

УДК 661.74:669.14.046.554

Кулініч А. А.

## МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ СТРУКТУРИ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ АМg11

Для ливарних сплавів системи Al–Mg основною характеристикою макроструктури є середній розмір макрозерна, а характеристикою мікроструктури – середній розмір дендритної комірки [1–3]. У більшості випадків ці характеристики взаємопов'язані тому змінити показники однієї з них, зберігаючи показники усіх інших на постійному рівні, практично неможливо. Ця обставина ускладнює побудову адекватних кількісних залежностей між механічними властивостями сплаву в литому стані та однією з характеристик структури. Окрім того, це практично унеможлиблює встановлення ступеня вкладу кожної окремо взятої характеристики в рівень механічних властивостей сплаву.

В [4–9] на основі експериментальних досліджень зроблені спроби встановити кількісні залежності впливу основних характеристик структури, а також оцінити ступінь впливу цих характеристик на механічні властивості низки алюмінієвих сплавів, в тому числі і ливарних сплавів системи Al–Mg. Так, в [1] встановлено, що для алюмінієвих сплавів систем алюміній–мідь і алюміній–магній ступінь впливу характеристик макро- і мікроструктури (розміри зерна і дендритної комірки) на рівень механічних властивостей є різним. На рівень механічних властивостей сплавів системи алюміній–мідь головним чином впливає розмір дендритної комірки при незначному впливі розміру зерна.

Для сплавів системи алюміній–магній вплив розміру зерна більш суттєвий. Однак зроблені математичні моделі для подвійних і деяких промислових сплавів системи Al – Mg мали високу відносну похибку (окрім моделі, яка описує залежність між рівнем межі плинності і розміром зерна). Цей факт можна пояснити тим, що для їх побудови заздалегідь було обрано лише рівняння Холла–Петча. Воно добре описує кількісну залежність між розміром зерна алюмінієвих сплавів та рівнем межі плинності і  $\epsilon$ , по суті, не тільки математичною, а і фізичною моделлю [10–12]. Для побудови математичних моделей взаємозв'язку між розміром зерна, дендритної комірки і межею міцності при розтягуванні та, особливо, відносним видовженням рівняння Холла–Петча не має фізичного сенсу і автори [3, 8, 9] обрали його тільки за аналогією. Саме це і призвело до значної похибки розрахунків.

Мета роботи – встановити ступінь впливу середніх розмірів зерна і дендритної комірки на рівень механічних властивостей промислового сплаву АМg11 та побудувати математичні моделі залежності рівня механічних властивостей сплаву від характеристик структури.

Об'єкт дослідження – ливарний сплав АМg11. Розплав отримували шляхом переплаву промислових чушок зі сплаву АМg11 в лабораторній печі опору в графіто-шамотному тиглі. Після розплавлення шихти температуру розплаву доводили до 670 °С. Після ізотермічної витримки впродовж 30 хв розплав заливали в металеві форми. Для зміни параметрів структури (середнього розміру зерна і дендритної комірки) розплав кристалізували з різними швидкостями охолодження використовуючі форми, виготовлені із різних металів. Хімічний склад металу визначали методом оптичної спектроскопії. Механічні властивості визначали за стандартними методиками. Якісний та кількісний металографічний аналіз здійснювали за допомогою мікроскопа NEOFOT–31. Зв'язок між параметрами структури і механічними властивостями сплавів встановлювали методами кореляційного та регресійного аналізів [13–15].

Результати попереднього аналізу експериментальних даних (рис. 1, 2) свідчать, що збільшення розмірів зерна ( $D$ ) та дендритної комірки ( $d$ ) призводять до зменшення таких показників механічних властивостей сплаву, як межа міцності при розтягуванні ( $\sigma_B$ ), межа плинності ( $\sigma_{0,2}$ ) та відносне видовження ( $\delta$ ).

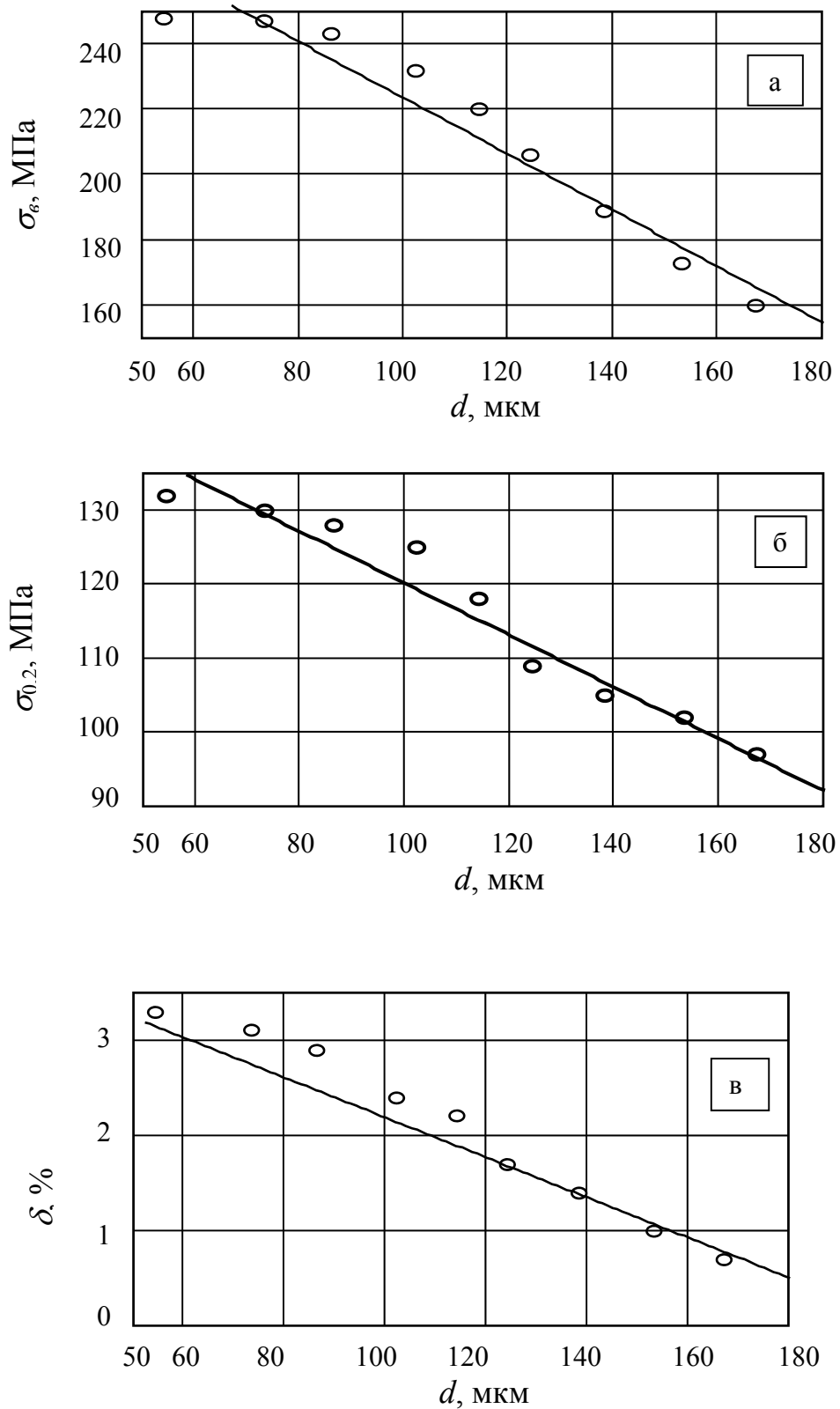


Рис. 1. Вплив середнього розміру дендритної комірки на механічні властивості сплаву АМг11 в литому стані:

а – межа міцності при розтягуванні; б – межа плинності; в – відносне видовження.  
 ○ – експериментальні дані; — — — — — розрахункові дані

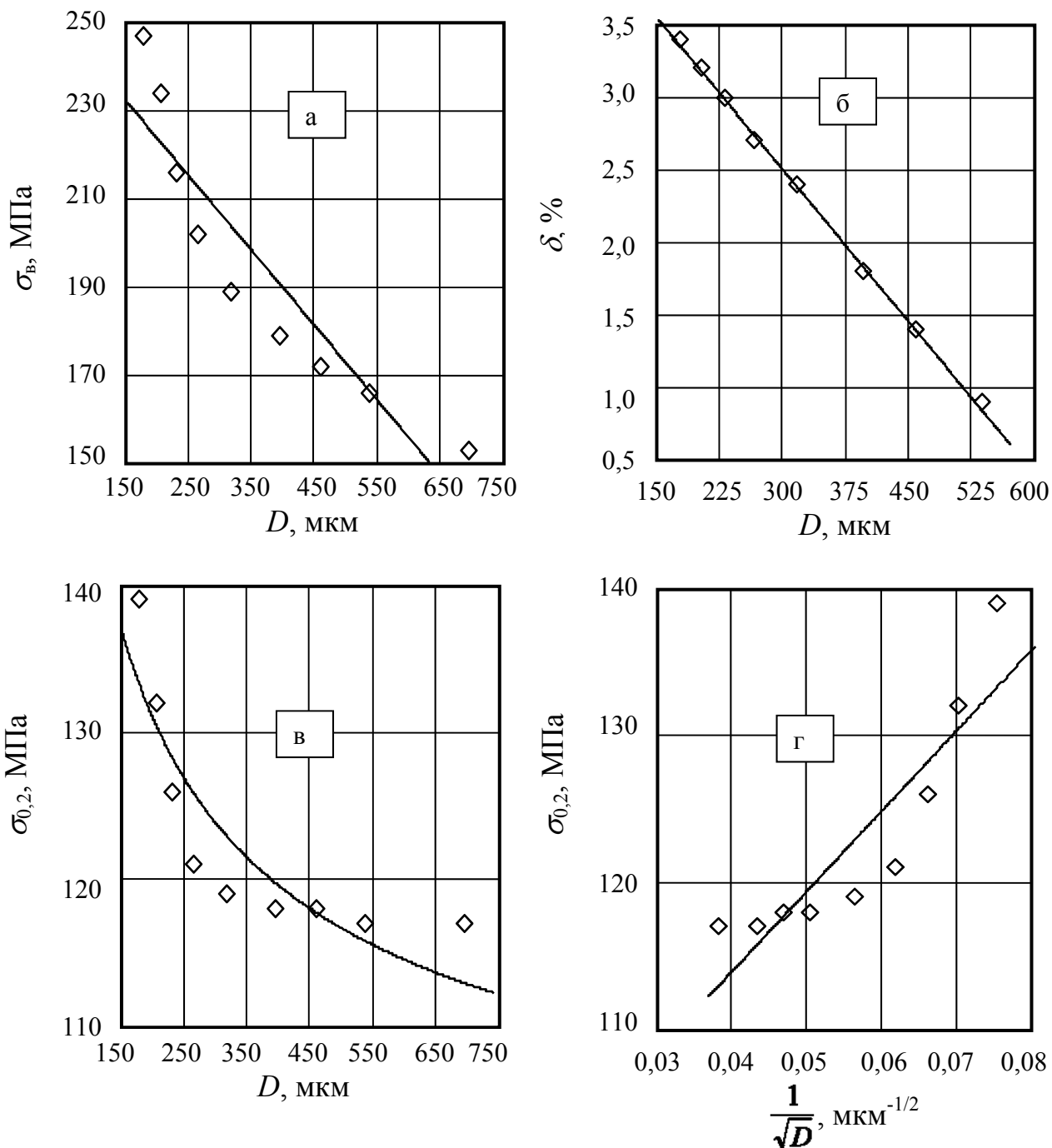


Рис. 2. Вплив середнього розміру зерна на механічні властивості сплаву АМг11 в литому стані:

а – межа міцності при розтягуванні; б – відносне видовження; в – межа плинності (модель типу Холла-Петча  $y = A + \frac{B}{\sqrt{D}}$ ); г – межа плинності (лінеаризована модель

$y = A + B \cdot X$ ,  $X = \frac{1}{\sqrt{D}}$ ).  $\diamond$  – експериментальні дані; — — — — — розрахункові дані

Наявність чи відсутність лінійної залежності між значеннями  $D$  ( $d$ ) та  $\sigma_B$  ( $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ) з'ясували за величинами коефіцієнтів парної кореляції Пірсона  $R$  (табл. 1). Ступінь лінійного зв'язку (значущість коефіцієнта кореляції) оцінювали порівнюючи розрахункову

величину коефіцієнта кореляції Пірсона ( $R$ ) з його теоретичним значенням ( $R_t$ ) для даних довірчої ймовірності та числа ступенів свободи [13]. При виконанні умови  $|R| > |R_t|$  приймали гіпотезу про значущість коефіцієнта кореляції і залежність між двома змінними вважали лінійною, в іншому випадку залежність вважали нелінійною.

Встановлено, що для сплаву АМг11 залежності  $\sigma_B = f(D)$ ,  $\sigma_B = f(d)$ ,  $\sigma_{0,2} = f(d)$ ,  $\delta = f(D)$  та  $\delta = f(d)$  можна вважати лінійними (умова  $|R| > |R_t|$  виконується). В той же час залежність  $\sigma_{0,2} = f(D)$  лінійною вважати не можна (не виконується умова  $|R| > |R_t|$ , табл. 1). Від'ємні значення коефіцієнтів кореляції свідчать, що збільшення розмірів зерна та дендритної комірки призводять до зменшення показників механічних властивостей.

Таблиця 1

Коефіцієнти парної кореляції між характеристиками механічних властивостей та структури сплаву АМг11 в литому стані для лінійної моделі (для довірчої ймовірності  $P = 0,99$ )

Властивість	Значення коефіцієнтів кореляції між показниками властивості і характеристикою структури			
	$D$		$d$	
	Розрахункове $R$	Табличне $R_t$	Розрахункове $R$	Табличне $R_t$
$\sigma_B$	-0,923	0,798	-0,969	0,798
$\sigma_{0,2}$	-0,749	0,798	-0,973	0,798
$\delta$	-0,999	0,834	-0,991	0,798

Для залежностей  $\sigma_B = f(D)$ ,  $\sigma_B = f(d)$ ,  $\sigma_{0,2} = f(d)$ ,  $\delta = f(D)$  та  $\delta = f(d)$  методом регресійного аналізу (метод найменших квадратів) [13, 15] побудовані лінійні моделі, які описують залежності рівнів механічних властивостей сплаву АМг11 в литому стані від характеристик структури (рис. 1):

$$y = A + B \cdot x, \quad (1)$$

де  $y$  – показники механічних властивостей  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{0,2}$ , МПа та  $\delta$ , %;  
 $x$  – розмір зерна ( $D$ ) або дендритної комірки ( $d$ ), мкм;  
 $A$ ,  $B$  – коефіцієнти моделі (табл. 2).

Таблиця 2

Коефіцієнти лінійної моделі залежності механічних властивостей від параметрів структури сплаву АМг11 в литому стані

Властивість $y$	Значення коефіцієнтів моделі			
	Для залежності $y = f(d)$		Для залежності $y = f(D)$	
	$A$	$B$	$A$	$B$
$\sigma_B$	309,24	-0,86	257,26	-0,17
$\sigma_{0,2}$	154,99	-0,35	Залежність нелінійна	
$\delta$	4,279	-0,021	4,59	-0,007

Ступінь адекватності побудованих математичних моделей оцінювали за величинами різниць між експериментальними і розрахунковими значеннями властивостей даного сплаву (величинами залишків):

– для моделі  $\sigma_B = f(d)$  максимальна величина залишків не перевищує 6 %;

- для моделі  $\sigma_{0,2} = f(d)$  максимальна величина залишків не перевищує 4 %;
- для моделі  $\delta = f(d)$  максимальна величина залишків не перевищує 8 %;
- для моделі  $\sigma_B = f(D)$  максимальна величина залишків не перевищує 9 %;
- для моделі  $\delta = f(D)$  максимальна величина залишків не перевищує 5 %.

За результатами аналізу отриманих математичних моделей можна зробити висновок, що при подрібненні дендритної комірки в три рази (із 167 до 54 мкм) межа міцності при розтягуванні ( $\sigma_B$ ) збільшується на 80–90 МПа (на 50 %), межа плинності ( $\sigma_{0,2}$ ) збільшується на 30–35 МПа (на 30 %), а відносне видовження ( $\delta$ ) збільшується на 2–3 одиниці (в 4–5 разів). В той же час при подрібненні зерна в 3,5–4 рази (зі 692 до 176 мкм) рівень  $\sigma_B$  збільшується на 85–95 МПа (на 60 %), а рівень  $\delta$  – на 2–2,5 одиниці (в 3–4 рази).

Для встановлення наявності нелінійної залежності типу моделі Холла-Петча  $y = A + \frac{B}{\sqrt{D}}$  між змінними  $D$  і  $\sigma_{0,2}$  розраховували парний коефіцієнт кореляції Пірсона ( $R$ ) після лінеаризуючого перетворення ( $X = \frac{1}{\sqrt{D}}$ ). Встановлено, що залежність межі плинності сплаву АМг11 в литому стані від розміру зерна можна описати моделлю Холла-Петча (умова  $|R| > |R_t|$  виконується, табл. 3).

Таблиця 3

Коефіцієнти парної кореляції між величиною межі плинності і розміром зерна сплаву АМг11 в литому стані для лінеаризованої моделі Холла-Петча (для довірчої ймовірності  $P = 0,99$ )

Властивість	Значення коефіцієнта кореляції між розміром зерна і характеристикою структури	
	Розрахункове $R$	Табличне $R_t$
$\sigma_{0,2}$	0,893	0,798

Причому подрібнення зерна сприяє збільшенню величини межі плинності. Математична модель, яка описує залежність типу Холла-Петча між розміром зерна і межею плинності сплаву АМг11 в литому стані можна подати в такому загальному вигляді:

$$y = A + B \cdot X, \tag{2}$$

де  $y$  – межа плинності  $\sigma_{0,2}$ , МПа;

$$X = \frac{1}{\sqrt{D}} \text{ – мкм}^{-1/2};$$

$D$  – розмір зерна, мкм;

$A, B$  – коефіцієнти моделі (табл. 4).

Таблиця 4

Коефіцієнти лінеаризованої моделі Холла-Петча залежності межі плинності від розміру зерна сплаву АМг11 в литому стані

Властивість	Значення коефіцієнтів моделі	
	$A$	$B$
$\sigma_{0,2}$	92,22	545,50

Для лінеаризованої моделі типу Холла-Петча максимальна різниця залишків не перевищує 4 %. Тому її можна вважати адекватною. При подрібненні зерна в 3,5–4 рази (з 692 до 176 мкм.) величина  $\sigma_{0,2}$  збільшується приблизно на 20 МПа (на 20 %).

За результатами аналізу отриманих даних можна зробити висновок, що на показники механічних властивостей сплаву АМГ11 приблизно однаковою мірою впливають як середній розмір зерна, так і розмір дендритної комірки.

### ВИСНОВКИ

Кількісно встановлено вплив середніх розмірів зерна і дендритної комірки на механічні властивості сплаву АМГ11 та побудовані відповідні математичні моделі. Встановлено, що в характерному для сплаву АМГ11 діапазоні змін характеристик макро- і мікроструктури, залежність між основними параметрами структури ( $D$ ,  $d$ ) та рівнем механічних властивостей ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\delta$ ) задовільно описується лінійною функцією, окрім залежності  $\sigma_{0,2} = f(D)$ . Залежність межі плинності від розміру зерна даного сплаву з достатньою точністю описується рівнянням типу Холла-Петча. Подрібнення макро- і мікроструктури промислового сплаву АМГ11 особливо суттєво впливає на збільшення показників відносного видовження.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Золотаревский В. С. *Металловедение литейных алюминиевых сплавов* / В. С. Золотаревский, Н. А. Белов. – М. : МИСИС, 2005. – 375 с.
2. Постников Н. С. *Коррозионностойкие алюминиевые сплавы* / Н. С. Постников. – М. : Металлургия, 1976. – 303 с.
3. Золотаревский В. С. *Структура и прочность литых алюминиевых сплавов* / В. С. Золотаревский. – М. : Металлургия, 1981. – 191 с.
4. Золоторевский В. С., Телешов В. В. // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. – 1970. – № 1. – С. 121–126.
5. Золоторевский В. С., Телешов В. В. // *Изв. АН СССР. Металлы*. – 1971. – № 5. – С. 187–194.
6. Золоторевский В. С. / В кн. : *Проблемы металлостроения цветных металлов*. – М. : Наука, 1978. – С. 128–137.
7. Алтунина Л. А., Аристова Н. А., Золоторевский В. С. и др. // *МиТОМ*. – 1972. – № 8. – С. 9–14.
8. Корнаухов А. С., Золотаревский В. С. // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. – 1976. – № 4. – С. 157–160.
9. Корнаухов А. С., Белоусов Н. Н., Золотаревский В. С., Кашиевник Л. Я. // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. – 1979. – № 1. – С. 122–127.
10. Hall E. O. *The deformation and ageing of mild steel* / E. O. Hall // *Proc. Phys. Soc.* – 1951. – Vol. 64, № 9. – P. 747–753.
11. Petch N. J. *The cleavage strength of polycrystalline* / N. J. Petch // *J. Iron and Steel Inst.* – 1953. – Vol. 173. – P. 25–28.
12. Low J. R. *Deformation of polycrystalline-iron* / J. R. Low // *Properties&Microstructure*. – 1954. – Vol. 1. – P. 163–168.
13. Львовский Е. Н. *Статистические методы построения эмпирических формул* / Е. Н. Львовский. – М. : Высшая школа, 1988. – 239 с.
14. Хальд А. *Математическая статистика с техническими приложениями* : пер. с англ. / Под. ред. Ю. В. Линника. – М. : ИЛ, 1956. – 664 с.
15. Дрейпер Н., Смит Г. *Прикладной регрессионный анализ* : пер. с англ. / Н. Дрейпер, Г. Смит ; под. ред. Ю. Л. Адлера, В. Г. Горского. – М. : Статистика, 1973. – 392 с.

Стаття надійшла до редакції 11.05.2018 р.