістю пор у нанорозмірному бентоніті. Для вивчення термічної стабільності нанобентоніт було прожарено за температури 800 °С на протязі 4 годин, після чого зразок іще раз досліджували. Авторами було зроблено висновок про те, що прожарювання, мабуть, призводить до повного розкладання і руйнування з'єднання, а також до змін як морфології, так і наноструктури.

Рис. 2. SEM-фотографії: *a* – об'ємний бентоніт; *б* – нанобентоніт; *в* – гістограми розмірів часток нанобентоніту

Вивчали пластинчасті частки мікронного і субмікронного розмірів товщиною < 10 нм отримані шляхом ультразвукової обробки суспензій термічно спученого вермикуліту у воді та у перекису водню на протязі < 12 годин [27]. Використання H_2O_2 давало більш дрібні часточки, ніж H_2O , але в обох середовищах відшаровування та зменшення розмірів часточок спостерігалось лише після однієї години обробки ультразвуком.

В роботі [28] описано водні суспензії натрієвого монтморилоніту (1,80 і 0,60 мас. %), які витримувалися впродовж трьох місяців і оброблялися ультразвуком впродовж різного часу. Після тривалої обробки ультразвуком в концентрованій суспензії спостерігалось поступове збільшення розміру найбільших часток, збільшення середньоарифметичного і медіанного розміру часток, а також зменшення відсоткового вмісту часток діаметром менше 1,5 мкм. З іншого боку, у розбавленій суспензії все відбувалося абсолютно навпаки. У розбавленій суспензії обробка ультразвуком призводила до утворення дрібних набряклих часток в результаті відшаровування великих набряклих тактоїдів. У концентрованій суспензії набря-

кання глини не було повним впродовж тримісячного періоду витримки. В результаті ультразвукової обробки тактоїди розшарувалися, а набрякання часток глини стало ефективнішим.

Рис. 3.ТЕМ-зображення нанобентоніту

В інституті прикладної фізики АН Молдови для застосування глин Молдовського видобутку для оклеювання вин та соків з метою їх висвітлення і депротейнізації було розроблено технологію виготовлення активованої високодисперсної суспензії бентоніту [29]. Експерименти проводились на чотирьох різних дослідних установках, але кращі результати були отримані на бічастотній установці. Дослідження [30] підтверджують доцільність застосування бічастотної кавітації. Одночасна дія вібрацій різних частот на фізико-хімічні процеси обробки значно збільшує ефек-

тивність дій кавітацій. Досліди [29] виконувались на зразках бентоніту з первинними розмірами часток $\sim (200 \div 300)$ мкм. Концентрація твердої фази в суспензії бентоніту складала 5 %. Розміри часток і міру дисперсності суспензії визначали методом електронної мікроскопії. При диспергуванні бентоніту ультразвуковою кавітацією найбільш суттєвий вплив чинить тривалість обробки. Її збільшення супроводжується інтенсивним зменшенням розмірів часток бентоніту до досягнення тонкої постійної дисперсії (починаючи з 12 хв. обробки) незалежно від використовуваних амплітуд коливань. Електронно-мікроскопічний аналіз показав, що в оброблюваній суспензії містяться частки різних розмірів. Проте для досягнення 100 % гомогенної тонкої суспензії потрібна амплітуда коливань вище 20 мкм та тривалість обробки більше 12 хв. Основний недолік ультразвукового методу полягає в тому, що він не дозволяє обробляти бентоніт у великих об'ємах. Метод гідродинамічної та гідроакустичної кавітації дозволяє диспергувати і гомогенізувати рідину і тверді частки у великих кількостях. Згідно з аналізом отриманих результатів з підвищенням тривалості обробки розміри часток бентоніту зменшуються: з гідродинамічним апаратом – до $35 \div 40$ мкм, з пульсуючим ротором – до $8 \div 15$ мкм. Результати дослідження диспергування бентоніту під впливом гідроакустичної бічастотної кавітації представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Розміри часток бентоніту залежно від тиску і тривалості дії гідроакустичної бічастотної кавітації

Тиск в зоні гідроакустичної кавітації P , атм	Тривалість дії гідроакустичної кавітації τ , хв.					
	Контроль	10	20	30	40	50
	Розмір часточок d , мкм					
4	200÷250	52	18	10	6	5
5	200÷250	36	12	5	4	3
6	200÷250	28	7	3	0,5	0,4
7	200÷250	24	5	1,4	0,4	0,4
8	200÷250	22	4	1,0	0,4	0,4

Вивчення відсоткового вмісту часток з розміром $(0,3 \div 2,0)$ мкм залежно від тиску рециркуляції і часу обробки під впливом гідроакустичної бічастотної кавітації свідчить, що однорідна за розмірами часток суспензія складає близько 100 % при тиску $7 \div 8$ атм і тривалості обробки $(40 \div 50)$ хв. (табл. 2).

Таблиця 2

Відсоткова залежність розмірів часточок, переважаючих в суспензії бентоніту після кавітаційної бічастотної обробки

Тиск в зоні бічастотної обробки P , атм	Тривалість кавітаційної обробки τ , хв.				
	10	20	30	40	50
	Максимальний розмір часток d , мкм відсотковий вміст часток з розмірами в межах $(0,3 \div 2,0)$ мкм				
4	$\frac{52 \div 5}{6}$	$\frac{18 \div 3}{22}$	$\frac{10 \div 1}{40}$	$\frac{6 \div 0,5}{55}$	$\frac{5 \div 0,5}{58}$
8	$\frac{22 \div 2}{15}$	$\frac{4 \div 1}{49}$	$\frac{2,0 \div 0,5}{87}$	$\frac{1,6 \div 0,4}{96}$	$\frac{0,5 \div 0,3}{98}$

Бічастотне кавітаційне диспергування дозволяє зменшити витрату бентоніту при освітленні вина в 6 разів. Отримана суспензія складається з води, нанорозмірних газових бульбашок і твердих часток бентоніту, площа контакту яких з продуктами обробки на $2 \div 3$ порядки вище, ніж при класичному методі.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Проведений аналіз свідчить про перспективність застосування ультразвукового методу активації зв'язуючої дії бентоніту при огрудуванні тонко дисперсних металургійних шихт. У всіх досліджених джерелах інформації застосування ультразвукових коливань давало неабиякі результати зі зміни морфологічних та фізичних властивостей оброблюваних матеріалів. Різниця значень параметрів ультразвукового впливу, початкового та кінцевого розмірів часточок досліджуваних матеріалів, часу обробки, тощо скоріш за все пояснюються застосуванням у дослідженнях бентонітів з різним складом і початковими властивостями, їх видобутком із різних родовищ.

Застосування ультразвуку за відповідних параметрів обробки може дати позитивний ефект. Подальше проведення досліджень доцільно продовжити у напрямку вивчення прив'язки певних видів бентоніту до режимних параметрів його обробки ультразвуком для використання в якості зміцнювальних домішок у шихту огрудування.

Список літератури

1. Ультразвуковые приборы "УЗО". <http://www.ultrazvu.com>.
2. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности. **Хмелев В.Н., Сливин А.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В.** – Бийск: Издательство АлтГТУ. – 2010. – 176 с.
3. **Радж Балдев, Раджендран В., Паланичани П.** Применения ультразвука. М.: Техносфера, 2006. – 576 с.
4. **Шутилов В.А.** Основы физики ультразвука / **В.А. Шутилов.** – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1980. – 280 с.
5. **Розенберг Л.Д.** Источники мощного ультразвука / под ред. Л.Д.Розенберга. – М.: Наука, 1969. – 380 с.
6. **Кикучи Е.** Ультразвуковые преобразователи / **Е. Кикучи.** – М.: Мир, 1972. – 424 с.
7. **Эльпинер, И.Е.** Биофизика ультразвука / **И.Е. Эльпинер.** – М.: Наука, 1973. – 384 с.
8. **Розенберг Л.Д.** Фокусирующие излучатели ультразвука. В кн.: Физика и техника мощного ультразвука. Т. 1. Источники мощного ультразвука. – М.: Наука, 1967.
9. **Агранат Б.А., Башкиров В.И.** Критерий оценки интенсивности ультразвуковой кавитации. "Доклады АН СССР", 1968, 179, № 4.
10. **Розенберг Л.Д.** Энергетические соотношения при ультразвуковой кавитации. В сб.: "Ультразвуковая техника", вып. 6. – М.: НИИмаш, 1964.

11. **Новицкий, Б.Г.** Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) / Б.Г. Новицкий. – М.: Химия, 1983. – 192 с.
12. **Губин Г.Г.** Обобщение и анализ возможности использования ультразвуковых колебаний при переработке полезных ископаемых / Г.Г. Губин, Т.П. Ярош, Л.В. Склад // Збагачення корисних копалин: Наук.-тех. зб. – 2016. – Вип. 62 (103). – С. 132-143.
13. Ультразвук в обогащении полезных ископаемых / В.А. Глембоцкий, М.А. Соколов, И.А. Якубович и др. – Алма-Ата: Наука Каз. ССР, 1972. – 229 с.
14. Ультразвук в гидрометаллургии / Б.А. Агранат, О.Д. Кириллов, Н.А. Преображенский и др. – М.: Металлургия, 1969.
15. **Агранат Б.А., Хавский Н.Н., Хан Г.А., Пантелеева Н.Ф., Эльберт А.В.** Флотация в воде, обработанной ультразвуком // Интенсификация процессов извлечения металлов из руд в ультразвуковом поле. – М.: Металлургия, 1969.
16. **Коротич В.И.** Теоретические основы окомкования железорудных материалов. – М.: Металлургия, 1966.
17. **Кокорин Л.К., Лелеко С.Н.** Производство окисленных окатышей. Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы, 2004. – 280 с.
18. Теоретические основы производства окускованного сырья: Учебное пособие для высших учебных заведений. **Ковалёв Д.А., Ванюкова Н.Д., Иващенко В.П. и др.** – НМетАУ. – Днепропетровск: ИМА-пресс. – 2011. – 476 с.
19. **Вегман Е.Ф.** Окускование руд и концентратов. М.: Металлургия. 1968. – 259 с.
20. Сырье для черной металлургии: Справочное издание: в 2-х т. Т.1 Сырьевая база и производство окускованного сырья (сырье, технологии, оборудование) / М.Г. Ладыгичев и др. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 896 с.
21. **Коротич В.И.** Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке / **Коротич В.И.** – М.: Металлургия, 1978. – 208 с.
22. **Лесив Е.М.** Механохимическая активация каолиновых и бентонитовых глин для формовочных смесей и противопожарных красок: автореф. дис. канд. тех. наук: спец. 05.16.04 «Литейное производство» / **Е.М. Лесив.** – Челябинск, 2007. – 21 с.
23. **Mekhamer W.K.** The Colloidal Stability of Raw Bentonite Deformed Mechanically by Ultrasound. J Saudi Chem Soc. 2010, 14(3), 301–306.
24. **Christidis, G.E., Dellisanti, F., Valdre, G., Makri, P.,** 2005. Clay Miner. 40, 511–522] i [Bastida, J., Kojdecki, J., Pardo, M.A., Amoros, P., 2006. Clays Clay Miner. 54, 390–401.
25. **Максютова О.** Бентонит и его применение / TheChemicalJournal // – 2017 – №12. – С. 20-25.
26. **Darvishi Z., Morsali A.** Synthesis and Characterization of Nano-bentonite by Sonochemical Method. Ultrason-Sonochem. 2011, 18, 238–242.
27. **Nguyen A.N., Reinert L., Lévêque J.-M., Beziat A., Dehaut P., Juliaa J.-F., Duclaux L.** Preparation and Characterization of Micron and Submicron-sized Vermiculite Powders by Ultrasonic Irradiation. Appl Clay Science. 2013, 72, 9–17.
28. **Lapides I., Yariv Sh.** The Effect of Ultrasound Treatment on the Particle-size of Wyoming Bentonite in Aqueous Suspensions. J Mater Sci. 2004, 39, 5209–5212.
29. Приготовление высокодисперсных суспензий бентонита в бичастотном кавитационном поле / **П.Г. Думитраш, М.К. Болога, Т.Д. Шемякова** // [Электронная обработка материалов](#). 2015. – Том 51 (№1), – с. 85-91.
30. **Маргулис М.А., Хавский Н.И.** О механизме одновременного воздействия двух частот акустических колебаний на физико-химические и химические эффекты. Всес. симпозиум «Акустическая кавитация и применение ультразвука в химической технологии» (Славское, 26 февр. – 1 марта 1985 г.). Тезисы докладов. Славское, 1985, с. 93–94

Рукопис подано до редакції 06.04.2021

УДК 004.942

Ж.Г. РОЖНЕНКО, канд.техн. наук, О.К. ДАНИЛЕЙКО, ст. викл.,
Г.В. КОЛОМЦ, асист., А.В. ЯТЧУК, студ.
Криворізький національний університет

ВИКОРИСТАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРІВ НА БАЗІ ARM CORTEX В ЕЛЕКТРОМЕХАНІЦІ

Мета. Проведений аналіз ринку мікропроцесорів показав поширення використання пристроїв мікроконтролерів на основі ARM Cortex. У роботі на прикладі контролера STM32, побудованого на основі ARM Cortex, розглянуто використання мікропроцесорів у електромеханічних системах. Для більшості сучасних електромеханічних систем необхідні пристрої, що будуть об'єднувати різноманітні пристрої в єдину мережу для обміну даними. В роботі проведено огляд номенклатури мікропроцесорів різних моделей та виробників та обрано найбільш прийнятний варіант відповідно до висунутих вимог.

Також було проведено вибір периферійних пристроїв для роботи в досить поширеній локальній мережі промислової автоматики Modbus.