

УДК 624.131:543.442.2

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЙ КОМПОНЕНТІВ ГЛИНОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ ІНФРАЧЕРВОНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ

Д-р техн. наук Л. В. Трикоз, канд. техн. наук О. С. Борзяк, інж. В. Ю. Савчук

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ КОМПОНЕНТОВ ГЛИНОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Д-р техн. наук Л. В. Трикоз, канд. техн. наук О. С. Борзяк, инж. В. Ю. Савчук

STUDY OF INTERACTION OF CLAY-CONTAINED MATERIALS BY INFRARED-SPECTROSCOPY METHOD

DSc. L. Trykoz, PhD O. Borziak, eng. V. Savchuc

У статті показано можливість створення композиційних матеріалів, до складу яких входять глинисті ґрунти та відходи виробництва. Як відходи було використано металургійні шлаки та активний мул станцій біологічного очищення міських стічних вод. Було досліджено особливості структури таких матеріалів методом інфрачервоної спектроскопії. Результати свідчать про утворення структури за рахунок іон-іонних взаємодій компонентів. Підтверджено можливість утворення продуктів гідратації шлаків без введення лужних активаторів.

Ключові слова: глиновмісний композиційний матеріал, шлак, активний мул, інфрачервона спектроскопія.

В статье показана возможность создания композиционных материалов, в состав которых входят глинистые грунты и отходы производства. В качестве отходов были использованы металлургические шлаки и активный ил станций биологической очистки городских сточных вод. Были исследованы особенности структуры таких материалов методом инфракрасной спектроскопии. Результаты свидетельствуют об образовании структуры за счет ион-ионных взаимодействий компонентов. Подтверждена возможность образования продуктов гидратации шлаков без введения щелочных активаторов.

Ключевые слова: глинодержащий композиционный материал, шлак, активный ил, инфракрасная спектроскопия.

In the article a possibility of composition material creation is shown that contains clay soils and waste of produce. As the waste were used metallurgical slags and active sludge of biological treatment stations of urban wastewater. Structure features of such materials were researched by the infrared-spectroscopy method. Results indicate that the structure forms due to an ion-ion interaction of components. The formation possibility of hydration products of slags without alkali activator was confirmed. In the presence of slag, the active sludge acquires the properties of anionic surfactants. It is able to adsorb on positively charged surfaces of lime particles, and carbonate soil constituents. The slag addition contributes to the formation of an optimal sample structure with the placement of smaller particle sizes in layers between larger particles. The using of active sludge and slag provides an increasing of bearing capacity of the soil, an expansion of the

raw material base, an improving the ecological situation in cities, and the possibility of reuse of the stabilized soil.

Keywords: *clay-contained composite material, slag, active sludge, infrared spectroscopy.*

Вступ. Композиційні матеріали на основі ґрунтів можуть застосовуватися в усіх галузях будівництва. Найбільш перспективним є їх використання для улаштування основ під дорожні покриття, теплоізолюючих, морозозахисних, капіляронеривних шарів, для укріплення верхніх шарів земляного полотна залізниць, виробничих майданчиків тощо. При цьому використання ґрунтів, оброблених різними в'язучими, є тільки одним із можливих технічних рішень інженерних завдань. Недоліком цих композицій є висока вартість, викликана високою витратою в'язучих – портландцементу, вапна та інших, для забезпечення необхідної міцності матеріалу, а також висока потреба в кондиційних мінеральних ґрунтах. Виходячи з економічних міркувань найбільше застосування в будівництві будуть мати композиційні матеріали на основі ґрунтів, у яких основну частину становлять відходи, що мають навіть слабо виражені в'язучі властивості.

Металургійні шлаки є продуктом технологічних процесів переробки, а також розпаду сталеплавильних і доменних шлаків. Шлаки активно реагують з водою і розчиненими в ній компонентами з підвищенням величини показника рН і виходом у розчин деяких шлакоутворювальних елементів. Процес гідролізу йде до утворення на поверхні шлакових зерен плівки вторинних мінералів, найважливішими серед яких є карбонати і гідросилікати кальцію. З формуванням останніх пов'язана притаманна шлакам, переважно доменного виробництва, здатність до самоцементації (гідравлічна активність шлаків). Аналіз даних про будівельні властивості металургійних шлаків України й досвіду використання їх у промислових, дорожніх та інших будівельних об'єктах показав широкий

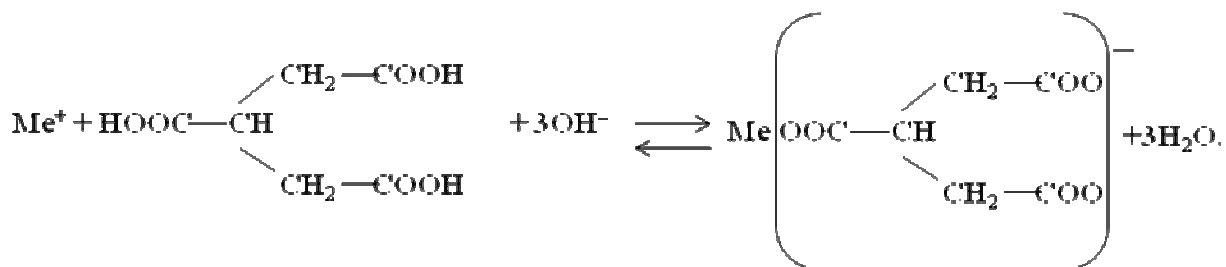
діапазон можливостей застосування їх замість природних кам'яних і ґрунтових матеріалів, а також бетонних елементів конструкцій.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Загальноприйнято, що шлаки тверднуть тільки за наявності активатора – лужного компонента. Однак у літературі описано випадки застосування шлаків і без активації [1-3]. На наш погляд, сповільнене у цьому випадку набирання міцності має свої переваги при повторному застосуванні вийнятого із котловану або траншеї ґрунту замість кондиційного, який привозиться. При цьому може бути здійснено попереднє змішування ґрунту зі шлаком, а потім зворотна засипка у котлован або траншею, де відбудеться твердіння композиції без руйнування конденсаційно-кристалізаційних зв'язків, які встигли б виникнути за наявності лужного активатора. Ще один недолік застосування лужного активатора, наприклад вапна, полягає в утворенні еtringіту, який призводить до руйнування мікроструктури композицій [4, 5]. Було з'ясовано у [6], що глюконова кислота ($C_6H_{12}O_7$) є придатним уповільнювачем для таких композицій, яка сповільнює гідратацію щонайменше на 28 діб. Уповільнювач подовжує період гідратації та запобігає головним чином утворенню небажаних продуктів. Отже, органічні речовини можуть бути ефективними складовими таких композиційних матеріалів. Основна мета досліджень [7] полягала у визначенні можливості стабілізації ґрунтів та осаду стічних вод для отримання недорогого альтернативного матеріалу насипів шляхом додавання шлаків. Шлаки використовувалися як заміна слабого ґрунту при співвідношеннях 0, 25, 50, 75 та 100 %, коли осад стічних вод і ґрунт змішувалися зі шлаками окремо. Результати

лабораторних випробувань довели, що змішування шлаків з ґрунтом або осадом стічних вод покращує технічні властивості і що шлак може бути потенційно використаний як стабілізатор ґрунту.

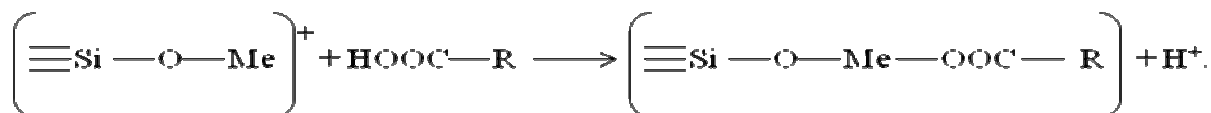
Активний мул біологічних очисних споруд стічних вод містить три складові: біологічну (мікроорганізми, найпростіші, водорості, гриби); органічну (нуклеїнові та амінокислоти, білки, полісахариди, гумусові кислоти та ін.); неорганічну (гідроксиди, фосфати, карбонати, силікати і т.д.), кожна з яких здатна зв'язувати іони металів доменного шлаку і глинистих

ґрунтів. Вивчення у [8] хімічного складу мулів показало, що основними компонентами мулів є полі- й моносахариди – 26%; амінокислоти й білковоподібні речовини – 28%, ліпіди – 17%, неорганічні сполуки – 28%. Найвність в оксикислотах і амінокислотах двох і більше функціональних груп (–ОН і –СООН, –NH₂ і –СООН і т.п.) сприяє зростанню їх комплексоутворювальних властивостей і взаємодії з гідроксильними групами, розташованими на поверхні глинистих частинок з утворенням просторової системи



Амінокислоти є кращими комплексоутворювачами в порівнянні з оксикислотами, так як група –NH₂ є сильнішим донором електронної пари, ніж гідроксидні –ОН. Природні амінокислоти, що входять до складу білків, зазвичай мають одну аміногрупу й одну карбоксильну групу. Кількість аміногруп визначає більш високу міцність

компонентів, тоді як кількість карбоксильних груп – одна чи дві – впливає мало. Значну спорідненість до твердої поверхні мають гуміноподібні речовини. Взаємодія гумусових кислот із силікатами й алюмосилікатами можлива за рахунок зв'язку карбоксилем гумінових речовин з ОН-групами адсорбенту або шляхом утворення мінеральних містків, наприклад



Участь в утворенні зв'язків між органічними речовинами з частинками доменного шлаку і глинистого ґрунту можуть брати азотвмісні групи органічних молекул. Значну роль в адсорбції органічних речовин силікатами,

алюмосилікатами й оксидами, напевне, відіграють водневі зв'язки. У їх утворенні беруть участь кисневі атоми або гідроксильні групи поверхні та гідроксильні або аміногрупи органічних молекул. Таким чином, у зв'язуванні мулом

доменного шлаку з частинками глинистого ґрунту беруть участь біологічна складова активного мулу, тобто мікроорганізми, які мають на своїй поверхні різні функціональні групи; органічна складова, у якій у зв'язуванні ґрунтового матеріалу основну роль відіграють білкові молекули і гуміно-подібні речовини; мінеральні компоненти мулу, силікати й алюмосилікати.

Вивченню можливостей активного мулу станцій біологічного очищення стічних вод у суміші зі шлаком бути стабілізатором ґрунту присвячено роботи [9, 10]. Установлено, що додавання активного мулу зменшує коефіцієнт стисливості зразків у 4 рази порівняно з глиною. У порівнянні із зразками, які містять 50 % активного мулу, зразки із додаванням 50 % шлаку, зменшують стисливість у 12 разів. Додавання в глину активного мулу дає змогу збільшити модуль деформації з 7,8 до 20,3 МПа, шлак підвищує цю величину до 52,7 МПа. При виготовленні композиційного матеріалу на основі глинистих ґрунтів функціональні групи активного мулу взаємодіють з гідроксильними групами, розташованими на поверхні глинистих частинок, з утворенням просторової структури. Крім того, введення активного мулу сприяє пептизації – руйнуванню агрегатів ґрунту й утворенню контактів між окремими частинками, що й призводить до зменшення стисливості зразків за рахунок зменшення загальної пористості. Додавання шлаку сприяє утворенню оптимальної структури зразків з розміщенням менших за розмірами частинок у прошарках між більшими частинками. Зміна структури викликає

зміну певною мірою типу хімічного зв'язку. Таким чином, це може бути зафіксовано при дослідженні інфрачервоних спектрів зразків.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою дослідження є підтвердження описаного вище механізму взаємодії функціональних груп активного мулу з поверхневими іонами шлаку та ґрунту на основі отриманих інфрачервоних спектрів зразків композиційних матеріалів. Це зумовлює такі завдання дослідження: зіставити спектри вихідних матеріалів та кінцевих сумішей; виявити та проаналізувати зміни, які відбуваються в смугах поглинання валентних та деформаційних коливань відповідних елементів; знайти ознаки лужної активації шлаків при додаванні активного мулу; порівняти види та кількість новоутворень у композиційних матеріалах.

Матеріали і методи дослідження. Зразки для досліджень готували шляхом перемішування глинистого ґрунту з активним мулом у пропорційному відношенні за масою 1:1. Оптимальність такого співвідношення було встановлено попередніми дослідженнями [11]. У підготовлену таким чином суміш додавали кислий (табл. 1) або основний (табл. 2) шлак у співвідношенні за масою 1:1. Склад активного мулу наведено в табл. 3. Тобто неорганічна частина активного мулу має склад, ідентичний хімічному складу більшості металургійних шлаків. Із суміші глини, води, активного мулу та шлаків було виготовлено зразки, які після витримання в нормальних умовах протягом 7 діб було досліджено методом інфрачервоної спектроскопії.

Таблиця 1

Хімічний склад кислого шлаку

Оксид	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	MnO	FeO	TiO ₂
Вміст, %	5,72	18,02	38,44	1,43	44,17	0,25	0,47	0,64

Таблиця 2

Хімічний склад основного шлаку

Оксид	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	MnO	FeO	TiO ₂
Вміст, %	14,36	7,51	31,23	2,2	31,75	2,2	1,5	0,34

Таблиця 3

Хімічний склад мінеральної частини активного мулу, відсоток до абсолютно сухої речовини

Оксид	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	ZnO+CuO+ +NiO+Cr ₂ O ₃
Вміст, %	7-35	7-27	7-20	8-17	1,6-11	0,5-4	1,5-8,5	1,5-7	0-6

Підготовку зразків до дослідження здійснювали в такій послідовності: зразок висушували до постійної маси при температурі 70 ± 3 °С, подрібнювали до розміру $0,5 \div 1,0$ мм, видаляли великі частинки і розтирали в агатовій ступці до повного проходження через сито з розмірами отворів 0,063 мм. Інфрачервоні (ІЧ) спектри поглинання отримували за допомогою інфрачервоного Фур'є-спектрометра Bruker Alpha. Цей прилад підключається до комп'ютера і за допомогою програми OPUS ІЧ-спектри в графічному вигляді відображаються на екрані монітора і записуються в пам'ять комп'ютера. Діапазон довжин інфрачервоних хвиль $400-4000$ см⁻¹. Зразки для цього дослідження, відібрані й оброблені за описаною вище методикою, у вигляді порошку засипали в прес-форму і під тиском $8 \div 8,5$ МПа запресовували в таблетки з додаванням КВг. ІЧ-спектри ідентифікували за [12].

Результати дослідження. Для виявлення змін, що відбулися в структурі глинистих матеріалів, було виконано такі експерименти. Аналізувалася структура зразків вихідної глини (рисунок, зразок 1), суміші глини і кислого (рисунок, зразок 2) або основного (рисунок, зразок 3) шлаку, суміші глини й активного мулу (рисунок, зразок 4), суміші «глина + активний мул + шлак кислий» (рисунок, зразок 5), суміші

«глина + активний мул + шлак основний» (рисунок, зразок 6), активного мулу (рисунок, зразок 7), шлаку кислого (рисунок, зразок 8), шлаку основного (рисунок, зразок 9). Про структурні зміни судили за інфрачервоними спектрами зазначених зразків. Було проаналізовано зміну спектрів поглинання, характерних для С–О ($1410-1450$ і $875-880$ см⁻¹), валентних коливань Si–O–Si тетрадрів кремнієкисневого каркаса ($1094-1108$ см⁻¹), валентні та деформаційні Si–O і Si–O–Si коливання тетрадрів кремнієкисневого каркаса ($1200-1100$ і $530-460$ см⁻¹), Si–O–Si коливання кілець SiO₄-тетрадрів ($830-750$ см⁻¹), деформаційні коливання зв'язків Me–O (467 і 524 см⁻¹), ОН-валентні і деформаційні коливання вільної та зв'язаної води ($3100-3500$ і $1580-1680$ см⁻¹).

Порівнюючи спектри вихідних шлаків (рисунок, зразки 8 і 9), бачимо, що вони мають схожі смуги в області високих хвильових чисел ($2500-4000$ см⁻¹), що характеризують валентні коливання ОН-груп, а також в області $1250-1400$ см⁻¹, що характеризують деформаційні коливання ОН-груп. Низькохвильовою частиною (менше за 2000 см⁻¹) спектри відрізняються. Так, спектр основного шлаку відрізняється більшою чіткістю смуг в областях поглинання 729 і 619 см⁻¹, це означає, що більша кількість зв'язків Si–O в тетраедри SiO₄ обумовлена впливом катіонів металів, що узгоджується з різним

хімічним складом шлаків (табл. 1, 2). Також спостерігається зсув смуги, яка відповідає деформаційним коливанням Al–O, у бік низьких частот (467 см^{-1} для кислого шлаку і 478 см^{-1} для основного).

Аналізуючи зразок глини з активним мулом (рисунок, зразок 4), бачимо, що основна відмінність міститься у високочастотній частині спектра. У порівнянні із зразками чистої глини (рисунок, зразок 1) і чистого активного мулу (рисунок, зразок 7) відбувається сильне зменшення оптичної щільності смуг поглинання 3400 , 2924 , 1640 і 1430 см^{-1} . Розташування смуг у цих інтервалах визначається не будовою OH-груп, а силою утворених ними водневих зв'язків. Інтервал частот деформаційних коливань гідроксильних груп поширюється від довгих хвиль до 1500 см^{-1} , деформаційних коливань молекул води в інтервалі до 1580 – 1680 см^{-1} , одного з деформаційних коливань іона H^{3+} – в інтервалі 1680 – 1800 см^{-1} . Отже, структуру зразків з глини й активного мулу формують слабкі водневі зв'язки, що підтверджується низькою міцністю і водонестійкістю зразків.

Спектри зразків глини з двома видами шлаку (рисунок, зразки 2 і 3) відрізняються смугами поглинання в областях 1000 і 500 – 800 см^{-1} , які стосуються коливань Si–O–Si або Si–O–Me. Для зразків глини з основним шлаком ці смуги більш інтенсивні й чіткі, що означає більшу впорядкованість структури.

При аналізі зразків глини з активним мулом і двома видами шлаків (рисунок, зразки 5 і 6) спостерігається повний збіг спектрів у високочастотній області зі зменшенням смуг поглинання, які характеризують валентні й деформаційні коливання OH-груп (широка несиметрична смуга в області 3200 – 3500 см^{-1}), у тому числі адсорбована, координувана й гідроксильна (2923 , 2853 см^{-1}) вода, в порівнянні із зразками чистої глини (рисунок, зразок 1) і активного мулу (рисунок, зразок 7). Зникнення смуг

активного мулу в спектрі (рисунок, зразок 7), характерних для різного виду зв'язків C–O, C–O–H, C–C, C–H (1630 , 1416 , 1384 см^{-1}), означає адсорбцію органічної складової активного мулу та її взаємодію з поверхневими іонами частинок глини і шлаку. Положення смуги 1035 см^{-1} , яка відповідає за коливання зв'язку Si–O в тетраедрі SiO_4 , залишається незмінним, хоча збільшується її інтенсивність. Відсутність Si–O-валентних смуг (область 1000 – 900 см^{-1}) свідчить про іонний характер зв'язку між структурними одиницями.

Що стосується низькочастотної частини спектра, то порівнюючи зразки глини з активним мулом і двома видами шлаків (рисунок, зразки 5 і 6), можна встановити таке. Вид смуг поглинання в основному однаковий, проте вони відрізняються інтенсивністю й невеликим зсувом один щодо одного, що означає виникнення подібних продуктів взаємодії глини, шлаку й активного мулу, хоча і в різних співвідношеннях. На спектрах зразків 5 і 6 (рисунок) смуги, які характерні для деформаційних коливань Si–O–Si, не збігаються, це говорить про те, що гель сформовано з різним Si/Al співвідношенням. Точне положення цієї смуги визначається Si/Al співвідношенням у продуктах реакції та особливо координаційним числом атомів Al. Заміна Si на Al приводить до зміщення відповідної смуги в область менших значень хвильових чисел. Наявність смуг 469 і 470 см^{-1} , що стосуються до деформаційних коливань Al–O, свідчить про лужну активацію шлаків, більш виражену для основного шлаку. Поява в зразку 5 (рисунок) смуг 779 і 693 см^{-1} , відсутніх у вихідному шлаку (рисунок, зразок 8), викликано в цьому типі структур лужною активацією. Взаємодія з двовалентними іонами металів, що входять до складу активного мулу і шлаку, підтверджується переміщенням смуг до більш низьких частот у результаті зростання середньої відстані Me–O та іонного характеру зв'язку.

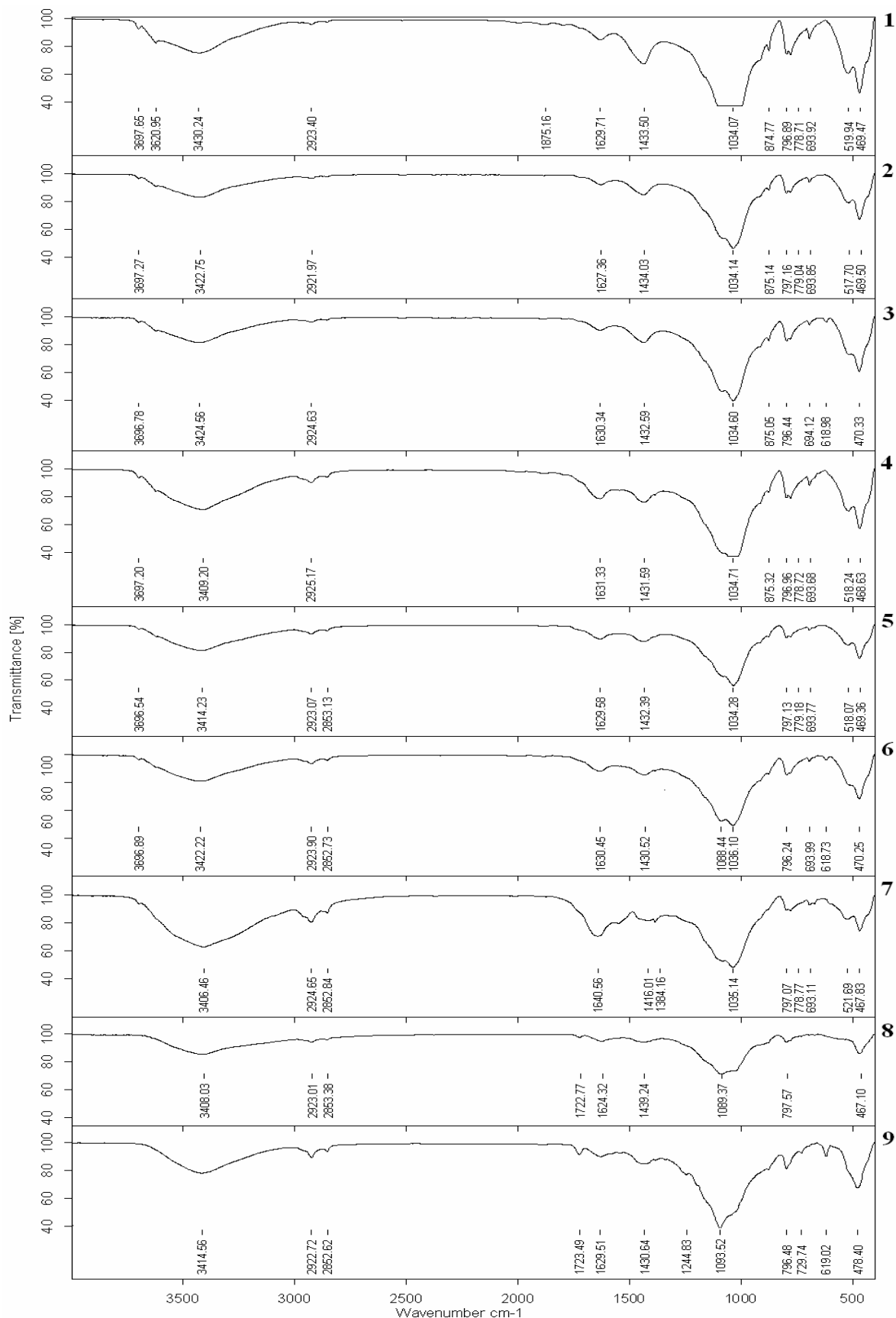


Рисунок. ІЧ-спектри зразків

Активний мул за певних умов (дисоціації карбоксильних груп і аміногруп білків з утворенням гідроксильних іонів) може бути лужним активатором твердіння шлаку. З часом міцність матеріалу збільшується, що є типовим для всіх шлаковмісних матеріалів. Указані процеси і реакції перетворюють ґрунт, у результаті чого виникає ґрунтовий матеріал з новими будівельними властивостями.

Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Білки є амфотерними поверхнево-активними речовинами (ПАР) за рахунок здатності функціональних груп $-COOH$, $-NH_3OH$ у залежності від рН по різному дисоціювати й утворювати за низьких рН органічний катіон ($R-COOH \rightarrow R-CO^+ + OH^-$; $R-NH_3OH \rightarrow R-NH_3^+ + OH^-$), а за високих рН – органічний аніон ($R-COOH \rightarrow R-COO^- + H^+$; $R-NH_3OH \rightarrow R-NH_3O^- + H^+$). У присутності шлаку, з якого в результаті гідратації виділяється вапно, білки та відповідно активний мул набувають властивості аніонної ПАР і здатності адсорбуватися на позитивно заряджених поверхнях часток вапна, карбонатних складових ґрунту. Це дає змогу застосувати активний мул як іоногенну поверхнево-активну речовину з метою підвищення міцності ґрунтових матеріалів. Уведення аніонактивної ПАР

сприяє також пептизації – руйнуванню агрегатів ґрунту й утворенню контактів між окремими частинками. Крім того, адсорбована ПАР утворює на гідрофільних мінеральних частках гідрофобні оболонки, зменшуючи водопроникність та збільшуючи морозостійкість кінцевого ґрунтового матеріалу. Додавання шлаку сприяє утворенню оптимальної структури зразків з розміщенням менших за розмірами частинок у прошарках між більшими частинками. Застосування активного мулу і шлаку забезпечує підвищену несучу здатність ґрунту, розширення сировинної бази для його отримання з одночасним поліпшенням екологічної ситуації в містах, забезпечує можливість вторинного використання закріпленого ґрунту.

Таким чином, фізико-хімічні дослідження підтвердили теоретичні уявлення про можливість створення композиційних матеріалів на основі глинистих ґрунтів, активного мулу і шлаків. Підтверджено можливість утворення продуктів гідратації шлаків без уведення лужних активаторів. Сформульовані гіпотези є підґрунтям для розроблення фізико-математичних моделей зміни властивостей нестійких ґрунтів на основі розвинених у дослідженні принципів фізико-хімічної механіки дисперсних систем і матеріалів.

Список використаних джерел

1. Kaneko, T. Effect of sand content on stabilization of dredged soil-steel slag mixture / T. Kaneko, Y. Watabe // Japanese Geotechnical Society Special Publication. – 2016. – Vol. 2. – Iss. 6. – P. 302-305. Available from: <http://dx.doi.org/10.3208/jgssp.jpn-120>.
2. Oh, M. Evaluation on the compressive strength of dredged soil-steel slag / M. Oh, G. L. Yoon, Y. W. Yoon // Japanese Geotechnical Society Special Publication. – 2016. – Vol. 2. – Iss. 6. – P. 298–301. Available from: <http://dx.doi.org/10.3208/jgssp.kor-12>.
3. Perná, I. The setting time of a clay-slag geopolymer matrix: the influence of blast-furnace-slag addition and the mixing method / I. Perná, T. Hanzlíček // J. of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 112. – P. 1150–1155. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.069>.
4. Kavak, A. Reuse of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) in Lime Stabilized Embankment Materials / A. Kavak, G. Bilgen // Intern. J. of Engineering and Technology. – 2016. – Vol. 8. – Iss. 1. – P. 11–14. Available from: <http://dx.doi.org/10.7763/ijet.2016.v6.850>.

5. Islam, S. 1-D Compression Behaviour of Acid Sulphate Soils Treated with Alkali-Activated Slag / Shahidul Islam, Asadul Haque, Ha Hong Bui // *Materials*. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 4. – P. 289-302. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/ma9040289>.

6. Schneider, N. The effect of D-gluconic acid as a retarder of ground granulated blast-furnace slag pastes / Nick Schneider, Dietmar Stephan // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 123. – P. 99-105. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.127>

7. Kaya, Z. Effect of slag on stabilization of sewage sludge and organic soil / Zulkuf Kaya // *Geomechanics and Engineering*. – 2016. – Vol. 10. – Iss. 5. – P. 689-707. Available from: <http://dx.doi.org/10.12989/gae.2016.10.5.689>.

8. Зыкова, И. В. Обезвреживание избыточных активных илов и осадков сточных вод от тяжелых металлов [Текст]: автореф. дис. ... д-ра хим. наук: 03.0016 "Экология" / И. В. Зыкова. – С.Пб., 2008. – 32 с.

9. Трикоз, Л. В. Дослідження деформаційних характеристик ґрунтового матеріалу з використанням відходів [Електронний ресурс] / Л. В. Трикоз, В. Ю. Савчук // *Наука та прогрес транспорту: Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. А. В. Лазаряна: науковий журнал*. – 2017. – № 2 (68). – С. 166-172. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.15802/stp2017/100249>.

10. Investigation into Electrical Conductivity of the Multicomponent System of Trackbed / L. V. Trykoz, I. V. Bagiyanc, V. Yu. Savchuk [et al.] // *Intern. J. of Engineering Research in Africa*. – 2016. – Vol. 25. – P. 52–57. Available from: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.25.52>.

11. Трикоз, Л. В. Застосування активного мулу станцій біологічного очищення для стабілізації ґрунтів [Текст] / Л. В. Трикоз, В. Ю. Савчук // *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізн. трансп.* – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 148. – Ч. 2. – С. 58-62.

12. Накамото, К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений [Текст]: пер. с англ. / К. Накамото. – М.: Мир, 1991. – 536 с.

Трикоз Людмила Вікторівна, д-р техн. наук, професор кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net ORCID 0000-0002-8531-7546.

Борзяк Ольга Сергіївна, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-63. E-mail: borziak.olga@gmail.com ORCID 0000-0002-8815-6936.

Савчук Валентина Юріївна, здобувач кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-63. E-mail: kalmukova27@ukr.net ORCID 0000-0001-5971-5041.

Trykoz Liudmyla, doct. of techn. sciences, professor, Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. Tel. (057)730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net ORCID 0000-0002-8531-7546.

Borziak Olga, PhD, associate professor, Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. Tel. (057)730-10-63. E-mail: borziak.olga@gmail.com ORCID 0000-0002-8815-6936.

Savchuc Valentyna, graduate student, Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. Tel. (057)730-10-63. E-mail: kalmukova27@ukr.net ORCID 0000-0001-5971-5041.

Стаття прийнята 16.08.2017 р.