

7. Экспериментальное исследование стенок бункеров на моделях: Отчет о НИР по теме № 9 148-51-81 (заключит.) / Госуд. проектн. ин-т строит. металлокон-ий "Днепрпроектстальконструкция". – Днепропетровск, 1982. – 413 с.

8. Ягофаров, Х. Основы теории проектирования листовых металлических конструкций. Пирамидально-призматический бункер / Х. Ягофаров, Н. Н. Собакин. – Екатеринбург: УрГУПС, 2006. – 234 с.

9. ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2012 "Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 4. Бункери і резервуари. – введ. 2014-01-07. – К.: Мінрегіонбуд України, 2012. – 150 с.

10. Карпиловський, В. С. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD / В. С. Карпиловський, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер. – М.: Издательство СКАД СОФТ, 2011. – 656 с.

#### АННОТАЦИЯ

На основе проведенных экспериментальных исследований изучен характер работы гофрированных панелей стенок емкостных сооружений. Исследование проведено с различными исходными параметрами гофра для нескольких типов сечения гофра при воздействии сыпучих материалов. Кроме того, выполнен сравнительный анализ с результатами компьютерного моделирования работы таких панелей и уточнен способ моделирования перераспределения горизонтального давления на каждую отдельную пластину гофра при расчете в проектно-вычислительном комплексе.

Ключевые слова: емкостное сооружение, гофрированный профиль, экспериментальное исследование, деформации, компьютерное моделирование.

#### ANNOTATION

On the basis of experimental research studied the nature of the corrugated panel walls capacitive structures. The study was conducted with different output parameters for multiple types of gofra flute section under the action of bulk materials. Besides a comparative analysis of the results of computer simulation of such panels and a revised method of modeling horizontal redistribution of pressure on each individual plate corrugation in the calculation of design computing systems were performed.

Keywords: bulk construction, corrugated section, experimental investigation, distortion, computer simulation.

#### УДК 624.0.12.4

Скорук О.М., Глагола І.І., КНУБА, м. Київ

### МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СТАЛЕФІБРОБЕТОННИХ ПЛИТ, ОПЕРТИХ ПО КОНТУРУ ЗА ДОПОМОГОЮ ПК ЛІРА-САПР

#### АННОТАЦІЯ

Стаття присвячена методиці моделювання роботи плоских залізобетонних, сталефібробетонних та двошарових комбіновано-армованих плит опертих по контуру під дією рівномірно-розподіленого навантаження. Викладені результати напружено-деформованого стану залізобетонних плит, плит в комбінації з шаром сталефібробетону та суцільних сталефіброзалізобетонних плит. Розрахунок і співставлення жорсткості плит виконано за допомогою ПК "ЛІРА-САПР". В роботі наведено результати отриманих даних та виконано порівняння їх з даними отриманими в результаті експерименту і теоретичних розрахунків.

Ключові слова: сталефібробетон, жорсткість, міцність, плита, фібра.

**Вступ.** Розрахунок складних, статично-невизначених систем потребує застосування сучасних розрахунково-обчислювальних комплексів. Існує багато програмних комплексів (далі ПК), які орієнтовані на проведення розрахунків будівельних конструкцій. До найбільш відомих ПК, що окрім операцій статичних розрахунків дозволяють виконувати конструювання елементів, можна віднести ANSYS, COSMOS, STARK (Росія), ЛІРА-САПР (Україна), SCAD (Україна).

Фізична не лінійність та анізотропія, що набуваються внаслідок тріщиноутворення, а також неоднорідність зв'язків між напруженнями та деформаціями є основними факторами залізобетону, які необхідно враховувати в сучасних моделях і методах розрахунку конструкцій.

В загальному випадку, задача розрахунку залізобетонних конструкцій з урахуванням фізичної нелінійності зводиться до розв'язку системи нелінійних алгебраїчних рівнянь.

Пошук методу чисельного моделювання роботи сталефібробетонних плит опертих по контуру виконувався виходячи із можливості виконання нелінійних розрахунків, які більш точно відобра-

жують напружено-деформований стан залізобетонних елементів та додатково, врахування у розрахунках особливостей роботи, що виникають у плитах.

**Мета роботи.** Метою чисельних досліджень роботи плит є дослідження ефективності прийнятого конструктивного рішення; на основі порівняння експериментальних та розрахункових даних, оцінити прийнятність лінійних та відповідність нелінійних розрахунків одно-, двошарових, комбіновано армованих сталевібробетонних та залізобетонних плит, згідно табл. 1.

**Основні завдання роботи.** В рамках поставленої мети досліджень вирішували такі завдання:

- розробити розрахункові схеми та методику чисельних досліджень плит для різних серій плит, провести чисельні дослідження роботи плит в нелінійній постановці задач;

- на основі аналізу результатів розрахунків оцінити ефективність прийнятого конструктивного рішення (на стадії планування експерименту);

- на основі порівняння схем формування тріщин, величин та характеру розвитку прогинів встановити відповідність розрахунків сталевібробетонних комбіновано армованих та двошарових плит з урахуванням фізичної нелінійності та експериментальних даних;

- виходячи з порівняння експериментальних та отриманих за результатами нелінійних розрахунків прогинів плит встановити коректність оцінки прогинів плит на основі розрахунків в межах пружності.

**Основний матеріал.** Розрахунки на ЕОМ дослідних зразків виконували за допомогою ПК "ЛИРА-САПР" [5], розробники якого інтенсивно впроваджують напрямок урахування фізичної нелінійності при розрахунку пластин та оболонки.

ПК "ЛИРА-САПР" адаптований до вимог діючих нормативних документів [1, 2] та реалізує метод скінчених елементів у переміщеннях. Найбільш досконало розроблено модулі будівельних конструкцій у межах пружності, при цьому кількість невідомих у рамках методу скінчених елементів обчислюється сотнями тисяч.

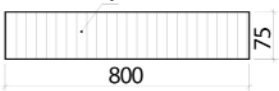
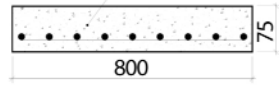
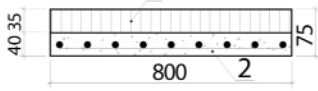
Нелінійний процесор ПК "ЛИРА-САПР" призначений для вирішення фізично, геометрично та конструктивно нелінійних задач з покроковим методом. Даний процесор дозволяє отримати компоненти напружено-деформованого стану з урахуванням нелінійних ефектів як для моно- так і для біматеріальних конструкцій, зокрема залізобетонних. Схема може вміщувати декілька навантажень із яких можна сформувати послідовність (історію) навантажень.

Для розв'язку фізично нелінійних задач нелінійний процесор створює процес покрокового навантаження конструкцій та забезпечує вирішення системи рівнянь на кожному кроці нелінійних навантажень для значення приросту вектора вузлових навантажень з формуванням векторів переміщень, зусиль та нових інтегральних жорсткостей відповідно до дотичного модуля деформацій для наступного кроку завантажень.

Якісний аналіз отриманих даних можна провести виходячи зі співставлення результатів експериментів та чисельних розрахунків.

Вибір розрахункової схеми чисельного моделювання проводили на основі аналізу значної кількості варіантів. Опрацьовані різновиди варіантів дали можливість проаналізувати, порівняти та виявити схеми, що найбільш точно задовольняють умовам проведення експериментальних досліджень.

Таблиця 1. Об'єм експериментальних досліджень

№ серії	Марка	Вид зразків	Переріз	Склад
I	ПФ-1	Плита сталевібробетонна, тип фібри Ф-1		1 - сталевібробетон (по всьому об'єму)
	ПФ-2	Плита сталевібробетонна, тип фібри Ф-2		
II	ПЗ-1	Плита залізобетонна, Ø 5 мм класу Вр-1		1 - бетон (по всьому об'єму)
	ПЗ-2	Плита залізобетонна, Ø 8 мм класу А500С		
III	ПФЗ-1	Плита двошарова тип фібри Ф-1		1 - сталевібробетон 2 - залізобетон
	ПФЗ-2	Плита двошарова тип фібри Ф-2		

Розрахункова модель плити являє прямокутну пластину, шарнірно оперту по контуру та апроксимовану фізично нелінійними скінченими елементами (далі СЕ) з бібліотеки ПК "ЛИРА-САПР", а саме:

– СЕ тип №231 – восьми вузловий СЕ призначений для моделювання фізичної нелінійності в просторових конструкціях. Використаний для апроксимації тіла плити;

– СЕ тип №210 – універсальний просторовий стрижневий СЕ, призначений для моделювання фізичної не лінійності в стрижневих конструкціях. Використаний для апроксимації армуючої сітки застосованої для армування дослідних зразків.

Навантаження прикладене на 4-ох, симетрично розміщено відносно центра пластини локальних ділянках у вигляді рівномірно-розподіленого по площі (рис.1).

Скінчені елементи типу №231 та №210 (рис. 2) сприймають такі види напружень: NX – нормальне напруження вздовж осі  $X_1$ , NY – нормальне напруження вздовж осі  $Y_1$ , NZ – нормальне напруження вздовж осі  $Z_1$ , TXY – дотичне напруження в площині  $X_1 Y_1$ , TXZ – дотичне напруження в площині  $X_1 Z_1$ , TYZ – дотичне напруження в площині  $Y_1 Z_1$ .

При чисельному дослідженні напружено-деформованого стану плит для урахування нелінійної деформації матеріалів застосований "11-ий експоненціальний закон нелінійного деформування". Це дозволило використати результати лабораторного випробування зразків матеріалів конструкції для призначення фізико-механічних параметрів (див. табл. 2) бетону, сталевібробетону та арматурних стрижнів. За фізико-механічними характеристиками конструкції виконано чисельне дослідження трьох серій плит: залізобетонна плита, сталевібробетонна

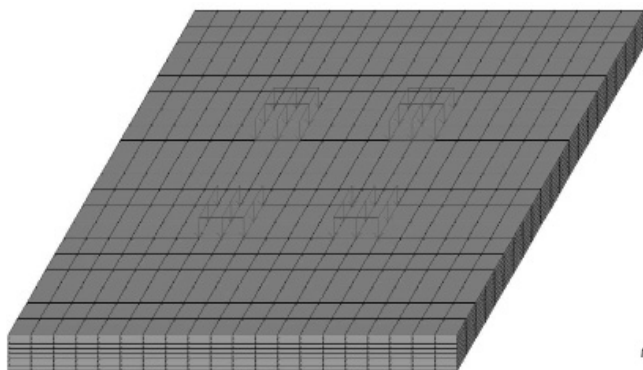


Рис. 1. Скінчено елемента модель плити, загальний вигляд

плита, комбіновано армована сталевібробетонна двошарова плита.

Навантаження до плит для всіх варіацій задачі прикладене ступінчасто від 0,2 до 2т з кроком 0,2...0,4 т на чотири ділянки площею 4СЕ. На кожному кроці навантаження фіксувався напружено деформований стан конструкції, зони виникнення тріщин та прогини.

**Результати чисельних досліджень.** Результати розрахунку представлені в вигляді ізополів переміщення, а також у виді схем покрокового деформування розрахункової моделі, перевернутої на 180 градусів (для наглядного характеру руйнування) зразків.

Нижче наведені рисунки (рис. 3-5), які відображають поля ізоліній переміщень та ділянок розтягу і утворення тріщин для трьох запропонованих варіантів задачі при навантаженнях 2т.

Аналіз змін прогинів плит та ізоліній тріщиноутворення в залежності від поступового збільшення навантаження, за результатами розрахунків з використанням ПК "ЛИРА-САПР", дозволяє виділити такі характерні етапи.

Перший етап триває від початку прикладання навантаження до появи перших тріщин, які з'являються при навантаженні інтенсивністю 10...28% від руйнівного. Другий етап протікає в проміжку навантажень інтенсивністю 28-45% від руйнівного. На цьому етапі зафіксовано збільшення зон тріщиноутворення в залізобетонній плиті та поява ділянок з тріщинами в плитах ПФ та ПФЗ. При аналізі величин прогинів помітно, що вони зростають повільніше ніж в залізобетонній плиті ПЗ. На третьому етапі деформації та тріщини зростають в усіх зразках.

Для якісної та кількісної оцінок впливу фібрового армування на жорсткість плити наведені графіки зміни прогинів трьох типів плит в залежності від зміни навантаження (рис. 6).

При вивченні деформацій опертих по контуру плит під дією рівномірного навантаження приведена обробка власних експериментальних досліджень та порівняння дослідних прогинів зазначених плит з теоретичними розрахунками за різними методиками та даних за ПК "ЛИРА-САПР".

**Пропозиції щодо розрахунку дослідних зразків.**

Перш за все перевіряли відповідність отриманих прогинів розрахованими за формулами теорії пружності. Виходячи з формули (1) Б.Г. Галерки-

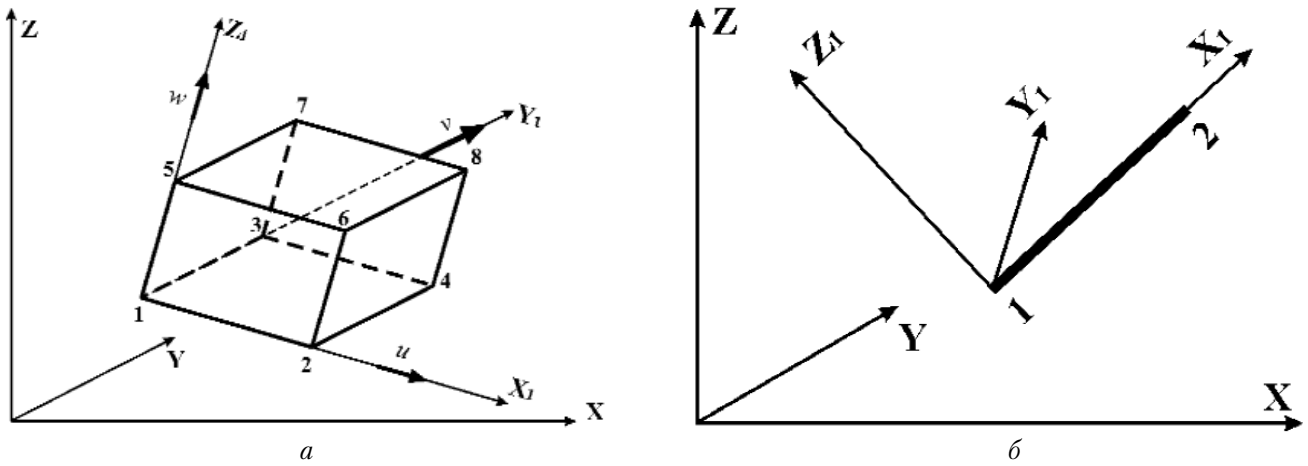


Рис. 2. а) Локальна система координат СЕ, тип №231,  
б) Локальна система координат СЕ, тип №210

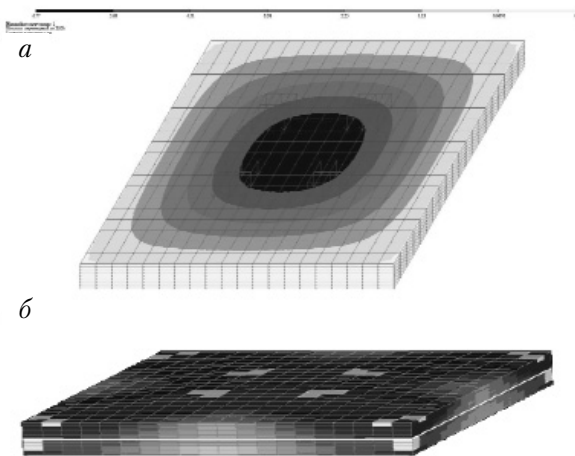


Рис. 3. Ізополя напружень залізобетонної плити:  
а) Ізополя переміщень ( $P = 4 \times 2,0 \text{ m}$ )  
б) Ізополя ділянок розтягу і утворення тріщин ( $P = 4 \times 2,0 \text{ m}$ )

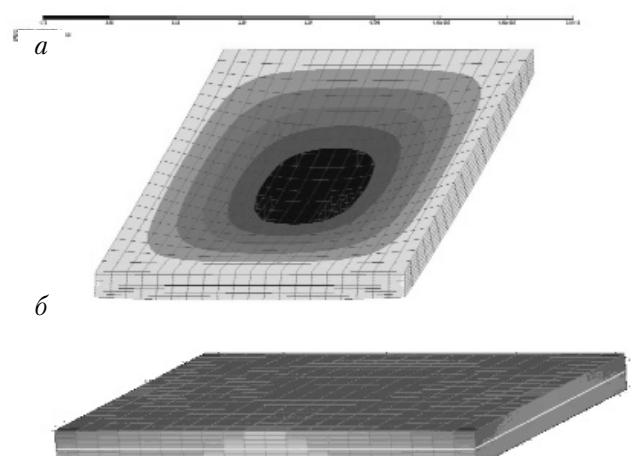
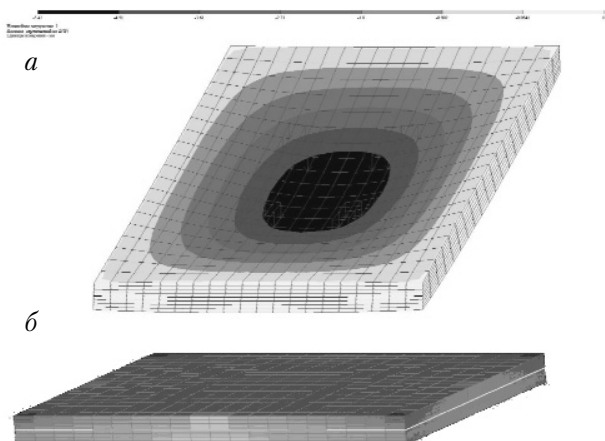


Рис. 4. Ізополя напружень сталевібробетонної плити:  
а) Ізополя переміщень ( $P = 4 \times 2,0 \text{ m}$ )  
б) Ізополя ділянок розтягу і утворення тріщин ( $P = 4 \times 2,0 \text{ m}$ )

Таблиця 2. Параметри матеріалів за результатами лабораторних випробувань

№ п/п	Параметр, розмірність	Матеріали		
		Бетон	Сталевібробетон	Арматура
1	$n$ (коефіцієнт Пуасона)	0,2	0,2	0,3
2	$R_{\sigma}$ , $\text{т/м}^3$	2,5	2,5	7,85
3	$E_{b(s)}$ , $\text{т/м}^2$ (модуль Юнга)	$2,4 \times 10^6$	$3,5 \times 10^6$	$1,7 \times 10^7$
4	$\sigma^{(-)}$ , $\text{т/м}^2$	2668	3624	36000
5	$N_{куб}$ МПа (кубикова міцність на стиск)	39,2	40	-
6	$N_{призм(-)}$ МПа (призмова міцність на стиск)	33,32	34	-
7	$\sigma^{(+)}$ , $\text{т/м}^2$	149	297	36000
8	$N_{призм(+)}$ МПа (призмова міцність на розтяг)	1,46	1,58	-



**Рис. 5.** Ізополя напружень сталевібробетонної комбінованоармованої двошарової плити:  
 а) Ізополя переміщень ( $P = 4 \times 2,0 \text{ m}$ )  
 б) Ізополя ділянок розтягу і утворення тріщин ( $P = 4 \times 2,0 \text{ m}$ )

на, для квадратної плити, опертій по контуру, прогин по центрі плити від рівномірно-розподіленого навантаження становить:

$$f = 0,04706gl^4 / E_i h^3, \quad (1)$$

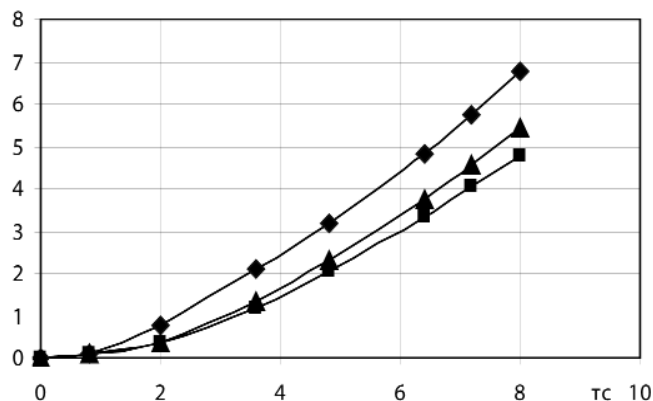
де  $q$  – рівномірно-розподілене навантаження;  
 $l$  – розрахунковий проліт плити;  
 $h$  – висота плити;

$E_i = E_c = E_f$  – модуль пружності відповідно для важкого бетону і сталевібробетону.

Для порівняння результатів розрахунків прогинів плит, використали методику В.Н. Мурашова, який використавши формулу Б.Г. Галеркіна, виразив циліндричну жорсткість через жорсткість на одиницю ширини плити. Такий прийом рекомендує СНиП 2.03.01-84.

Через навантаження і жорсткість  $B$ , прогин  $f$  приймає вигляд (2):

$$f = 1/248xql^4 / B \approx 0,004ql^4 / B, \quad (2)$$



**Рис. 6.** Графіки зміни прогинів  
 ◆ – графік прогину плити типу ПЗ, ▲ – графік прогину плити типу ПФ,  
 ■ – графік прогину плити типу ПФЗ

Жорсткість залізобетонного перерізу при згині визначають по розтягнутій зоні одношарової плити (3):

$$B = zE_s / \psi_s x A_s (d - x), \quad (3)$$

де  $A_s$  – площа робочої арматури;  
 $E_s$  – початковий модуль пружності;  
 $d$  – корисна висота перерізу згинального елемента;

$\psi_s$  – коефіцієнт, який враховує роботу розтягнутого бетону з тріщинами;

$z$  – висота стиснутої зони бетону у нормальному перерізі з тріщиною, визначається за формулою (4);

$$z = d - x / 3, \quad (4)$$

$x$  – висота стиснутої зони бетону у нормальному перерізі з тріщиною, визначається за формулою (5)

$$x = h \epsilon_c / \epsilon_c + \epsilon_{su}, \quad (5)$$

де  $\epsilon_c$  – відносні деформації стиснутого бетону;  
 $h$  – загальна висота перерізу сталевібробетона

**Таблиця 3.** Співставлення розрахункових і експериментальних прогинів плит

№ серії	Марка	Розрахунок прогинів, ф, мм			Прогини отримані з ПК «ЛИРА-САПР», мм	Прогини отримані з експерименту, мм
		за формулою (1)	за формулою (2)	згідно ДСТУ Б В.1.2-3 1/150L		
I	ПФ-1	0,21	4,58	4,66	4,77	5,13
II	ПФ-2	0,20	4,62		4,69	5,04
	ПЗ-1	0,26	4,96	5,12	5,64	
III	ПЗ-2	0,21	4,75	5,04	5,51	
	ПФ3-1	0,31	4,21	4,53	5,0	
	ПФ3-2	0,32	4,23	4,46	4,92	

(робоча висота залізобетонного перерізу);

$\varepsilon_{su}(\varepsilon_{fu})$ — граничні відносні деформації розтягнутої арматури (розтягнутого сталевібробетону);

Для сталевібробетонної плити формула (3) прийме вигляд:

$$V_f = E_s / \psi_s z x b x (h - x), \quad (6)$$

Виконуючи розрахунки двошарових плит, змінюють модуль пружності одного матеріалу на приведений  $E_{red}$ , враховуючи висоту розтягнутої зони кожного матеріалів. Аналогічно обчислюємо площу розтягнутої зони  $A_{red}$ , моменту опору  $W_{red}$  тощо.

Згідно з ДСТУ Б В.1.2-3 нормують відносні прогини плит. Граничні прогини обмежують виходячи з конструктивних, фізіологічних і технологічних вимог. Для елементів конструкцій будівель і споруд вертикальні прогини від постійних, короткочасних і тривалих навантажень не повинні перевищувати 1/150 прольоту.

Результати розрахунків приведені у таблиці 3, де співставленні способи аналітичного розрахунку з даними експериментів.

Запропонованими способами проведені розрахунки прогинів плит опертих по контуру плит та їх співставлення з отриманими результатами проведених експериментів. Потрібно лише пам'ятати про необхідність уведення приведених розрахункових параметрів з урахуванням властивостей матеріалів: бетону, сталевібробетону, арматури.

**Висновки.** Отримані дані дають змогу проаналізувати вплив на деформативність дослідних зразків конструктивних особливостей, наявності шарів різного матеріалу, різних властивостей важкого бетону, сталевібробетону і арматури.

Як засвідчують проведені дані (див. табл. 3), запропоновані розрахунки аналітичними способами, згідно діючих нормативних документів та дані експериментів не мають бажаної точності та потребують удосконалення методів розрахунку. Отримані окремі результати розрахунків свідчать про недостатню точність у порівнянні з дослідними даними і потребують уточнення початкових вихідних даних, шляхом вдосконалення врахування нелінійної роботи конструкцій.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. ДСТУ-Н Б В.2.6-78:2009. *Настанова з проектування та виготовлення сталевібробетонних конструкцій*. — К.: Мінбуд України — 2009. — 63 с.
2. ДСТУ В.2.6-98-2011. *Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування*. / Міністерство регіонального розвитку та будівництва України. — Київ, 2011.
3. Ключев С. В. *Экспериментальные исследования фибробетонных конструкций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2011. № 4. С. 71-74.
4. СП 52-101-03. *Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. Свод правил*. Москва. Госстрой России, С. 125, 2003.
5. Городецкий Д.А, Барабаш М.С. *Програмный комплекс ЛИРА-САПР 2013. Навчальний посібник*. — К. — М.: Електронне видання — 2013. — 376 с.

#### АННОТАЦИЯ

Статья посвящена методике моделирования работы плоских железобетонных, сталевібробетонных и двухслойных комбинированно-армированных плит опирающихся по контуру под действием равномерно-распределенной нагрузки. Изложенные результаты напряженно-деформированного состояния железобетонных плит, плит в сочетании со слоем сталевібробетона и сплошных сталевібробетонных плит. Расчет и сопоставление жесткости плит выполнено с помощью ПК "ЛИРА-САПР". В работе приведены результаты полученных данных и выполнено их сравнение с данными полученными в результате эксперимента и теоретических расчетов.

Ключевые слова: сталевібробетон, жесткость, прочность, плита.

#### ANNOTATION

Experimental and theoretical researches were conducted tensely deformed to the state one, and two-layer concrete, reinforce-concrete and steel fiber concrete slabs under the action of the transversal loading. The calculation and comparison of the stiffness deflection of slabs based on Lira-Sapr with experimental results.

Keywords: steel fiber concrete, stiffness, deflection, slab, fiber.