

## ЗМІНА ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ТА ГІДРОФІЛЬНОСТІ АКТИВОВАНОГО ВУГІЛЛЯ ПІСЛЯ УЗ ОПРОМІНЕННЯ У ДОКАВІТАЦІЙНОМУ РЕЖИМІ

**І. М. Бордун, Р. М. Корецький, В. В. Пташник, М. М. Садова**

*Національний університет «Львівська політехніка»,*

*м. Львів,*

Надійшла до редакції 17. 06. 2014

Показано ефективність докавітаційного ультразвукового (УЗ) опромінення для подрібнення дрібнодисперсних вугільних матеріалів. Результати подрібнення залежать від наданої енергії водно-вугільній суспензії та процентного вмісту вугілля у ній. Встановлено, що у залежності від поставленої задачі і враховуючи взаємозв'язок між параметрами опромінення, можна досягнути зміни гранулометричного складу активованого вугілля у потрібному напрямку. Незалежно від обраного режиму УЗ опромінення спостерігалось зменшення зольності та зростання кислотності поверхні обробленого вугілля. Встановлено, що зміна гідрофільної поверхні пор залежить від енергії УЗ впливу, а також процентного вмісту активованого вугілля у суспензіях. **Ключові слова:** активоване вугілля, ультразвукове опромінення, поверхневі групи, фракціонування.

## ИЗМЕНЕНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА И ГИДРОФИЛЬНОСТИ АКТИВИРОВАННОГО УГЛЯ ПОСЛЕ УЗ ОБЛУЧЕНИЯ В ДОКАВИТАЦИОННОМ РЕЖИМЕ

**И. М. Бордун, Р. Н. Корецкий, В. В. Пташник, М. М. Садовая**

Показано эффективность докавитационного ультразвукового (УЗ) облучения для измельчения мелкодисперсных угольных материалов. Результаты измельчения зависят от переданной энергии водно-угольной суспензии и процентного содержания угля в ней. Установлено, что в зависимости от поставленной задачи и учитывая взаимосвязь между параметрами облучения, можно добиться изменения гранулометрического состава активированного угля в нужном направлении. Независимо от выбранного режима УЗ облучения наблюдалось уменьшение зольности и увеличение кислотности поверхности обработанного угля. Установлено, что изменение гидрофильной поверхности пор зависит от энергии УЗ воздействия, а также процентного содержания активированного угля в суспензиях.

**Ключевые слова:** активированный уголь, ультразвуковое облучение, поверхностные группы, фракционирование.

## CHANGING OF THE GRANULOMETRIC COMPOSITION AND HYDROPHILIC OF ACTIVATED CARBON AFTER ULTRASOUND IRRADIATION IN PRECAVITATIONAL REGIME

**I. M. Bordun, R. M. Koretsky, V. V. Ptashnyk, M. M. Sadova**

The efficiency of precavitational ultrasound ( $U$ ) irradiation for crushing of finely dispersed coal materials is showed. The crushing results depend on the provided energy by coal-water suspension and on the percentage of carbon in it. It is established that you can achieve a change of granulometric composition of activated carbon in the right direction depending on this task and considering the relationship between exposure parameters. Decrease in ash content and growth of surface acidity of the treated carbon is observed, independently of the selected mode  $U$  irradiation. It was established that the change in pore hydrophilic surface depends on the energy of  $U$  influence, and the percentage of activated carbon in the suspensions.

**Keywords:** activated carbon, ultrasound irradiation, surface group, fractionation.

**ВСТУП**

Матеріали на основі вуглецю знаходять широке застосування у промисловості завдяки унікальним текстурним і хімічним властивостям поверхні, які залежать від вибору методу отримання та активації вихідного матеріалу і можуть суттєво змінюватися. У процесі карбонізації та активації вуглецевих матеріалів отримуються різні види вугілля, які мають різні властивості поверхневих груп, різну ступінь обгару, різний розподіл пор. Недоліком основних методів активації є втрати внаслідок вигорання значної частини вихідної вуглецевовмісної сировини, а також складність керування властивостями отриманого вугілля. Тому на перше місце в технологічних процесах поряд з дешевиною та екологічністю починають виходити методи модифікації вже отриманих вуглецевих матеріалів [1—3].

Для модифікації найчастіше використовуються різні кислоти [4, 5] та термооброблення при підвищених температурах у контрольованих атмосферах [4, 6, 7]. Таке оброблення суттєво змінює в першу чергу наявні поверхневі групи, оскільки, як зазначено в [7], активоване вугілля (АВ) з поверхневими групами є на два порядки активнішим, ніж АВ з однорідною поверхнею у багатьох окисно-відновних та кислотно-основних реакціях. Однак, з розширенням областей застосування вуглецевих матеріалів все частіше використовуються екологічні технології оброблення, засновані на різноманітних фізичних впливах на речовину [2, 8], серед яких важливе місце посідають ультразвукові (УЗ) технології [9—11]. Використання УЗ спрощує конструкцію реактора, підвищує його надійність і довговічність, знижує витрати енергії, прискорює масообмінні процеси тощо.

**МЕТОДИКА УЗ ОПРОМІНЕННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ**

УЗ диспергування АВ марки БАУ-А здійснювали в установці на основі сферичного резонатора, виготовленого з кераміки марки ТБК-3, з резонансною частотою 22 кГц. Перемішування вугільного порошку під час роботи резонатора реалізовували за

допомогою магнітного перемішувача. Дисперсію готували на основі дегазованої дистильованої води та полідисперсного АВ, просіяного крізь сито 100 мкм.

У процесі УЗ опромінення системі надається енергія і встановлення залежності між цією енергією і продуктами подрібнення є важливою задачею. Ось чому для вивчення взаємозв'язку між енергією, наданою системі УЗ, та вмістом подрібнених частинок в [12] було використано функцію розподілу подрібнення:

$$\beta(v, v') = x(v') \cdot \omega(v) + [1 - x(v')] \cdot \Omega(v, v'), \quad (1)$$

де  $x(v')$  є масовою часткою отриманих дрібнодисперсних частинок,  $\omega(v)$  є розподілом подрібнюваних частинок за розміром,  $\Omega(v, v')$  — функція розподілу грубих фрагментів подрібнення.

З урахуванням цього розподілу можна шляхом інтегрування знайти вміст подрібнених частинок у дисперсії, що надавалася УЗ впливу, а також розрахувати енергоспоживання на одиницю маси диспергованих частинок  $E_m$  [12]:

$$E_m(t) = -620 \frac{\varepsilon^{0,62}}{H \rho_p C_s} \ln(1 - f_p), \quad (2)$$

де  $C_s$  — об'ємна концентрація твердих частинок,  $H$  — константа пропорційності величини подрібнення, яка залежить від середнього розміру частинок,  $\rho_p$  — густина матеріалу,  $f_p$  — об'ємна частка подрібнених частинок.

Формула (2) була розрахована для кавітаційного режиму УЗ впливу, вона показує важливе значення величини наданої системі енергії та концентрації частинок у дисперсії. Було запропоновано ці ідеї перевірити і для докавітаційного режиму опромінення. Питомо потужність п'єзокерамічного резонатора, в якому проводили УЗ опромінення, становила 0,1 Вт/см<sup>2</sup>. Концентрація твердих частинок у суспензіях складала 10 %, 20 % і 30 % за об'ємом, а кожен суспензію піддавали УЗ опроміненню енергією з діапазону 4—25 кДж.

Для визначення гранулометричного складу використовували просівну машину,

обладнану послідовно розміщеними ситами з отворами вічок 100, 90, 80, 63 і 40 мкм для відповідного виділення фракцій. Визначення зольності активованого вугілля проводилося відповідно з [13]. Суть методу полягає в озоленні наважки зразка у муфелі шляхом прожарювання зольного залишку до постійної ваги за температури  $800 \pm 25$  °C і зважуванні залишку. Визначення водневого показника рН водної витяжки вугілля проводили за методикою, описаною в [14] для деревного вугілля. Для вимірювання рН використовували рН-метр марки рН-301.

Частку гідрофільних пор, як правило, визначають за кількістю поглинутої води зразком, виготовленим з АВ, унаслідок довготривалого вимочування. Загальний об'єм доступних для рідини пор визначають при вимочуванні у рідині, яка добре змочує поверхню АВ. У наших дослідженнях використовували гептан, а розрахунок гідрофільно-гідрофобних властивостей здійснювали за методикою [15].

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Під дією інтенсивних стискувань і розширень, викликаних УЗ, твердий матеріал піддається деформації. Цей механізм відомий як ректифікаційна дифузія і використовується в акустичній сушці і зневодненні, а також в інших процесах, де відбувається міграція вологи. Щільні матеріали зазвичай руйнуються під акустичним тиском. Мікроскопічні канали створюються в напрямках нормалі до поширення хвилі протягом розрідження або паралельно поширенню хвилі в період стиснення.

Провівши УЗ опромінення для суспензії із вмістом матеріалу 10 %, 20 % і 30 % з різними енергіями впливу, було визначено гранулометричний склад кожного зразка після оброблення. Дані по основних фракціях представлені на рис. 1 та рис. 2. По осях ординат відкладено відносний вміст у пробі фракції за масою. Отриманий фракційний склад зразків свідчить про ефективний вплив УЗ опромінення у докавітаційному режимі на подрібнення досліджуваного деревного АВ.

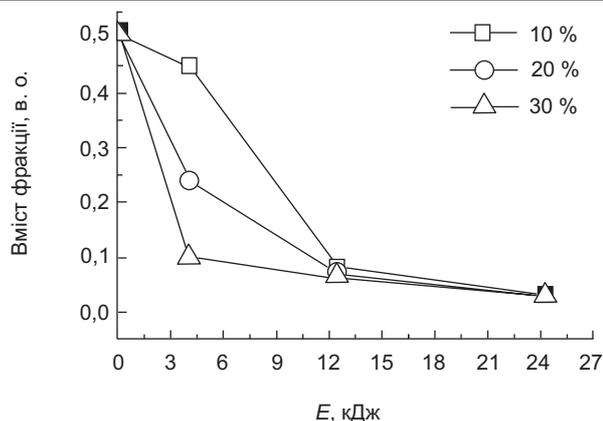


Рис. 1. Зміна вмісту фракції 90—100 мкм у пробах

З встановлених залежностей видно, що після надання енергії у 12,5 кДж для всіх об'ємних концентрацій вміст фракції 90—100 мкм практично прямує до нуля. Зі збільшенням наданої енергії вміст дрібних фракцій зростає, хоча найбільшого значення набуває вміст фракції 40—63 мкм. Тобто на першому етапі відбувається ефективне руйнування великих частинок, а далі проходить поступове «відколювання» малих частинок, про що свідчить динаміка зміни відносного вмісту фракції 40—63 мкм. Причому з рис. 2 видно, що ефективність подрібнення на початкових етапах є високою як для великої концентрації вихідного вугілля, так і для мінімальної у проведених дослідженнях, а для проміжного значення концентрації ефективність є меншою.

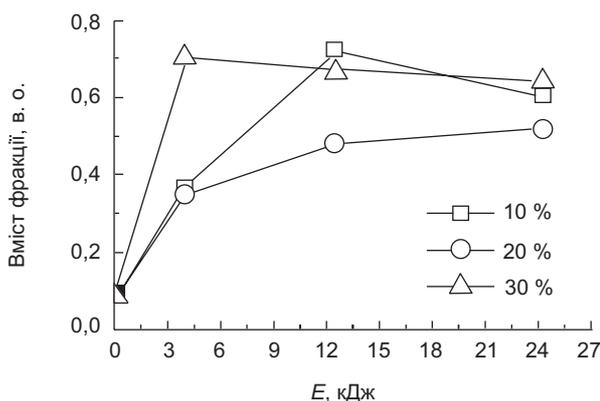


Рис. 2. Зміна вмісту фракції 40—63 мкм у пробах

Хімічні зміни у воді при докавітаційному режимі описані в [16]. У ній з'являються активні радикали та інші продукти розкладання молекул. Насичення розчину киснем в газовій фазі, окрім радикалів  $\text{HO}^*$ , ініціює утворення пероксидних радикалів; потім

відбувається рекомбінація радикалів на поверхні розділу або в об'ємі розчину до пероксиду водню. Вивчення сонохімії водних розчинів [17] підтверджує вказані можливі хімічні реакції під час УЗ опромінення.

Вплив утворених внаслідок УЗ опромінення окисників на АВ буде проявлятися, в першу чергу, у зміні хімічного складу поверхні та поверхневих груп. Хімічні реакції будуть проходити як з водорозчинними, так і з нерозчинними складовими АВ, а це спричинятиме зміну рН та зольності досліджуваних матеріалів.

Вміст золи є суттєвим параметром, який впливає на характеристики матеріалу, адже великий вміст золи значно зменшує доступність пор для руху іонів, гідрофільність матеріалу і його електричну провідність. На рис. 3 показано вміст золи в залежності від режимів опромінення. Як видно, вихідний матеріал містив достатньо велику кількість золи, але внаслідок опромінення УЗ її вміст зменшувався. Найсуттєвіше зменшення вмісту золи порівняно із вихідним матеріалом спостерігалось у 30 % розчині суспензії і енергії впливу у 24,3 кДж, однак, й інші режими сприяють достатньо хорошему зменшенню зольності зразків.

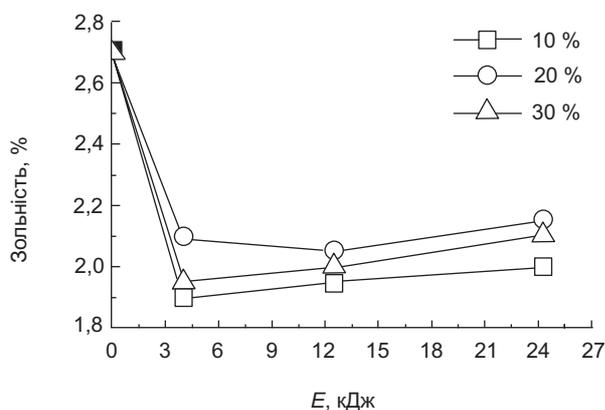


Рис. 3. Залежність зольності вугілля від енергії УЗ опромінення

Вплив на водорозчинні складові поверхні АВ встановлено вимірюванням водневого показника вугілля шляхом визначення рН водної витяжки. рН вихідного необробленого вугілля становив 9,29, що вказує на основні властивості поверхні АВ. Після УЗ опромінення все вугілля окисилося — найбільше зменшився рН АВ при 10 % вмісті

у суспензії — до 8,29 (рис. 4). Це означає, що іони-окисники, утворені під час УЗ опромінення, провзаємодіяли як з нерозчинними, так і з розчинними складовими поверхні досліджуваних матеріалів, зменшивши і зольність, і рН. Отже, вищевказана поведінка АВ повинна мати відображення у зміні гідрофільних та гідрофобних властивостей поверхні.

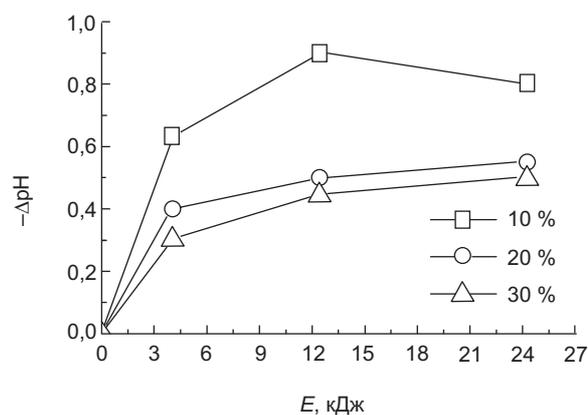


Рис. 4. Зменшення рН вугілля після УЗ опромінення відносно рН вихідного вугілля

Оскільки вуглець є неполярною речовиною, то окиснення поверхні вуглецевих матеріалів не впливає на адсорбцію неполярних речовин, і, отже, змочуваність ними вугілля. Характер адсорбції полярних речовин, наприклад, водяної пари, істотно залежить від присутності хемосорбованого кисню чи кисневмісних поверхневих груп [18, 19]. Передбачається, що адсорбція води на вуглецевих матеріалах протікає за кластерним механізмом шляхом утворення водневих зв'язків з кисневмісними поверхневими сполуками. Кожна адсорбована молекула води є вторинним адсорбційним центром, здатним утворювати водневі зв'язки з іншими молекулами води. Зростання цих кластерів, а потім їх злиття призводить до утворення моношару води на поверхні стінок мікропор. Вважається, що для молекул води, адсорбованих вторинними центрами, енергетично вигідніший перехід до незаповненої водою поверхні мікропор. Тому пошарове заповнення водою поверхні мікропор відбувається після утворення на їх стінках моношару. Ця принципова відмінність в моделях адсорбції пари неполярних рідин і води на вуглецевій поверхні зумовлена практичною

відсутністю в останньому випадку дисперсійних взаємодій.

Тому загальна величина доступних для заповнення рідиною пор АВ визначається шляхом вимочування у неполярній речовині, яка добре змочує поверхню. Визначення такої загальної пористості було проведено за допомогою гептану, отримані результати наведено на рис. 5.

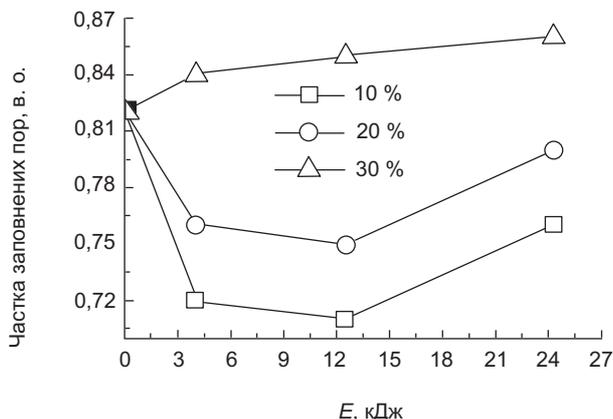


Рис. 5. Залежність заповнення пор гептаном від режиму УЗ опромінення

Як видно з рис. 5, загальна пористість змінюється по різному в залежності від процентного вмісту АВ у суспензії та наданої УЗ енергії. Кількість доступних рідині пор зростає при 30 % вмісті АВ, а при 10 % та 20 % вмісті — зменшується.

Визначення кількості гідрофільних пор є важливою складовою дослідження впливу УЗ опромінення на властивості АВ, оскільки чим більша кількість їх буде, тим ефективніше адсорбуватимуться водні розчини чи електроліти. На рис. 6 показано залежність частки гідрофільних пор порівняно з вільним об'ємом досліджуваних вуглецевих матеріалів.

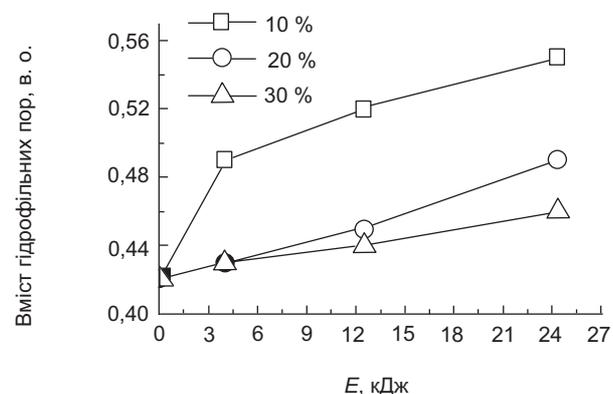


Рис. 6. Залежність частки гідрофільних пор від режимів УЗ опромінення

З наведених залежностей видно, що збільшенню кількості гідрофільних пор сприяє оброблення 10 % суспензії в усіх режимах. Графічна залежність також дозволяє зробити висновок, що тривалість УЗ впливу є суттєвим параметром, оскільки незалежно від концентрації суспензії спостерігається підвищення частки гідрофільних пор.

Отже, порівнявши рис. 5 та рис. 6, бачимо протилежну картину поведінки рідин при просочуванні АВ для 10 % та 30 % його вмісту у суспензії. При 10 % вмісті АВ утворюється більша кількість іонів-окисників на одиницю маси вугілля, що зумовлює сильніше окиснення поверхні і збільшення гідрофільності АВ. Підтвердженням цього є рис. 6. Зі збільшенням вмісту АВ до 30 % кількість іонів на одиницю маси зменшується, однак, за рахунок більшої кількості частинок вугілля на одиницю об'єму зростає частота їх зіткнень між собою. Це призводить до швидшого подрібнення цих частинок, як видно з порівняння графіків поведінки фракції 90—100 мкм на рис. 1, а, отже, і до суттєвішої зміни пористої структури, що підтверджує рис. 5.

## ВИСНОВКИ

Для збільшення ефективності технологічних процесів важливим завданням є зменшення енергоспоживання при однаковому кінцевому ефекті. Ефективність кавітаційного УЗ опромінення для подрібнення дрібнодисперсних матеріалів є доведеним фактом. УЗ опромінення АВ у докавітаційному режимі показало ефективність даного методу для здійснення подрібнення з метою зміни фракційного складу досліджуваного вугілля. Незалежно від обраного режиму опромінення спостерігається зростання дисперсності вуглецевого матеріалу. В залежності від поставленої задачі і враховуючи взаємозв'язок між параметрами опромінення можна досягнути зміни гранулометричного складу деревного АВ у потрібному напрямку.

Встановлено, що УЗ опромінення на частоті 22 кГц крім механічної дії спричиняє і хімічну. Утворені під час УЗ опромінення окисники впливають на хімічний

склад поверхні та поверхневих груп. Відбувається взаємодія як з водорозчинними, так і з нерозчинними складовими АВ, що відображається на зміні рН та зольності досліджуваного матеріалу. Незалежно від обраного режиму УЗ опромінення спостерігається зменшення зольності та зростання кислотності поверхні обробленого АВ. Оскільки вуглець є неполярною речовиною, то окислення поверхні вуглецевих матеріалів не впливає на адсорбцію неполярних речовин, і, отже, змочуваність ними вугілля. А характер адсорбції полярних речовин істотно залежить від присутності хемосорбованого кисню чи кисневмісних поверхневих груп. З одержаних даних видно, що частка гідрофільних пор залежить від тривалості опромінення, а також процентного вмісту АВ у досліджуваних суспензіях — із його зменшенням відбувається суттєвіше окиснення та зростання гідрофільних властивостей поверхні, а зі збільшенням вмісту вугілля у суспензії — швидше подрібнення АВ і збільшення загального об'єму пор.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Nakamura M., Nakanishi M., Yamamoto K. Influence of physical properties of activated carbons on characteristics of electric double-layer capacitors // *Journal of Power Sources*. — 1996. — Vol. 60, No. 2. — P. 225—231.
2. Каліцінський В. З., Григорчак І. І., Бордун І. М., Матулка Д. В., Чекайло М. В., Кулик Ю. О. «Pre-Post» спряжена модифікація пористої і електронної будови активованого вугілля, отриманого з лляного волокна // *Вісник НУ Львівська Політехніка, сер. Електроніка*. — 2009. — Т. 646. — С. 77—85.
3. Shaobin Yang Preparation of carbon adsorbents with high surface area and a model for calculating surface area / Shaobin Yang, Haoquan Hu, Guohua Chen // *Carbon*. — 2002. — Vol. 40. — P. 277—284.
4. Pierson H.O. Handbook of carbon, graphite, diamond and fullerenes // *Noyes publications, Park Ridge*. — New Jersey, USA, 1994. — 417 p.
5. Беушев А. А., Карчевский Д. Ф., Матвеев Ю. А. Влияние расхода воздуха и концентрации фосфорной кислоты на выход и свойства активированных углей, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // *Ползуновский вестник*. — 2006. — № 2, ч. 2. — С. 249—251.
6. Тарковская И. А. Окисленный уголь. — К.: *Наук. думка*, 1981. — 197 с.
7. Клименко Н. А., Савчина Л. А., Козятник И. П., Малышева М. Л., Полякова Т. В. Влияние различных режимов окисления на изменение структурных характеристик активного угля // *Химия и технология воды*. — 2008. — Т. 30, № 5. — С. 478—489.
8. Momma A., Liu X., Osaka T., Ushio Y., Sawada Y. Electrochemical modification of active carbon fiber electrode and its application to double-layer capacitor // *Journal of Power Sources*. — 1996. — Vol. 60, No. 2. — P. 249—253.
9. Gedanken A. Sonochemistry and its application to nanochemistry // *Current science*. — 2003. — Vol. 85, No. 12. — P. 1720—1722.
10. Margulis M. A. Sonochemistry as a new promising area of high energy chemistry // *High Energy Chemistry*. — 2004. — Vol. 38, No. 3. — P. 135—142.
11. Mason T. J., Cordemans E. D. Ultrasonic intensification of chemical processing and related operations: A review // *Trans. I. Chem., E*. — 1996. — Vol. 74. — P. 511—514.
12. Kusters K. A., Pratsinis S. E., Thoma S. G., Smith D. M. Energy Size Reduction Laws for Ultrasonic Grinding // *Powder technology*. — 1994. — Vol. 80. — P. 253—263.
13. Активные угли. Метод определения массовой доли золы.: ГОСТ 12596-67 — [Действие с 1967-07-01]. — М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1967. — 4 с.
14. Уголь активный осветляющий древесный порошкообразный. Технические условия.: ГОСТ 4453-74 — [Действие с 1976-01-01]. — М.: Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1976. — 22 с.
15. Баранов А. П., Штейнберг Г. В., Багоцкий В. С. Исследование гидрофобизированного активного слоя газодиффузионного электрода // *Электрохимия*. — 1971. — Т. 7, № 3. — С. 387—390.
16. Гончарук В. В., Маляренко В. В., Яременко В. А. О механизме воздействия ультразвука на водные системы // *Химия и технология воды*. — 2004. — Т. 26, № 3. — С. 275—284.
17. Гончарук В. В., Маляренко В. В., Яременко В. А. Использование ультразвука при очистке воды // *Химия и технология воды*.

- 2008. — Т. 30, № 3. — С. 253—277.
18. Birkett G. R., Do D. D. The adsorption of water in finite carbon pores // *Molecular Physics*. — 2006. — Vol. 104, No. 4. — P. 623—637.
  19. Вартапетян Р. Ш., Полищук А. М. Механизм адсорбции молекул воды на углеродных адсорбентах // *Успехи химии*. — 1995. — Т. 64, № 11. — С. 1055—1072.
- LITERATURA**
1. Nakamura M., Nakanishi M., Yamamoto K. Influence of physical properties of activated carbons on characteristics of electric double-layer capacitors // *Journal of Power Sources*. — 1996. — Vol. 60, No. 2. — P. 225—231.
  2. Kalicins'kij V. Z., Grigorochak I. I., Bordun I. M., Matulka D. V., Chekajlo M. V., Kulik Yu. O. «Pre-Post» spryazhena modifikaciya poristoї i elektronnoyi budovi aktivovanogo vugillya, otrimanogo z llyanogo volokna // *Visnik NU L'vivs'ka Politehnika, ser. Elektronika*. — 2009. — Vol. 646. — P. 77—85.
  3. Shaobin Yang Preparation of carbon adsorbents with high surface area and a model for calculating surface area / Shaobin Yang, Haoquan Hu, Guohua Chen // *Carbon*. — 2002. — Vol. 40. — P. 277—284.
  4. Pierson H. O. Handbook of carbon, graphite, diamond and fullerenes // Noyes publications, Park Ridge. — New Jersey, USA, 1994. — 417 p.
  5. Beushev A. A., Karchevskij D. F., Matveev Yu. A. Vliyanie rashoda vozduha i koncentracii fosfornoj kisloty na vyhod i svojstva aktivirovannyh uglej, poluchennyh metodom samorasprostranyayuschegosya vysokotemperaturnogo sinteza // *Polzunovskij vestnik*. — 2006. — No. 2, ch. 2. — P. 249—251.
  6. Tarkovskaya I. A. Okislennyj ugol'. — K.: Nauk. dumka, 1981. — 197 p.
  7. Klimenko N. A., Savchina L. A., Kozyatnik I. P., Malysheva M. L., Polyakova T. V. Vliyanie razlichnyh rezhimov okisleniya na izmenenie strukturnyh karakteristik aktivnogo uglya // *Himiya i tehnologiya vody*. — 2008. — Vol. 30, No. 5. — P. 478—489.
  8. Momma A., Liu H., Osaka T., Ushio Y., Sawada Y. Electrochemical modification of active carbon fiber electrode and its application to double-layer capacitor // *Journal of Power Sources*. — 1996. — Vol. 60, No. 2. — P. 249—253.
  9. Gedanken A. Sonochemistry and its application to nanochemistry // *Current science*. — 2003. — Vol. 85, No. 12. — P. 1720—1722.
  10. Margulis M. A. Sonochemistry as a new promising area of high energy chemistry // *High Energy Chemistry*. — 2004. — Vol. 38, No. 3. — P. 135—142.
  11. Mason T. J., Cordemans E. D. Ultrasonic intensification of chemical processing and related operations: A review // *Trans. I. Chem., E*. — 1996. — Vol. 74. — P. 511—514.
  12. Kusters K. A., Pratsinis S. E., Thoma S. G., Smith D. M. Energy Size Reduction Laws for Ultrasonic Grinding // *Powder technology*. — 1994. — Vol. 80. — P. 253—263.
  13. Aktivnye ugli. Metod opredeleniya massovoj doli zoly.: GOST 12596-67 — [Dejstvie c 1967-07-01]. — M.: Komitet standartizacii i metrologii SSSR, 1967. — 4 p.
  14. Ugol' aktivnyj osvetlyayuschij drevesnyj poroshkoobraznyj. Tehnicheskie usloviya.: GOST 4453-74 — [Dejstvie c 1976-01-01]. — M.: Komitet standartizacii i metrologii SSSR, 1976. — 22 p.
  15. Baranov A. P., Shtejnberg G. V., Bagockij V. S. Issledovanie gidrofobizirovannogo aktivnogo sloya gazodiffuzionnogo elektroda // *Elektrohimiya*. — 1971. — Vol. 7, No. 3. — P. 387—390.
  16. Goncharuk V. V., Malyarenko V. V., Yaremenko V. A. O mehanizme vozdejstviya ul'trazvuka na vodnye sistemy // *Himiya i tehnologiya vody*. — 2004. — Vol. 26, No. 3. — P. 275—284.
  17. Goncharuk V. V., Malyarenko V. V., Yaremenko V. A. Ispol'zovanie ul'trazvuka pri ochistke vody // *Himiya i tehnologiya vody*. — 2008. — Vol. 30, No. 3. — P. 253—277.
  18. Birkett G. R., Do D. D. The adsorption of water in finite carbon pores // *Molecular Physics*. — 2006. — Vol. 104, No. 4. — P. 623—637.
  19. Vartapetyan R. Sh., Polischuk A. M. Mehanizm adsorbciyi molekul vody na uglerodnyh adsorbentah // *Uspehi himii*. — 1995. — Vol. 64, No. 11. — P. 1055—1072.