

УДК 62-52

Шабета О. А.

## МІЦНІСТЬ СКЛА, МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДАМИ НА ОСНОВІ ІОННОГО ОБМІНУ ТА ТРАВЛЕННЯ

Розвиток наукових засад конструкційної міцності крихких матеріалів призвів до розширення області їх застосування, прогресу в сфері технологій виготовлення та зміцнення флоат-скла і до фундаментальних досягнень у проектуванні світлопрозорих архітектурних споруд, авіаційного, транспортного скління, а також інших видів технічного скла для виробів, які експлуатуються в умовах, коли напруження розтягу при статичному і динамічному навантаженні є невід'ємною частиною їх напруженого стану [1, 2]. Виходячи з природи скла, як поверхнево дефектного матеріалу, методи зміцнення скла базуються на двох напрямках його модифікації: частковому усуненню дефектів поверхневого шару та блокуванні дефектів, а також застосуванні комбінації цих методів (рис. 1).

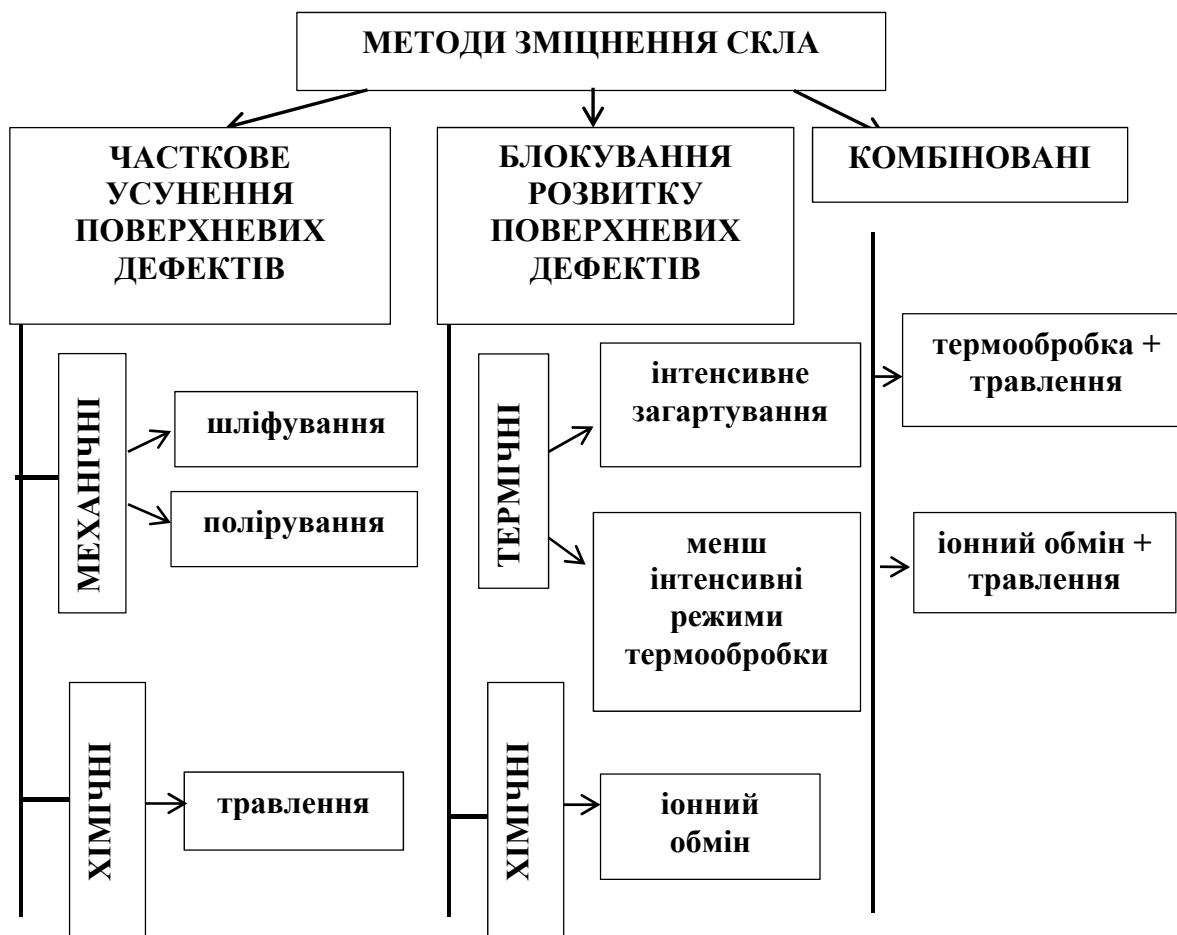


Рис. 1. Методи зміцнення скла

Метод іонного обміну (ІО), який полягає у витисненні іонів натрію іонами калію та створенні, за рахунок цього, в поверхневих шарах напружень стиску набуває все більш широкого застосування на практиці і все частіше використовується як альтернатива термічному зміцненню. В порівнянні із термічним зміцненням, модифікація скла методом хімічного зміцнення на основі іонного обміну має наступні особливості:

- величина залишкових напружень, які утворюються на поверхні при іонному обміні, значно перевищує залишкові напруження при термічному зміцненні, тобто за рахунок ІО може бути досягнуто значно більший ефект зміцнення;
- ІО можна зміцнювати дуже тонкі стекла, в той час як загартування стекел товщиною 2...3 мм стикається з проблемами при промисловому виготовленні;
- іонно-обмінне скло має кращі оптичні якості: у ньому відсутній поляризаційний рисунок, який є дефектом термічно зміцненого скла;
- глибина шару з залишковими напруженнями стиску значно менша. Характер розподілу залишкових напружень для обох процесів зміцнення значно відрізняється (рис. 2). Залишкові напруження розтягу у внутрішніх шарах скла, що відповідають залишковим напруженням стиску в поверхневих шарах для ІО- скла є значно меншими. Як наслідок, при руйнуванні фрагментація хімічно зміцненого скла відрізняється від термічно зміцненого скла значно більшим розміром, що може бути недоліком або перевагою залежно від призначення виробу.

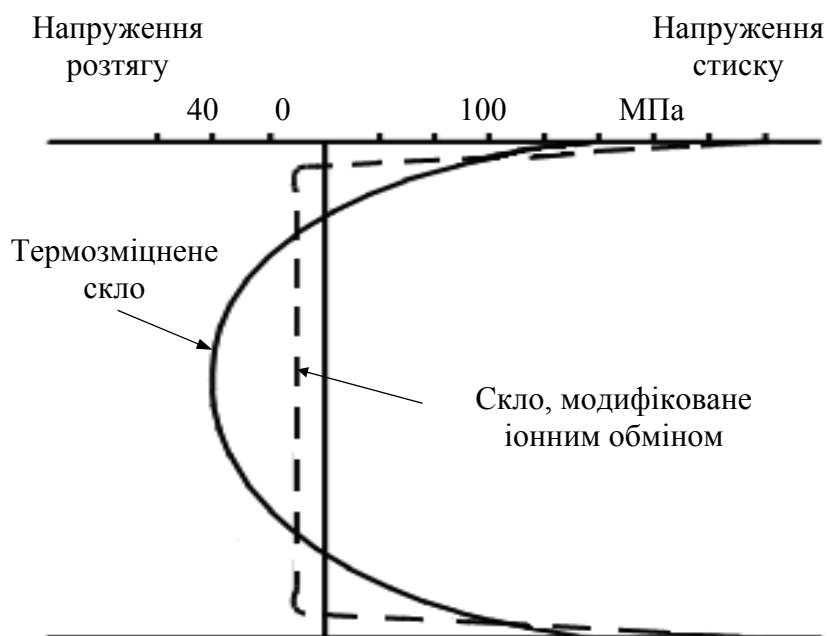


Рис. 2. Схематичне зображення профілю термічно та хімічно зміцненого флоат-скла по глибині

Процес іонного обміну здійснюється при температурах значно нижчих, ніж температура загартування. Вартість технології ІО значно перевищує вартість загартування. Процес іонного обміну є більш керованим, ніж процес термічного зміцнення. Величина наведених залишкових напружень при ІО має стабільне значення, на відміну від значень залишкових напружень при термічному зміцненні, яким притаманний значний розкид [3].

Травлення в комбінації з іонним обміном дозволяє усунути частину значних за розмірами дефектів поверхневого шару, що сприяє підвищенню ефективності зміцнення.

Актуальними задачами при промисловій модифікації скла є визначення рівня залишкових напружень в ІО-склі, оцінка ефекту зміцнення та міцності модифікованих стекел.

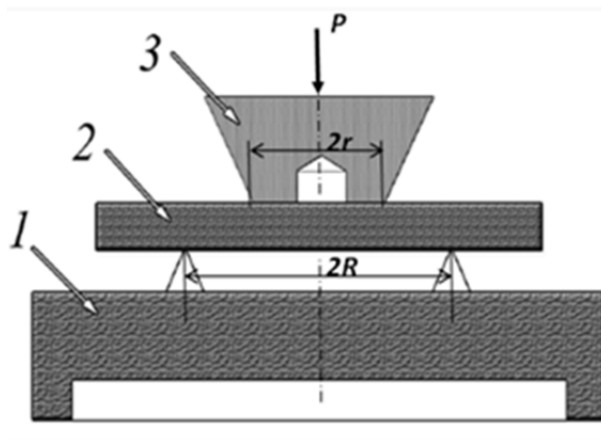
Метою дослідження є оцінка промислової технології іонного обміну та комбінованої обробки травленням з іонним обміном з точки зору підвищення міцності скла.

Зразки листового скла у вигляді квадратних пластин зі стороною  $A$ , що дорівнювала 60, 80, 120, 160, 180 та 200 мм, а товщина  $h$  відповідно становила 3, 4, 5, 6, 8 та 10 мм випробувано на гідравлічній випробувальній машині ZD40 при короткочасному навантаженні в умовах вісесиметричного згину у вихідному та модифікованому стані (рис. 3).

Застосовано три метода модифікації скла: хімічне травлення, іонний обмін в сольовій ванні (іони-дифузанти K<sup>+</sup>), комбінована обробка травленням з наступним іонним обміном. Радіус верхнього пуансону –  $r$  обрали таким чином, щоб навантаження було максимально локалізованим  $r = 7,5$  мм, радіус нижньої кільцевої опори  $R$  дорівнював 15...50 мм в залежності від розміру пластини.



а



б

Рис. 3. Гідравлічна випробувальна машина ZD40 (а) та схема навантаження пластини при вісесиметричному згині (б):

1 – нижня кільцева опора; 2 – пластина зі скла; 3 – верхній пуансон

Для розрахунку границі міцності пластин скла різних розмірів за таких умов навантаження  $\sigma_{зг}$  використовували формулу:

$$\sigma_{зг} = 1,5 \frac{P}{\pi h^2} \left[ 0,5 (1 - \mu) \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \frac{R^2}{B^2} \right) + (1 + \mu) \ln \frac{R}{r} \right], \quad (1)$$

де  $P$  – сила при руйнуванні зразка;

$h$  – товщина зразка, яку контролювали перед кожним випробуванням;

$\mu$  – коефіцієнт Пуасона, (для скла  $\mu = 0,22$ );

$B = b (1 + \sqrt{2})/2 \approx 1,207b$  – геометричний параметр;

$2b = A$  – довжина сторони квадратної пластини.

Після руйнування визначали місце розташування джерела руйнування – в центрі (у межах площі з радіусом  $r$ ) або з краю. В останньому випадку результат не враховували. Визначали границі розсіювання –  $\sigma_{згmin}$ ,  $\sigma_{згmax}$  та розраховували величину математичного очікування  $\sigma_{згс}$  (середнє значення). На рис. 4 представлено мінімальні, середні та максимальні значення границі міцності для стекл різних товщин у вихідному та модифікованому стані.

При розрахунку ефекту зміцнення у ІО-склі виходять з того, що дії залишкових напружень стиску відповідає деякий умовний коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_{Ires}$ , який відображає «ефект закриття тріщини» ([4]), обумовлений дією цих напружень і визначається рівнянням [5]):

$$K_{Ires} = \frac{1,12}{\pi c} \int_0^c \sigma^{res} g(x) dx, \quad (2)$$

$$g(x) = \frac{2c}{c^2 - x^2} \quad (3)$$

$g(x)$  – функція Гріна;  
 $c$  – довжина тріщини;  
 $x$  – поточна координата уздовж вісі  $X$ , яка направлена від поверхні скла (початок координат на поверхні) в його глибину.

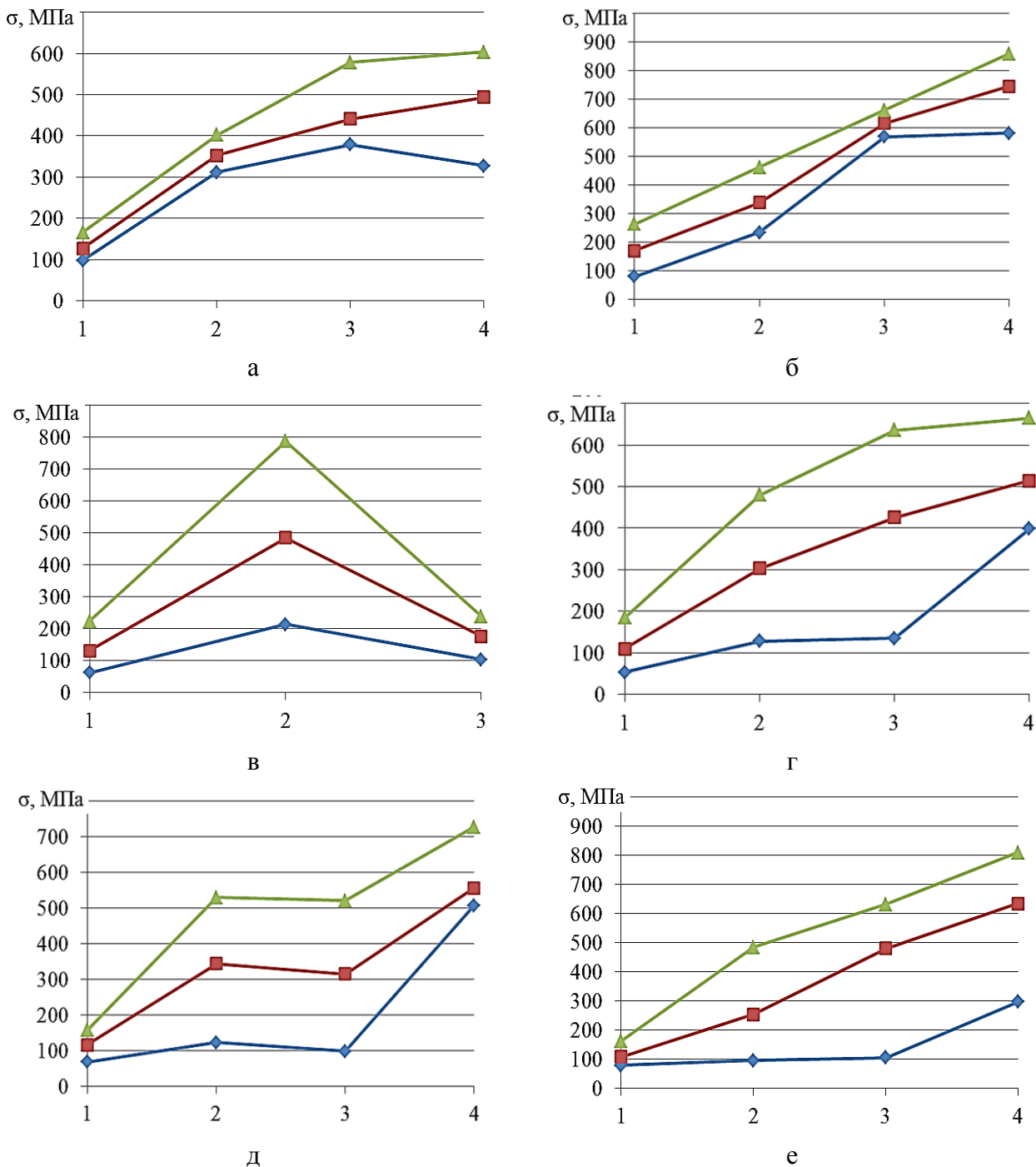


Рис. 4. Експериментальні діаграми міцності на згин флоат-скла товщиною:

3 мм (а), 4 мм (б), 5 мм (в), 6 мм (г), 8 мм (д) та 10 мм (е) у вихідному стані та зміцненого за різними технологіями:  $\blacklozenge$  – мінімальні;  $\blacksquare$  – середні;  $\blacktriangle$  – максимальні значення. На вісі абсцис цифрами позначено стан зразків: 1 – вихідний; 2 – після хімічного травлення поверхонь скла; 3 – після іонного обміну; 4 – отримані в результаті іонного обміну травленого скла

Тоді загальна в'язкість руйнування  $K_I$  складається з  $K_{ICa}$  – в'язкості руйнування від прикладеного навантаження при розтязі та  $K_{Ires}$ :

$$K_{IC} = K_{ICa} + K_{Ires} \cdot \quad (4)$$

Застосовуючи експериментально обґрунтоване припущення, що розподіл залишкових напружень по товщині скла змінюється за лінійним законом від максимального значення на поверхні ( $x = 0$ ) до нуля на глибині  $x_c$  (товщин зміцненого шару), отримано спрощене рівняння для міцності скла, модифікованого іонним обміном  $\sigma^{cs}$  [6]:

$$\sigma^{cs} = Y \frac{K_{ICa}}{\sqrt{\pi c}} + \sigma^{res} \left(1 - \frac{2c}{\pi x_c}\right), \quad (5)$$

де перший доданок – міцність скла у вихідному стані, який включає безрозмірний параметр форми тріщини  $Y$ , другий доданок характеризує ефект зміцнення.

Як випливає з рівняння (4), вклад залишкових напружень в міцність хімічно-зміцненого ІО-скла не перевищує їх величини (коефіцієнт  $(1 - \frac{2c}{\pi x_c}) \leq 1$ ) і залежить від глибини модифікованого шару та довжини тріщини.

В роботі [6] показано, що рівень залишкових напружень стиску в ІО-шарі, на відміну від напружень загартування, є стабільною величиною для обраної великої партії зразків, розкид якої не перевищує 5 %. Тому рівняння (4) застосовано для оцінки глибини зміцненого шару та величини залишкових напружень на поверхні ІО-скла (табл. 1). В рівняння підставляли середнє значення границі міцності зміцненого скла  $\sigma^{cs}$ , а середнє значення границі міцності вихідного скла  $\sigma_0$  використовували для розрахунку довжини тріщини  $c$ .

Таблиця 1

Залишкові напруження на поверхні ІО-скла, визначені за рівнянням (4)

Товщина скла $h$ , мм	Середнє значення границі міцності вихідного скла, $\sigma_0$ , МПа	Довжина тріщини, $c$ , мкм	Середнє значення границі міцності ІО-скла, $\sigma^{cs}$ , МПа	Товщина ІО-шару $x_c$ , мкм	Залишкові напруження на поверхні ІО-скла, $\sigma^{res}$ , МПа
3	128	6,9	441	27	375
4	171	3,8	616	30	483
5	131	6,4	175	30	52
6	110	9,2	426	30	390
8	116	8,2	315	30	214
10	109	9,3	480	30	463

Відомо, що залишкові напруження стиску не залежать від товщини скла. Різниця отриманих величин залишкових напружень на поверхні ІО-скла обумовлена, вочевидь, такими факторами як різниця вихідних стекл та недостатня кількість експериментальних зразків.

Проведено порівняння експериментально отриманого ефекту зміцнення як різниці між середньоарифметичними величинами границі міцності для травлених стекл, зміцнених іонним обміном та для травлених стекл з ефектом зміцнення за рівнянням (4), який дорівнює розрахунковим залишковим напруженням, помноженим на коефіцієнт  $(1 - \frac{2c}{\pi x_c})$ , де  $c$  – довжина тріщини в травленому склі. Результати порівняння наведено в табл. 2.

Таблиця 2

## Ефект зміцнення травленого скла, модифікованого ІО

Товщина скла $h$ , мм	Середнє значення границі міцності травленого скла, $\sigma_e$ , МПа	Довжина тріщини, $c$ , мкм	Середнє значення границі міцності зміцненого травленого скла, $\sigma_e^{cs}$ , МПа	Експериментально отриманий ефект зміцнення, $\sigma_e^{cs} - \sigma_e$ , МПа	Розрахунковий ефект зміцнення $\sigma^{res} \left(1 - \frac{2c}{\pi x_c}\right)$ , МПа
3	352	0,93	493	141	367
4	338	0,97	746	408	473
6	303	1,21	513	210	380
8	344	0,94	556	212	210
10	254	1,7	634	380	444

Аналіз отриманих результатів показує, що для усіх товщин розрахунковий ефект зміцнення травлених стекол перевищує або майже дорівнює експериментально отриманому. Це свідчить, що процес іонного обміну дещо псує поверхню скла. Застосування таких стекол потребує додаткового травлення, коли контрольовано видаляється дуже тонкий поверхневий шар з подальшим захистом поверхні.

## ВИСНОВКИ

Аналіз технологій травлення та іонного обміну показав, що, внаслідок різниці якості стекол у вихідному стані та складності контролю фактичних режимів зміцнення, отримані результати характеризуються значним розкидом залежно від товщини деталей зі скла.

Врахування ефекту закриття тріщини, обумовленого дією залишкових напружень сти-ску, дозволило отримати розрахункову величину ефекту зміцнення при комбінованій обробці травленням та іонним обміном.

Комбінована обробка травленням із іонним обміном є перспективною з точки зору підвищення міцності скла.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Veer F. A. *The strength of architectural glass* / F. A. Veer, P. C. Louter, F. P. Bos // *Proc. of Challenging glass 1. Conference on Architectural and Structural Applications of glass-2008. TU Delft, Netherlands, 2008.* – P. 419–428.
2. Rodichev Y. *Structural Strength of Laminated Glass* / Y. Rodichev, F. Veer, V. Strizhalo, E. Soroka, A. Shabetia // *Proc. of Challenging glass 6.- Conference on Architectural and Structural Applications of Glass.* – 2018. – TU Delft, Netherlands, 2018. – P. 453–462.
3. Veer F. A., Rodichev Y. M. *The relation between pre-stress and failure stress in tempered glass* // *Challenging Glass 4 & COST Action TU0905 Final Conference* / C. Louter, F. Bos, J. Belis, J.-P. Lebet (Eds.). – Leiden : CRC Press, 2014. – P. 731–738.
4. Green G. D. *Compressive surface strengthening of brittle materials by a residual stress distribution* // *J. American Ceramic Society.* – 1983. – Vol. 66 – No. 11. – P. 807–810.
5. *Ion exchange process: History, evolution and applications* / P. Mazzoldi(1), S. Carturan(1), A. Quaranta(2), et al. // *Rivista del nuovo cemento.* – 2013. – Vol. 36. – No. 9. – P. 397–450.
6. *RenreGy Ion exchange for glass strengthening* // *Materials Science and Engineering B.* – 2008. – Vol. 149. – P. 159–165.

Стаття надійшла до редакції 19.04.2019 р.