

ДРІБНОЗЕРНИСТІ ЦЕМЕНТНО-ЗОЛЬНІ БЕТОНИ ПРИДАТНІ ДЛЯ 3D ПРИНТЕРУ

FINE-GRAINED CEMENT-ASH CONCRETE FOR 3D PRINTER

Марчук В.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-0999-0402, Дворкін Л.Й., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-8759-6318, Макаренко Р.М., к.т.н., доцент, (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Marchuk V.V., candidate of technical sciences, associate professor, ORCID: 0000-0003-0999-0402, Dvorkin L.J., doctor of technical sciences, professor, ORCID: 0000-0001-8759-6318, Makarenko R.M., candidate of technical sciences, associate professor, (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

У статті показано можливість отримання цементно-зольних дрібнозернистих бетонних сумішей і бетонів, які можуть бути використані як робочі суміші для 3D принтера. За допомогою математичного планування експериментів отримано комплекс поліноміальних моделей властивостей цементно-зольних дрібнозернистих бетонних сумішей для 3D-друку, включаючи час їх придатності для екструзії «відкритий час», структурну міцність, міцність на розтяг при розколюванні та міцність на стиск екструдованого бетону. Встановлено вплив золи-виносу та прискорювача твердіння на комплекс властивостей запропонованого дрібнозернистого бетону.

The article an analysis of the main types of basic building mixtures for 3D printing and the requirements for their basic properties is presented. Shows the possibility of obtaining cement-ash fine-grained concrete mixtures and concretes, which can be used as working mixtures for a 3D printer. Using the mathematical planning of experiments, a complex of polynomial models of the properties of cement-ash fine-grained concrete mixtures for 3D printing was obtained, including their time of suitability for extrusion "open time", the structural strength required for layering the mixture after a certain time after mixing, tensile strength during splitting characterizing the adhesion of layers and the compressive strength of extruded concrete. As a mineral admixtures, concrete included fly ash, and the hardening accelerator – building gypsum. The influence of fly-ash and the addition of a hardening accelerator on the complex of properties of the proposed fine-grained concrete for 3D concreting has been established.

A laboratory printer was designed and used for research. On the basis of the obtained models, the analysis of the factors of the composition of cement-ash concrete mixtures for the investigated properties is carried out.

Taking into account the peculiarities of manufacturing building structures during the construction of structures using a 3D printer, the necessary properties of extruded mixtures and concretes based on them are determined. Methods for determining the normalized properties of a concrete mixture, the design of a laboratory printer and a device for determining the required structural strength during its layer-by-layer laying are proposed.

Ключові слова:

Портландцемент, зола-виносу, 3D будівельний принтер, адитивні технології, суперпластифікатор, прискорювач твердіння.

Portlandcement, fly-ash, 3D construction printer, additive technologies, superplasticizer, hardening accelerator.

Вступ. Перспективною технологією в будівельному виробництві є 3D-друк, який дозволяє створювати тривимірні об'єкти шляхом послідовного нанесення шарів будівельної суміші. 3D-друк дозволяє мінімізувати тривалість технологічного процесу виготовлення конструкцій, витрати на матеріали і робочу силу, забезпечити створення різних об'ємних форм [1-5]. В свою чергу швидкий розвиток промислового виробництва призвів до утворення великої кількості різноманітних відходів, зокрема і золи-виносу, які можуть ефективно використовуватися в бетонах різного призначення [4].

Стан питання та задачі дослідження. Однією з основних проблем, що виникає при реалізації 3D-друку, є розробка суміші, яка враховує особливості використовуваного 3D принтера, технологічні вимоги до будівельної суміші та необхідні фізико-механічні властивості матеріалу за різних умов його твердіння. Найбільш розповсюдженими матеріалами, які використовуються в 3D принтері є дрібнозернисті швидкотверднучі суміші, що містять різні добавки для покращення фізико-механічних характеристик, а також можуть використовуватися різні види фібри [5].

Актуальною проблемою при розробці складів бетонних сумішей є забезпечення комплексу необхідних властивостей матеріалу при використанні техногенної сировини. Ефективним напрямком зниження витрати в'язучих в бетонах і регулювання їх будівельно-технічних властивостей є введення золи-виносу [4].

Аналіз результатів виконаних досліджень дозволяє встановити рекомендований діапазон технічних вимог до бетонних сумішей і бетонів для 3D-друку (табл. 1) [3]. До визначальних властивостей бетонних сумішей та бетонів для 3D-друку можна віднести: необхідну рухомість при якій забезпечується екструзійність суміші, структурну міцність через певний час твердіння екструдованого шару, міцність на розтяг при розколюванні, що

характеризується зчепленням шарів, а також міцність при стиску. Стандартизованих методів визначення даних властивостей сумішей для 3D-друку немає. У ряді досліджень запропоновані вимоги до окремих властивостей сумішей [6-11].

Таблиця 1

Основні показники фізико-механічних властивостей бетонних сумішей і бетонів на їх основі для 3D-друку

№	Вимога	Функціональне призначення	Показник
1	Властивості бетонних сумішей		
1	Водоутримуюча здатність, %	Запобігання втрати вологи при транспортуванні і перемішуванні	Не менше 97
1.2	Розшаровуваність, %	Забезпечення однорідності при виготовленні і транспортуванні	Не більше 10
1.3	В'язкість, Па · с.	Забезпечення можливості транспортування і формування	10^9-10^{12}
1.4	Структурна міцність, Па	Забезпечення заданої геометрії суміші при екструзії	Не менше 800
1.5	Швидкість тужавлення, хв	Забезпечення міцності нижнього шару перед укладанням наступного шару	Не більше 20
1.6	Рухомість, по зануренню конуса, см по віскозиметру Сутгарда, мм	Забезпечення стабільної геометрії після екструзії	8...12 150...170
2	Властивості бетонів		
2.1	Міцність при стиску, МПа	Забезпечення міцнісних властивостей конструкцій	Не менше 20
2.2	Середня густина, кг / м ³	Забезпечення заданої ваги і міцності конструкцій	600-2000
2.3	Адгезія між шарами, МПа	Забезпечення зчеплення між шарами суміші	Не менше 2
2.4	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Теплоізоляція елементів будівель	Не більше 0,7
2.5	Морозостійкість, цикли	Забезпечення довговічності конструкцій і стійкості до сезонних перепадів температур	Не менше 100

Основною проблемою при 3D-друці є створення суміші з належними реологічними властивостями з певними термінами тужавлення суміші. Такі суміші оцінюють з точки зору їх технологічності або екструдованості, здатності до пошарового укладання, відкритого часу та міцності на стиск при певній тривалості твердіння. Для визначення технологічності (формуємості) екструдованих сумішей можна використовувати деякі стандартні методики, наприклад у роботі [7] використовували британський метод BS1337-9: 1990, а

автори у праці [8] американський стандарт ASTM C1437-15, для цього використавши міні-конус Хагермана. Суміш також повинна мати певну адгезійну здатність для пошарового укладання. У роботах [7, 9] відкритий час визначався вимірюванням напруження зсуву відповідно до британського стандарту BS1377-9: 1990 та німецького DIN 398. Для визначення здатності суміші до нарощування запропоновано метод визначення деформації при додатковому навантаженні на зразок [10]. Цей параметр корелюється зі легкоукладальністю та екструдованістю суміші.

Мета роботи полягала в розробці дрібнозернистих цементно-зольних бетонів для 3D-принтерута визначенні їх основних властивостей.

В якості вихідних матеріалів у наших дослідженнях використовували: портландцемент ПЦ-I-500 ПАТ «Волинь-цемент» філія ПАТ "ДЦУ", згідно ДСТУ Б В.2.7-46:2010; золу-виносу Бурштинської ТЕС згідно ДСТУ Б В.2.7-205:2009; будівельний гіпс Г-5 А II як прискорювач твердіння - згідно ДСТУ Б В.2.7-82:2010; кварцовий пісок з модулем крупності $M_{кр} = 2,1$ згідно ДСТУ Б В.2.7-32-95; суперпластифікатор (СП) полікарбонатного типу Melflux 2651F (0,3% від маси в'язучого).

Методика досліджень та результати.

Суміші для визначення властивостей цементно-зольних бетонних сумішей виготовляли за допомогою лабораторного 3D принтеру [2]. Витрату води підбирали для отримання сумішей придатних для екструзійного формування, необхідна рухомість суміші по зануренню стандартного конуса знаходилася в межах 8 - 10 см.

Структурна міцність бетонної суміші визначалася на приладі (рис.1, 2), що дозволяє вимірювати питомі навантаження в Па, які витримує зразок через певний проміжок часу. Для визначення властивостей сумішей для 3D-друку реалізовано серію експериментів, відповідно до трьохфакторного плану експерименту V_3 [11] за умов планування, якого наведених в табл. 2.

Таблиця 2

Умови планування експериментів

Фактори впливу		Рівні варіювання			Інтервал
Натуральний вид	Кодований	-1	0	+1	
Вміст в'язучого, кг/м ³ , (В'яз)	X_1	40 0	600	800	20 0
Вміст золи у в'язучому, %, (З)	X_2	40	30	20	-10
Вміст гіпсу, % від мас. в'яз. (Г)	X_3	0	5	10	5

В результаті статистичної обробки експериментальних даних отримано адекватні поліноміальні моделі досліджених властивостей із 95% довірчою ймовірністю.

Загальний вигляд моделей має вигляд:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

де: b_i , b_{ii} , b_{ij} - коефіцієнти регресії; x_i , x_j - фактори; k - число факторів.



Рис 1. Прилад для визначення структурної міцності бетонів.

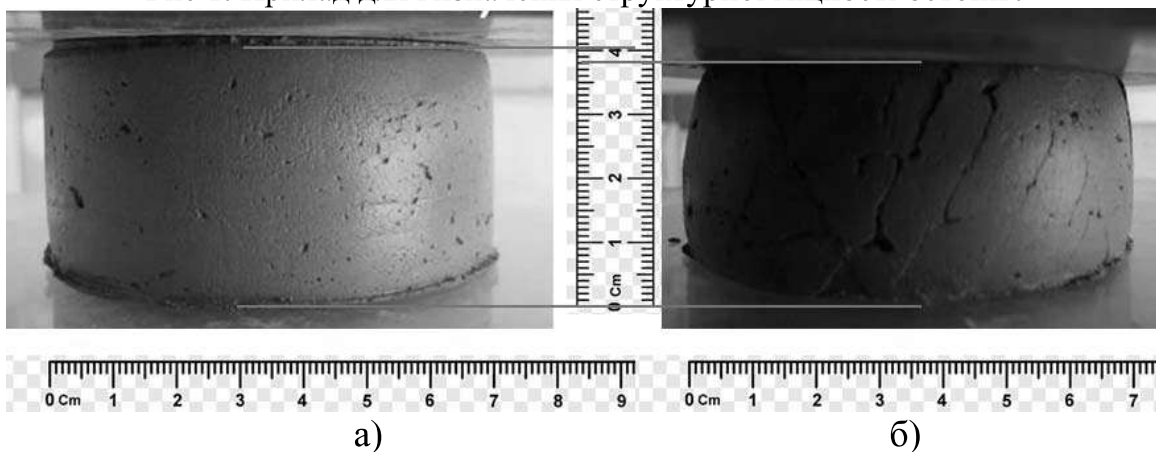


Рис. 2. Приклад для визначення структурної міцності: а) зразок витримує навантаження (забезпечується структурна міцність), б) зразок руйнується.

На основі отриманих даних для забезпечення необхідної рухомості побудована модель водопотреби бетонної суміші (л/м³):

$$\begin{aligned}
 V = & 197 + 28,4 \cdot x_1 + 3,3 \cdot x_2 + 5,2 \cdot x_3 + 13,9 \cdot x_1^2 + 2,4 \cdot x_2^2 - \\
 & - 5,1 \cdot x_3^2 + 0,9 \cdot x_1x_2 + 2,9 \cdot x_1x_3 + 0,9 \cdot x_2x_3
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

Коефіцієнти отриманих математичних моделей наведено у табл. 3

Таблиця 3

Коефіцієнти моделей властивостей цементно-зольних бетонів

Коефіцієнти	Термін придатності, хв	Структурна міцність. Па, через проміжок часу після замішування			Міцність на розтяг при розколюванні, МПа, у віці			Міцність на стиск, МПа, у віці		
		10 хв	25 хв	40 хв	1 доба	7 діб	28 діб	1 доба	7 діб	28 діб
b_0	71,5	3083	4703	7845	3,2	7,6	11,4	20,8	41,7	56
b_1	-10,0	288	342	548	1,16	1,6	2,4	10,2	11,8	14,9
b_2	-6,0	553	888	1333	0,34	0,4	0,78	4,12	4,66	4,25
b_3	-20,0	831	885	1452	0,8	0,7	0,7	6,47	3,10	4,1
b_{11}	0,2	126	184	296	0,07	-0,5	-0,4	2,44	-1,69	-1,2
b_{22}	5,2	176	261	423	-0,01	0,1	-0,03	-0,36	-0,5	0,31
b_{33}	-10,2	149	163	260	-0,03	-0,4	-0,3	2,09	-0,25	1,41
b_{12}	-2,5	133	188	131	0,14	0,2	0,43	1,08	2,59	2,20
b_{13}	-2,5	230	117	167	-0,06	-0,6	-0,37	1,00	-2,10	-0,9
b_{23}	2,3	192	235	208	0,04	-0,1	-0,04	-0,78	-1,53	0,15

Аналіз отриманих коефіцієнтів математичних моделей (табл. 3) та графічних залежностей (рис. 3...6) дозволяє отримати важливі технологічні висновки. Визначальними для початку тужавлення та структурної міцності досліджених сумішей є вміст гіпсу та золи у в'язучому (рис. 3, 4). Для міцності бетонів на розтяг при розколюванні вирішальний вплив має вміст в'язучого і частка золи-виносу в ньому (рис. 5, 6). При спільному аналізі моделей міцності при стиску та водопотреби бетонної суміші, як і, слід було очікувати, найбільш впливовими факторами є вміст в'язучого і частка золи. Для ранньої міцності бетону суттєвим є вміст гіпсу (рис. 5а, 6а).

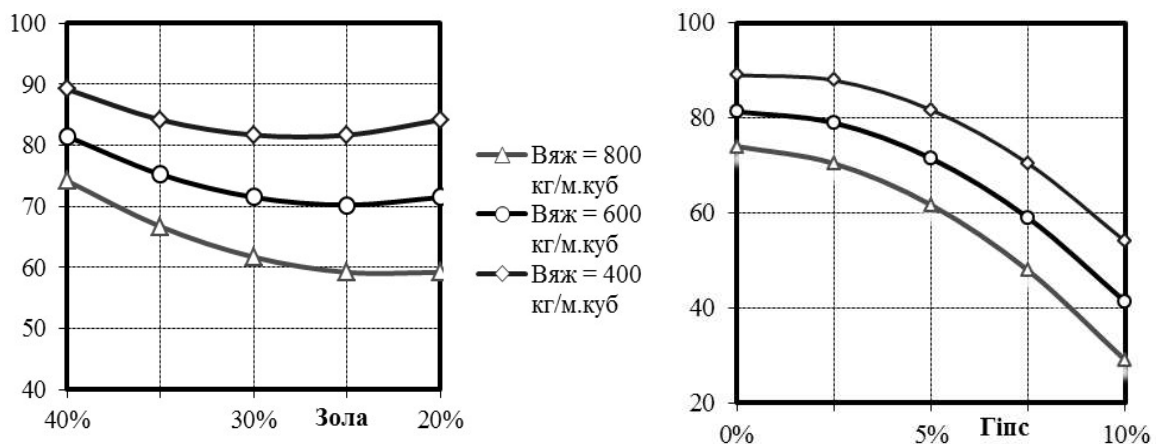


Рис.3. Графічні залежності початку тужавлення цементно-зольних сумішей для 3D-принтеру

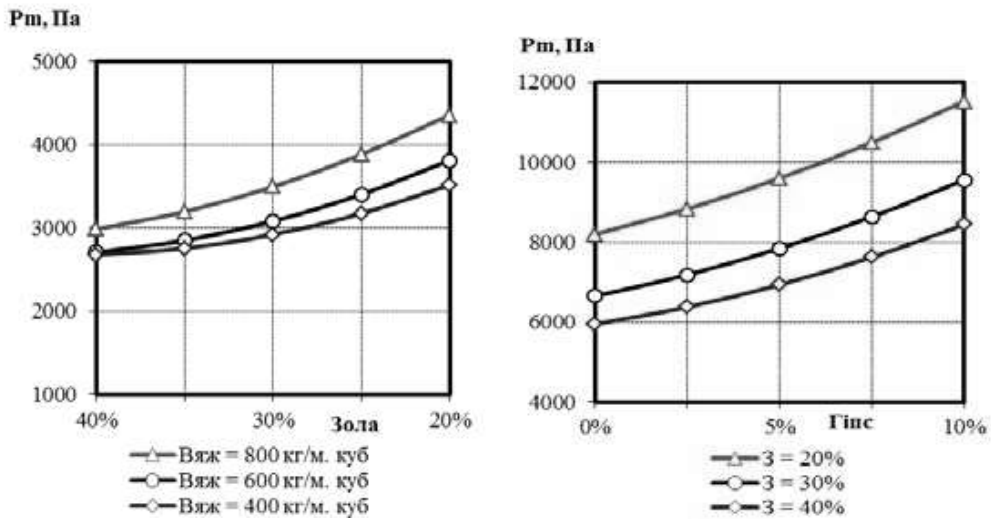


Рис.4. Графічні залежності структурної міцності після 10 хв (а) та 40 хв (б) твердіння цементно-золяних сумішей для 3D-принтеру

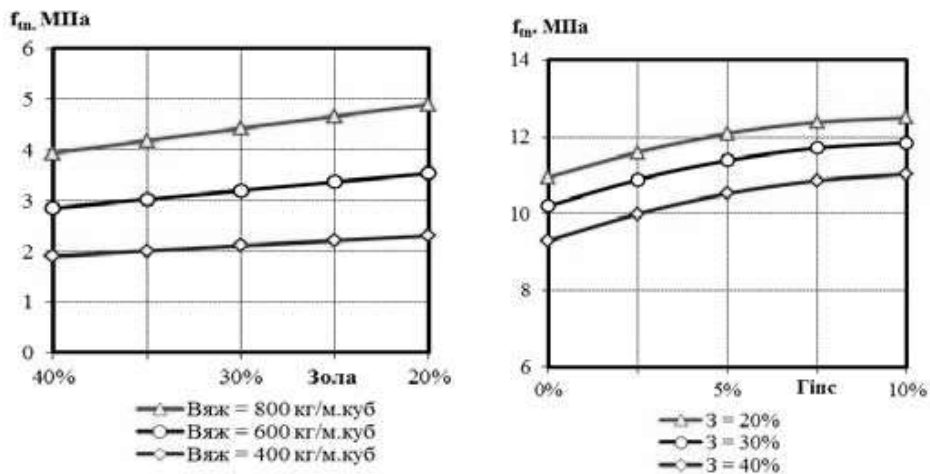


Рис. 5. Графічні залежності міцності на розтяг при розколюванні у віці 1 доби (а) та 28 діб (б) цементно-золяних сумішей для 3D-принтеру

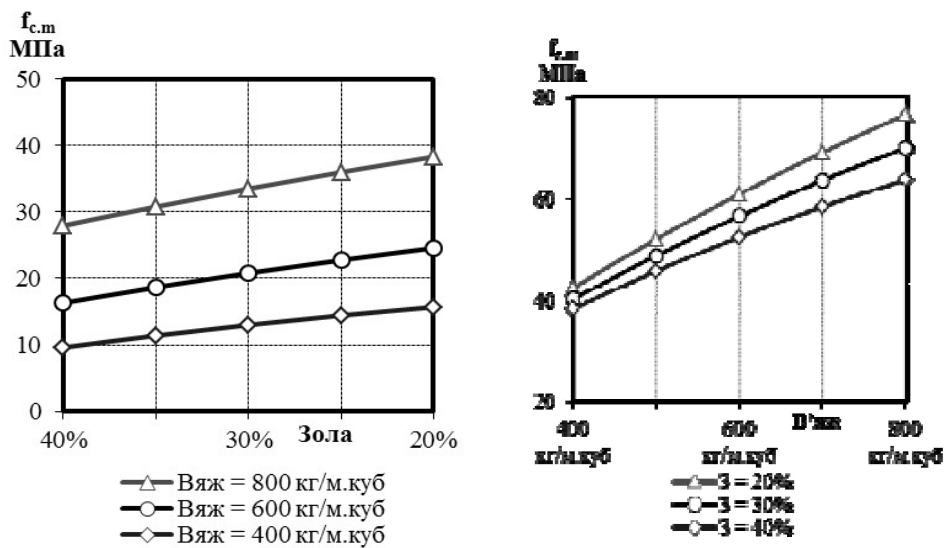


Рис. 6. Графічні залежності міцності при стиску у віці 1 доби (а) та 28 діб (б) цементно-золяних сумішей для 3D-принтеру

Висновки. З урахуванням особливостей виготовлення будівельних конструкцій при зведенні споруд із застосуванням 3D-принтеру визначено необхідні властивості екструдованих сумішей та бетонів на їх основі. Запропоновано методи визначення нормованих властивостей бетонної суміші та приладу для визначення необхідної структурної міцності при пошаровому формуванні.

Отриманий із застосуванням математичного планування експериментів комплекс експериментально-статистичних моделей, що описують вплив факторів складу на найбільш важливі при 3D бетонуванні властивості бетонної суміші та бетонів на цементно-зольному в'язучому у присутності добавки прискорювача твердіння будівельного гіпсу.

1. Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Procedia Engineering*. 2016. No. 151. Pp. 292-299.

2. Dvorkin, L.; Marchuk, V.; Hager, I.; Maroszek, M. Design of Cement-slag Concrete Composition. *Energies* 2022, 15(13).

3. Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Тхань Куй Анализ существующих технологических решений 3d-печати в строительстве DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876.

Ynozemtsev A.S., Korolev E.V., Zyonh Tkhan Kui Analyz sushchestvuiushchykh tekhnolohycheskykh reshenyi 3d-pechaty v stroytelstve DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876.

4. Дворкін Л.Й. Бетони нового покоління / Л.Й. Дворкін, В.В. Житковський, О.М. Бордюженко, В.В. Марчук, Ю.О. Рубцова. НУВГП. 2021. 317 с.

Dvorkin L.I. Betony novoho pokolinnia / L.I. Dvorkin, V.V. Zhytkovskyi, O.M. Bordiuzhenko, V.V. Marchuk, Yu.O. Rubtsova. NUVHP. 2021. 317 s.

5. Youjiang Wang, Wu H.C., Victor C. Li. Concrete reinforcement with recycled fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2000, no. 4-12, pp. 314-319.

6. Slavcheva, G.S., Artamonova, O.V. Rheological behavior of 3D printable cement paste: criterial evaluation. *Magazine of Civil Engineering*. 2018. 84(8). Pp. 97–108.

7. Le T.T., et al. Hardened properties of high-performance printing concrete // *Cement and Concrete Research*. 2012. T. 42. P. 558–566.

8. Kazemian A., Yuan X., Cochran E., Khoshnevis B. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials*, 2017, vol. 145, pp. 639–647. **9.** E. Secieru, S. Fataei, C. Schrofl, V. Mechtcherine, Formation of lubricating layer and flow type during pumping of cement-based materials, *Construction and Building Materials*, Volume 178, 30 July 2018, Pages 507-517.

10. G. Ma, Z. Li, L. Wang, Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing. *Construction and Building Materials*. Volume 162, 20 February 2018, Pages 613-627.

11. Дворкін Л.Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту / Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Житковський В.В. - Рівне: НУВГП, 2011- 174 с.

Dvorkin L.I. Rozv'язuvannia budivelno-tekhnolohichnykh zadach metodamy matematychnoho planuvannia eksperymentu / Dvorkin L.I., Dvorkin O.L., Zhytkovskyi V.V. - Rivne: NUVHP, 2011- 174 s.