

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ТА ЧИСЛОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННОЇ ДВОШАРНІРНОЇ АРКИ З ВИСОКОМІЦНОГО БЕТОНУ**

**EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDIES OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A REINFORCED CONCRETE DOUBLE-HINGED ARCH MADE OF HIGH-STRENGTH CONCRETE**

**Бабич Є. М., д. т. н., проф.,** ORCID ID: 0000-0003-1746-9991, **Караван В.В., к.т.н., доцент,** ORCID ID: 0000-0002-8261-692X, **Караван Б. В., асистент,** ORCID ID: 0000-0002-0499-7544 (Національний університет водного господарства та природокористування, Рівне)

**Babich Y., doctor of technical sciences, professor,** ORCID ID: 0000-0003-1746-9991; **Karavan V., candidate of technical sciences, associate professor,** ORCID ID: 0000-0002-8261-692X; **Karavan B., assistant,** ORCID ID: 0000-0002-0499-7544 (The National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

Експериментальним шляхом досліджено роботу двошарнірної залізобетонної арки з високоміцного швидкотверднучого бетону. На основі отриманих даних побудовані та описані графіки і залежності. Проведено числовий експеримент – виконані розрахунки дослідних арок у ПК «ЛІРА-САПР» методом скінченних елементів, співставленні дані числового експерименту з експериментальними дослідженнями арки.

The article analyzes the works of foreign scientists covering the state of experimental and theoretical research on reinforced concrete arches, in particular: the scope of application of reinforced concrete arch structures in construction; stress-strain state; review of experimental studies of reinforced concrete double-hinged arches. The design of the prototype is described, the materials and their main physical and mechanical characteristics are specified. The test procedure for the experimental arch is described, test schemes with the placement of measuring devices and their loading modes are shown. The operation of a two-hinged reinforced concrete arch made of high-strength quick-setting concrete was experimentally investigated, which made it possible to determine the features of the stress-strain state of the belt sections and the nature of the development of deflections and cracks under single static loads. The results of experimental studies of a reinforced concrete double-jointed arch without tensioning made of C90 class concrete are presented. For the prototype of the arch, the diagrams of the dependence of "load - concrete deformation", "load - reinforcement deformation", "load - deflection", "load - displacement of supports", and diagrams of the dependence of the crack opening width and

**the number of cracks in the arch belt on the loads were constructed. The results of a numerical experiment on the calculation of an experimental double-hinged reinforced concrete arch under a single short-term load by the finite element method in the LIRA-SAPR are presented. The data obtained from the numerical experiment were compared with the data obtained from the experimental study of the arch. Based on the results of experimental and theoretical studies of the stress-strain state of a reinforced concrete arch made of high-strength concrete, conclusions were formulated.**

**Ключові слова:** експеримент, арка, бетон, випробовування, розрахунок.  
Experiment, arch, concrete, testing, calculation.

**Вступ.** Завдяки своїй архітектурній привабливості, високим показникам несучої здатності і придатності до нормальної експлуатації, а також відносно легкому монтажу залізобетонні абочні конструкції широко використовуються у промисловому та цивільному будівництві.

Наразі виникає потреба в максимально швидких темпах зведення споруд різного призначення, що можливо досягнути шляхом введення в технологічний процес високоміцних швидкотверднучих бетонів, які дають змогу істотно збільшити темпи будівництва і відповідно зменшити терміни зведення будівель і споруд. Закономірності деформування при короткочасному статичному навантаженні високоміцних бетонів до цього часу вивчені недостатньо, що ускладнює розрахунки залізобетонних конструкцій з таких бетонів. Вирішенню цих задач присвячена ця стаття.

Аналіз останніх досліджень. На сьогоднішній день, в наукових колах, не вдалось віднайти досліджень, що стосувалися б вивчення роботи та напружено-деформованого стану залізобетонних абочних конструкцій з високоміцних бетонів при дії статичних навантажень. Проте, вдалось віднайти праці іноземних науковців, які досліджували роботу залізобетонних двочарнірних арок з важкого бетону на різні силові впливи.

Автор [1] досліджував несучу здатність залізобетонних арок з урахуванням технологічної пошкодженості бетону. Були виготовлені та випробувані на дію одноразового короткочасного навантаження, за різної схеми його розташування, 12 моделей залізобетонних двочарнірних арок прольотом 210 см із розмірами поперечного перерізу поясу  $5 \times 7$  см. Арки виготовлені з бетону класу С40/50, армувалися плоским в'язаним каркасом зі стержнів  $\varnothing 4$  мм Вр-І. Автором встановлено, що на ступенях завантаження перші силові тріщини розвивалися по траєкторіям технологічних тріщин на висоту до  $0,25h$ . При завантаженні зосередженим навантаженням в третині і чверті прольоту поясу арки силові тріщини розвиваються несиметрично відносно осі симетрії арки, аналогічно відрізняється і деформування осі арки. Найменша несуча здатність була в двочарнірних арках, завантажених у чверті їх прольоту, а найбільша –

в арках, завантажених зосередженою силою у середині прольоту. Автор рекомендує розраховувати двошарнірні арки за деформаційною схемою.

В роботі [2] досліджувався вплив технологічної пошкодженості на міцність та деформативність залізобетонних арок. Були виготовлені та випробувані на дію одноразового короткочасного навантаження три серії (14 зразків) залізобетонних двошарнірних арок прольотом 210 см із розмірами поперечного перерізу поясу  $5 \times 7$  см. Арки першої серії були виготовлені зі звичайного важкого бетону класу С40/50, другої серії – з бетону із застосуванням хімічної добавки, третьої серії – із бетону з додаванням поліпропіленового волокна. Автором встановлено, що перші нормальні тріщини в арках з'являються під прикладеними зосередженими силами або поблизу них, після чого, при рівні навантаження  $0,5F_u$ , з'являються тріщини у верхніх зонах приопорних ділянок арок. Стверджується, що розрахунок двошарнірних арок у ПК "SCAD" за деформованою схемою з урахуванням тріщин найбільш повно відображає їх роботу при навантаженні.

Постановка мети і задач досліджень. Ставиться за мету: дослідити напружено-деформований стан двошарнірної залізобетонної арки з високоміцного бетону за дії короткочасних одноразових навантажень шляхом експериментальних випробувань та числового експерименту.

Для досягнення зазначеної мети поставлено наступні задачі:

- розробити конструкцію та виготовити дослідні зразки, використавши в якості матеріалу високоміцний швидкотверднучий бетон;
- встановити особливості роботи та напружено-деформованого стану двошарнірної залізобетонної арки з високоміцного бетону за результатами проведення експериментальних досліджень та аналізу отриманих даних;
- виконати числовий експеримент роботи при одноразовому короткочасному навантаженні, а також провести порівняння отриманих даних із даними отриманими шляхом експериментальних досліджень.

Дослідні зразки та матеріали для їх виготовлення. Залізобетонна монолітна окреслена по колу арка має наступні геометричні параметри (рис.1): номінальна довжина – 216 см; проліт  $l = 200$  см; номінальна висота – 52 см; стріла підйому  $f = 40$  см; відношення  $f/l = 1/5$ ; радіус дуги арки  $R = 145$  см; розміри поперечного перерізу поясу  $h \times b = 14 \times 10$  см.

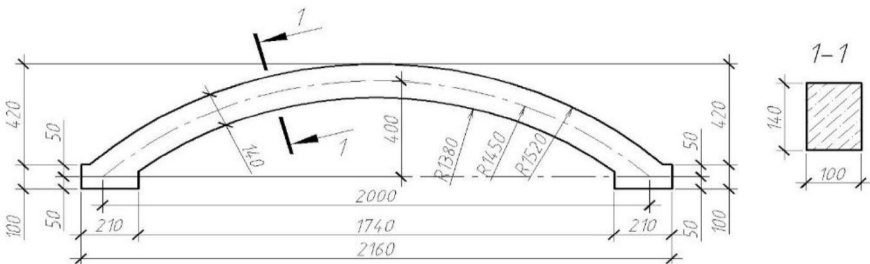


Рис. 1. Опалубне креслення дослідного зразка арки (розміри в мм)

Армування арки виконувалось за допомогою одного в'язаного плоского каркасу. В якості робочої поздовжньої арматури каркасу було використано два стержні Ø10 A500C ( $A_s + A_s / = 1,57 \text{ см}^2$ ). Стержні поперечної арматури приймались Ø4 Вр-I. Коефіцієнт армування поясу арки склав  $\rho = 1,13\%$ . В якості матеріалу використовувався дрібнозернистий високоміцний швидкотверднучий бетон, який виготовлявся за складом та методикою описаною в [3].

Методика досліджень. Залізобетонна арка випробовувалась на дію статичного навантаження [4] до руйнування (рис. 2). Для сприйняття зусилля розпіру арки на балці преса влаштовувались упори з металевих прокатних профілів, тим самим моделюючи передачу розпіру від арок покриття споруд на стінові конструкції, фундаменти тощо. Зусилля розпіру арки від прикладеного навантаження вимірювались на опорі за допомогою попередньо протарованого кільцевого динамометра.

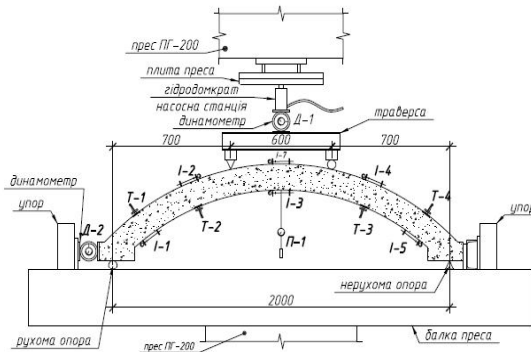


Рис. 2. Схема випробування арки з розміщенням вимірювальних приладів: Т-1...Т-4 – тензометри Гугенбергера; І-1...І-7 – індикатори годинникового типу І(2)МИГ; П-1 – прогиномір 6ПАО; Д-1 – динамометр

Навантаження дослідної арки здійснювалось ступенями, величина яких складала 5...10% від руйнівного (5...10 кН). Після кожного ступеня навантаження здійснювалася «витримка» протягом 7...15 хвилин, під час якої знімались та записувались в журнал досліджень покази з усіх вимірювальних приладів, здійснювався візуальний огляд зовнішніх поверхонь, фіксувались процеси утворення, розвитку тріщин, вимірювалася ширина розкриття тріщин.

Результати експериментальних досліджень. Значення відносних деформацій максимально стиснутої фібри бетону в замку арки (за індикатором І-7) при навантаженні  $F_u = 105 \text{ кН}$  становили  $\varepsilon_c = 222 \times 10^{-5}$ , що перевищує граничні  $\varepsilon_{cl} = 220 \times 10^{-5}$  для бетону класу С90. Відносні деформації максимально розтягнутої фібри бетону в замку арки (за індикатором І-3) при навантаженні  $F_u = 105 \text{ кН}$  склали  $\varepsilon_{cl} = 170 \times 10^{-5}$ , що значно перевищує граничні значення  $\varepsilon_{ctn} = 10 \times 10^{-5}$  (рис.3). Граничних значень відносні деформації бетону розтягу в поясі арки досягли вже на І-му ступені навантаження.

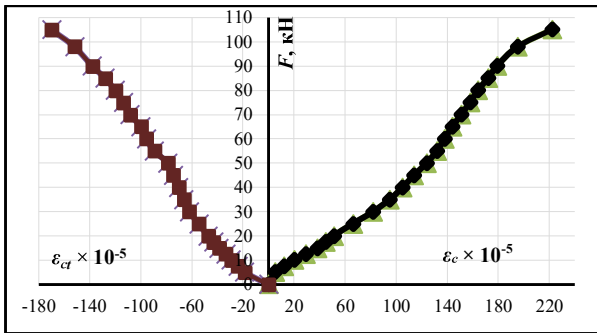


Рис. 3. Зміна відносних деформацій бетону у замковому перерізі арки

В перерізах на віддалі 68 см від опор, при навантаженні  $F_u = 105$  кН, відносні деформації бетону стиску становили  $\varepsilon_c = 100 \times 10^{-5}$ , що менше граничного значення  $\varepsilon_{cl} = 220 \times 10^{-5}$  (див. рис. 4, а). В опорних перерізах арки, у нижній зоні поясу, бетон від початку завантаження і до руйнування працював на стиск ( див. рис. 4, б). Відносні деформації бетону стиску при  $F_u = 105$  кН становили: поблизу шарнірно-рухомої опори –  $\varepsilon_c = 28 \times 10^{-5}$ , поблизу шарнірно-нерухомої опори –  $\varepsilon_c = 40 \times 10^{-5}$ , що менше граничного значення  $\varepsilon_{cl} = 220 \times 10^{-5}$ .

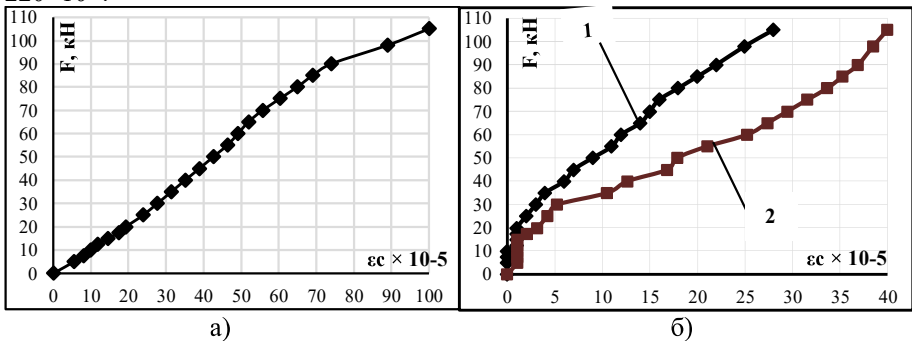


Рис. 4. Зміна відносних деформацій бетону в арці: а) в перерізах на віддалі 68 см від опор, б) в перерізах на віддалі 35 см від шарнірно-рухомої опори (1) і шарнірно-нерухомої опори (2)

Значення відносних деформацій стиснутої робочої арматури у прольоті поясу арки при навантаженні  $F_u = 105$  кН становили  $\varepsilon_{s2} = 254,2 \times 10^{-5}$ , що перевищує максимальні відносні деформації, які відповідають напруженням  $\sigma_y - \varepsilon_{s0} = 242,5 \times 10^{-5}$  для арматури класу А500С (див. рис. 5, а). Значення відносних деформації розтягнутої робочої арматури у прольоті поясу арки при  $F_u = 105$  кН становили  $\varepsilon_{s1} = 194 \times 10^{-5}$ , що менше за максимальні відносні деформації  $\varepsilon_{s0} = 242,5 \times 10^{-5}$ . При  $F_u = 105$  кН відносні деформації стиску робочої арматури в опорних перерізах арки становили  $\varepsilon_{s2} = 62 \times 10^{-5}$ , відносні деформації розтягу робочої арматури в перерізах на віддалі 68 см від опор

арки склали  $\varepsilon_{s1} = 100 \times 10^{-5}$ , що менше максимальних  $\varepsilon_{s0} = 242,5 \times 10^{-5}$ . Вимірний на опорі за допомогою кільцевого динамометра розпір арки становив при  $F_u = 105$  кН –  $H = 60$  кН (див. рис. 5, б). Як видно з графіка, зусилля розпіру в арці пропорційні навантаженню. При прийнятій схемі навантаження зусилля розпіру дорівнюють: при  $F = 10$  кН –  $H = 0,5F$ ; в діапазоні  $F = 15 \dots 40$  кН – в середньому  $H = 1,85F$ ; в діапазоні  $F = 45 \dots 105$  кН – в середньому  $H = 1,74F$ .

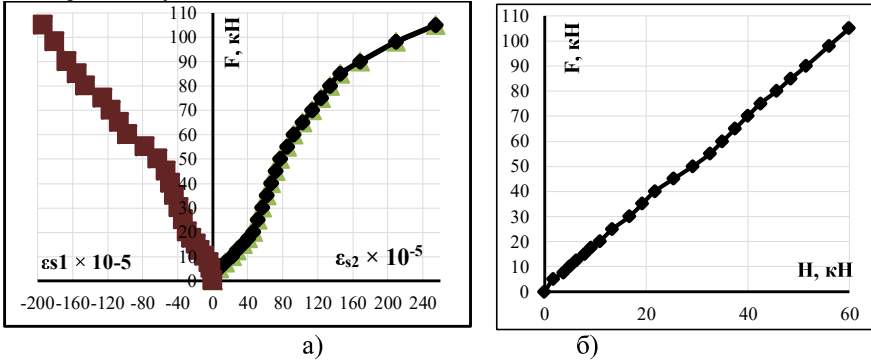


Рис. 5. Залежність від навантаження: а) відносних деформацій арматури у прольоті дослідної арки, б) зусилля розпіру

При навантаженні  $F_u = 105$  кН прогин поясу арки становив  $f = 7$  мм, що менше гранично-допустимого значення встановленого нормами [5]  $f_u = 1/150l = 13,3$  мм (див. рис. 6, а). Надалі, зі збільшенням навантаження, приріст прогинів на ступенях суттєво збільшуються, що пов'язано зі збільшенням пластичних деформацій бетону, утворенням та розвитком тріщин та, в загальному, зі зменшенням жорсткості поясу. Від початку навантаження і до руйнування у змінній зоні поясу арки зафіксували 6 тріщин. Відстань між тріщинами (максимальний крок) в середньому становила  $s_r = 130$  мм. Глибина розкриття нормальних тріщин у поясі арки складала в середньому 64 мм, за виключенням магістральної – 53 мм. Графіки зміни ширини розкриття тріщин та кількості тріщин у поясі арки залежно від навантаження (див. рис. 6, б).

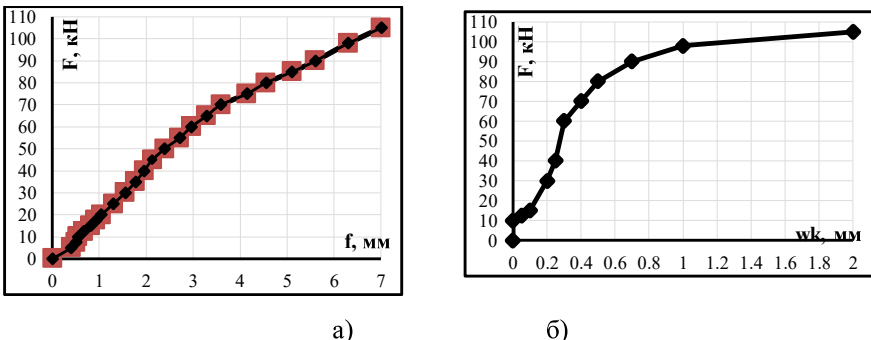


Рис. 6. Залежність від навантаження: а) прогинів поясу, б) ширини розкриття тріщин

Зруйнувалася арка при навантаженні  $F_u = 105$  кН по наскрізній магістральній похилій тріщині з одночасним руйнуванням стиснутого бетону у верхній зоні поясу під зосередженою силою. При цьому деформації у стиснутій робочій арматурі та стиснутому бетону поясу арки досягли граничних значень.

Результати числового експерименту. За допомогою розрахунку в ПК ЛІРА-САПР отримано числові значення внутрішніх зусиль, що виникають в перерізах арки (рис. 7) при навантаженнях  $F=10$  кН, 50 кН, 90 кН. Теоретичні значення зусиль в перерізах арки визначались згідно формул та рекомендацій [6].

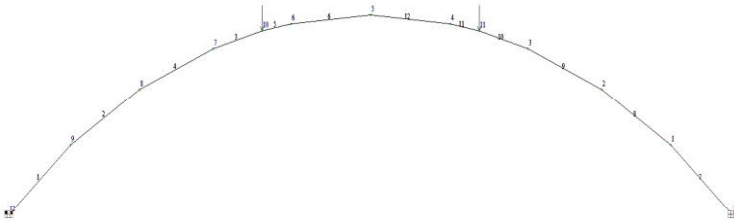


Рис. 7. Модель арки з номера вузлів (точок перерізу) та елементів

Порівняльна таблиця теоретичних результатів з даними ПК ЛІРА-САПР при усередненому навантаженні  $F=50$  кН

Номер точки перерізу	$M_{Ліра.}$ , кНм	$Q_{Ліра.}$ , кН	$N_{Ліра.}$ , кН	$M_{теор.}$ , кНм	$Q_{теор.}$ , кН	$N_{теор.}$ , кН	$k = \frac{M_{Ліра.}}{M_{теор.}}$	$k = \frac{Q_{Ліра.}}{Q_{теор.}}$	$k = \frac{N_{Ліра.}}{N_{теор.}}$
1	-2,854	40,873	49,163	-3,320	41,669	52,224	0,860	0,981	0,941
2	-3,104	43,643	58,855	-3,410	44,520	60,139	0,910	0,981	0,979
3	-1,997	46,043	67,255	-2,100	47,222	69,763	0,951	0,975	0,964
4	3,500	48,470	77,000	3,620	49,243	80,398	0,967	0,984	0,958
5	1,191	0,000	87,743	1,380	0,000	90,300	0,863	0,000	0,972
13	0,000	38,941	90,443	0,000	39,043	94,903	0,000	0,997	0,953
Середнє відношення $k$							0,910	0,982	0,961
Середньоквадратичне відхилення $\sigma$							0,044	0,007	0,012
Коефіцієнт варіації $V_c$ , %							6,18	1,0	1,42

**Висновки та рекомендації.** За допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР можна моделювати роботу двохшарнірних залізобетонних арок та з високою достовірністю визначати значення внутрішніх зусиль, що виникають в їх конструктивних елементах. Результати статистичної обробки збіжності величин внутрішніх зусиль в елементах арок за дії короткочасного статичного навантаження отриманих в ПК ЛІРА-САПР та теоретичним методом складають: середньоквадратичне відхилення відношень  $\sigma = 0,007...0,044$ , коефіцієнт варіації  $V_c = 1,0...6,18\%$ .

1. Сабір Юсіф Бакір. Несуча здатність залізобетонних арок з урахуванням технологічної пошкодженості бетону. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. 2013.

Sabir Yusif Bakir. Nesucha zdatnist zalizobetonnykh arok z urakhuvanniam tekhnolohichnoi poshkodzhenosti betonu. Avtoreferat dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.01. 2013.

2. Хассеін Джухад Салман Аль-Амері. Вплив технологічної пошкодженості на міцність та деформативність залізобетонних арок. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. 2013.3.

Khassein Dzhukhad Salman Al-Ameri. Vplyv tekhnolohichnoi poshkodzhenosti na mitsnist ta deformatyvnist zalizobetonnykh arok. Avtoreferat dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.01. 2013.3.

3. Дворкін Л.Й., Бабич Є.М., Житковський В.В., Бордюженко О.М., Кочкар'єв Д.В., Філіпчук С.В., Ковалик І.В., Ковальчук Т.В., Скрипник М.М. Високоміцні швидкотверднучі бетони і фібробетони. Монографія. Рівне : НУВГП, 2017. 331 с.

Dvorkin L.I., Babych Ye.M., Zhytkovskyi V.V., Bordiuzhenko O.M., Kochkarov D.V., Filipchuk S.V., Kovalyk I.V., Kovalchuk T.V., Skrypnyk M.M. Vysokomitsni shvydkotverdnuchi betonu i fibrobetony. Monohrafiia. Rivne : NUVHP, 2017. 331 s.

4. Бабич Є.М. „Дослідження роботи двохшарнірних залізобетонних арок при короткочасному повторному навантаженні” / Є.М.Бабич, Д.Я.Кислюк / Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. Випуск 16 - Рівне : НУВГП, 2008. 18с.

Babych Ye.M. „Doslidzhennia roboty dvokhsharnirnykh zalizobetonnykh arok pry korotkochasnomu povtornomu navantazhenni” / Ye.M.Babych, D.Ia.Kysliuk / Resursoekonomni materialy, konstruktzii, budivli ta sporudy. Zbirnyk naukovykh prats. Vypusk 16 - Rivne : NUVHP, 2008. 18s.

5. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. [Чинний від 01.01.2007]. Вид. офіц. Київ: Мінбуд України, 2006. 36 с.

DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennia i vplyvy. Normy proektuvannia. [Chynnyi vid 01.01.2007]. Vyd. ofits. Kyiv: Minbud Ukrainy, 2006. 36 s.

6. Улицкий И. И. Железобетонные конструкции (расчет и конструирование). / И.И.Улицкий, С.А.Ривкин, М.В.Самолетов, А.А.Дыховичный, М.М.Френкель, В.И.Кретов / Изд. третье, переработанное и дополненное. Киев, «Будивельник», 1972. 992 с.

Ulytskyi Y. Y. Zhelezobetonnye konstruksyy (raschet y konstruyrovanye). / Y.Y.Ulytskyi, S.A.Ryvkin, M.V.Samoletov, A.A.Dykhovychnyi, M.M.Frenkel, V.Y.Kretov / Yzd. trete, pererabotannoe y dopolnennoe. Kyev, «Budyvelnyk», 1972. 992 s.