

КОНСТРУКЦІЇ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД

УДК 624.012.45 НЕЛІНІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МОНОЛІТНОГО РЕБРИСТОГО ПЕРЕКРИТТЯ СИЛОСУ НА ОСНОВІ ДОСЛІДНИХ ДАНИХ

В. М. Адаменко

Для монолітного ребристого перекриття силосу розроблено нелінійну розрахункову модель, яка враховує фактичні характеристики міцності бетону і арматури, площі перерізу арматури за зонами армування. Результати нелінійних розрахунків за кроками завантаження співставлені із дослідними даними прогинів монолітних балок перекриття, отриманими під час циклу завантаження – розвантаження існуючого силосу.

Ключові слова: монолітне ребристе перекриття, балка, нелінійний розрахунок, прогин.

Вступ. Для монолітних ребристих перекриттів силосів характерна робота при значних корисних навантаженнях, циклічності його прикладення, що призводить до появи залишкових деформацій арматури, активізації розвитку тривалих процесів із циклами завантаження – розвантаження силосів. Для таких споруд, враховуючи їх специфіку, можливе перевантаження перекриттів, особливо це актуально для випадків, коли при зведенні монолітних конструкцій мають місце порушення технології виконання робіт та застосування матеріалів невідповідної якості, що призводить до невідповідності фактичної несучої здатності перекриттів проектній.

Постановка проблеми. У даному випадку, постає завдання контролю технічного стану перекриттів у процесі циклів завантаження – розвантаження силосів. Для якісного контролю, із одного боку слід мати дослідні дані напружено – деформованого стану, а із іншого – адекватну чисельну модель, яка б із великим ступенем імовірності моделювала фактичний напружено – деформований стан перекриттів.

Відповідно до норм ДБН В.2.6-98:2009 п.5.4 [1], визначення зусиль у конструкціях, як правило, слід виконувати на основі нелінійних методів розрахунку, із застосуванням реальних діаграм деформування бетону й арматури. Проте, у багатьох випадках результати чисельних, у тому числі нелінійних, розрахунків значно різняться від відповідних дослідних значень, що особливо актуально для величин прогинів і ширини розкриття тріщин.

Таким чином, для можливості використання нелінійної розрахункової моделі у якості обґрунтованого засобу контролю технічного стану перекриттів у процесі циклів завантаження – розвантаження силосів, при різних рівнях навантаження, слід мати розроблену нелінійну модель, результати розрахунків за якою були б підтверджені дослідними даними на початкових циклах завантаження – розвантаження силосів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розрахунок монолітних перекриттів з урахуванням особливостей роботи залізобетону, досить ґрунтовно розроблений в теорії деформування

залізобетону з тріщинами М.І.Карпенка [2]. Ряд положень даної теорії включені в Руководство [3] та використовуються сучасними програмними комплексами для підбору армування плит.

Нелінійні методи розрахунків реалізуються у програмних комплексах, зокрема у ПК «ЛІРА-САПР 2013» [4], як послідовність пружних розв'язків, побудованих на певній деформаційній моделі (наприклад деформаційному методі ДБН [1]), і дозволяють врахувати реальні діаграми деформування бетону й арматури. Проте, через низку причин, у практичному проектуванні нелінійні розрахунки використовуються обмежено, переважно для оцінки напружено – деформованого стану конструкцій.

В питаннях вивчення міцності, деформативності та тріщиностійкості залізобетонних плит накопичено значний експериментальний матеріал, проте, вказані дослідження проведені переважно для фрагментів або невеликих за розмірами плит. Дослідні дані натурних досліджень конструкцій існуючих будівель і споруд, зокрема монолітних перекриттів, у науковій літературі представлені обмежено.

Цілі статті. Для монолітного ребристого перекриття силосу розробити нелінійну розрахункову модель, яка враховує фактичні характеристики міцності бетону і арматури, площі перерізу арматури за зонами армування. Результати нелінійних розрахунків за кроками завантаження співставити із дослідними даними прогинів монолітних балок перекриття, отриманими під час циклу завантаження – розвантаження існуючого силосу.

Виклад основного матеріалу. Дослідна частина роботи виконувалася на силосі для зберігання 500 тис. кН цукру – піску. Принципово, силос складається із підсилосного поверху, який виконано із монолітного залізобетону; власне силосу, який являє собою циліндричну сталеву несучу конструкцію із внутрішніми ребрами жорсткості; надсилосного бункеру; галереї подавання цукру; палевого фундаменту з ростверком.

Залізобетонне ребристе перекриття, є складовою частиною підсилосного поверху, і являє собою монолітну конструкцію діаметром 46 м, яка

складається із монолітної залізобетонної плити товщиною 430мм, обрамленої по зовнішньому контуру кільцевою балкою (Бк1) висотою 955мм, монолітних балок (Б1...Б9) висотою 770мм, розміщених по сітці колон із кроком 4,0х4,0м, перерізом 800х800, 1000х1000, 800х1000мм.

Монолітна залізобетонна плита, армована нижньою і верхньою основними сітками Ø22 А400С, крок 200мм, у двох напрямках; нижніми додатковими сітками Ø 12, 14, 18 А400С, крок 200мм, у двох напрямках; верхніми додатковими сітками Ø 25 А400С, крок 90мм, у двох напрямках. Поперечна арматура передбачена у вигляді каркасів із арматури Ø 12, 18 А400С, крок 200мм, які розміщені у прибалкових зонах перекриття.

Монолітні балки центральної частини перекриття (Б9), висотою 770мм і шириною 600мм, та монолітні балки крайніх чарунок перекриття (Б1...Б8), висотою 770мм і шириною 700мм, армовані прольотною арматурою Ø 20, 22, 25, 28 А400С, опорною арматурою Ø 20 А400С та поперечною арматурою Ø 18 А400С (крок 100 і 200мм).

Кільцева балка (Бк1), висотою 955мм, шириною 700мм, армована прольотною арматурою Ø 28 А400С, опорною арматурою Ø 25 А400С та поперечною арматурою Ø 14 А400С (крок 200мм). Зовнішня монолітна стіна товщиною 300мм, у місцях відсутності віконних та дверних прорізів, служить опорою для кільцевої балки (Бк1).

Відповідно до проектної документації, монолітне ребристе перекриття запроектоване із бетону класу С20/25. На основі додатково проведених обстежень, за допомогою приладу неруйнівного контролю ОНИКС-2.5, встановлено, що міцність бетону елементів перекриття відповідає класам бетону С16/20 і С20/25.

Дослідна частина роботи, враховуючи масштабність даної споруди і тривалість циклу завантаження – розвантаження силосу (близько 10-ти місяців), включала отримання експериментальних величин прогинів монолітних балок центральної частини перекриття (типу Б9) під час циклу завантаження – розвантаження силосу.

Вимірювання прогинів монолітних балок виконували за допомогою індикаторів годинникового типу (хід штоку 0..10мм). Індикатори фіксували за допомогою спеціальних жорстких стійок, які були закріплені від зміщення, та встановлювалися в нижній розтягнутій зоні, посередині балок.

Дослідження виконували для двох груп балок. Для 1-ї групи балок початок відліків індикаторів встановлено при завантаженні силосу 256680кН, для 2-ї групи балок – при завантаженні силосу 282350кН. За період циклу, силос було завантажено до 400120кН цукру – піску. Після

досягнення даного пікового навантаження, силос поступово розвантажувався, і на момент закінчення досліджень, завантаження силосу склало 185920кН. Сумарно, фіксацію відліків індикаторів виконували на протязі 6,5 місяців. Періодичність знімання показників – 5 разів на тиждень.

Нелінійне моделювання роботи монолітного перекриття виконуємо за допомогою ПК «ЛІРА-САПР 2013» [4], відповідно до вимог п.5.4ДБН В.2.6-98:2009 [1].

Вибір остаточної скінченно-елементної моделі виконувався на основі аналізу варіантів розрахункових схем, на стадіях лінійних та нелінійних розрахунків. Скінченно-елементна модель, в якій монолітні балки моделюються скінченними елементами стержнів, а монолітна плита – СЕ оболонки, як показав аналіз, призводить до суттєвих неточностей, як на стадії армування перекриття, так і на стадії нелінійних розрахунків, що зумовлено передусім накладенням жорсткостей, враховуючи геометричні розміри перерізів елементів.

У прийнятій скінченно-елементній моделі (рис.1) монолітна плита модельована фізично нелінійними скінченими елементами №241, 242 і 244 товщиною 430 мм, залізобетонні балки – фізично нелінійними СЕ №241, 242 і 244 товщиною 770 мм, кільцева балка – фізично нелінійними СЕ №210 висотою 955мм, колони – фізично нелінійними СЕ №210 перерізом 800х800, 1000х1000, 800х1000мм, висотою 2,1м, зовнішня монолітна стіна товщиною 300мм – фізично нелінійними СЕ №242 і 244.

Примикання монолітних балок до колон змодельоване за допомогою абсолютно жорстких тіл, розташованих у зонах перерізів колон. Геометричні розміри елементів перекриття сило- су прийняті за даними робочих проектів розділів АР та КЗ.

Реальні діаграми деформування бетону і арматури (закони нелінійного деформування матеріалів) закладені у вигляді експоненційних кривих, залежно від класів бетону і арматури елементів монолітного перекриття. Класи бетону призначені на основі додатково проведених обстежень, С16/20 або С20/25, залежно від виду елементів перекриття. Клас робочої арматури, відповідно до розділу робочого проекту КЗ, А400С.

При призначенні жорсткостей, для кожного із 13500 фізично нелінійних скінчених елементів розрахункової схеми, закладено відповідну величину площі поперечного перерізу арматури. Величини наявного армування та їх місцезорозташування по висоті перерізу прийнято у відповідності до розділу робочого проекту КЗ.

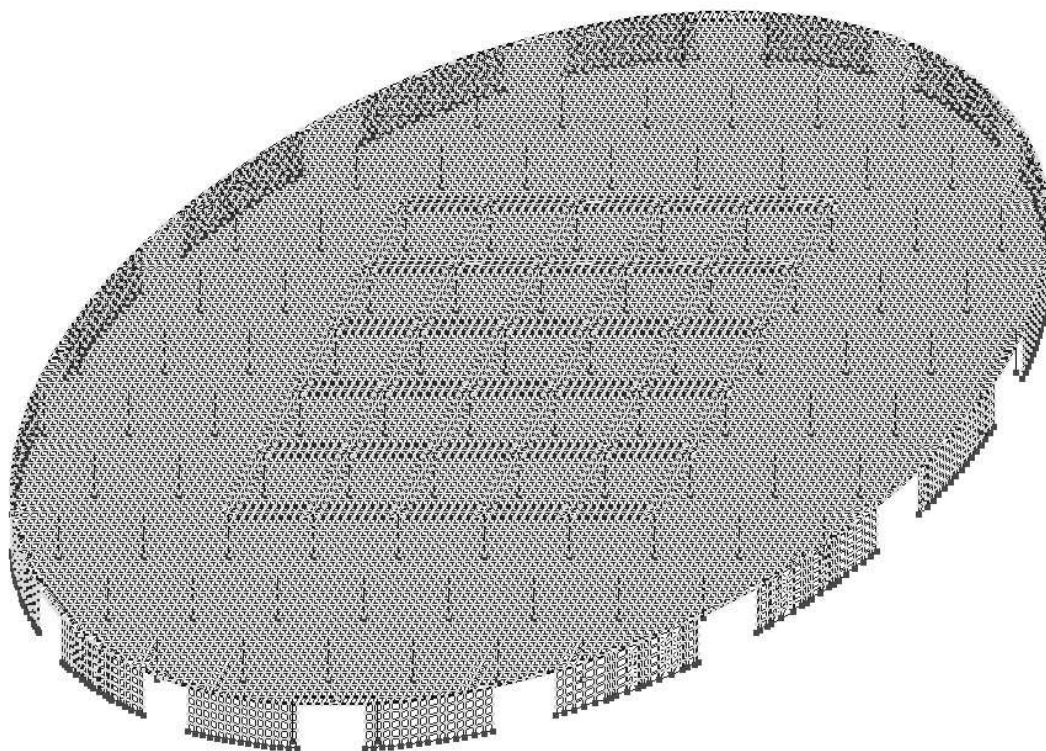


Рис.1 Фізично нелінійна скінченно-елементна розрахункова модель

Для монолітної залізобетонної плити виділено 7 різновидів армування, до 5 шарів арматури у кожному СЕ. Для монолітних залізобетонних балок виділено 13 різновидів армування, до 5 шарів арматури у кожному СЕ. Для контурної балки закладено 2 типи армування, до 5 шарів арматури у кожному СЕ. Для залізобетонних колон призначено 5 різновидів армування, до 18 шарів (точок) наявного армування у кожному СЕ. Для монолітних стін закладено 1 вид армування, 2 шари арматури у кожному СЕ.

Навантаження від монолітних балок, монолітної плити перекриття, кільцевої балки, враховані програмним комплексом за їх фактичним місцерозташуванням в автоматичному порядку, за питомою вагою залізобетону $g=25 \text{ кН/м}^3$ з урахуванням коефіцієнтів надійності за граничним $\gamma_{fm}=1,1$ та експлуатаційним $\gamma_{fe}=1,0$ розрахунковими навантаженнями.

Підрахунок навантажень на 1м.п. кільцевої балки та на 1м^2 монолітного перекриття приведено у табл.1 і 2.

Таблиця 1 Визначення навантажень на 1м.п. кільцевої балки

Назва навантаження	$P, \text{кН/м}$	γ_{fe}	γ_{ne}	$P_e, \text{кН/м}$	γ_{fm}	γ_{nm}	$P_m, \text{кН/м}$
Металеві конструкції силосу	56,40	1,0	0,975	54,99	1,05	1,1	65,14
Галерея	0,40	1,0	0,975	0,39	1,05	1,1	0,46
Утеплювач стін і покрівлі силосу	26,50	1,0	0,975	25,84	1,2	1,1	34,98
З/б кільцева балка, $g=25 \text{ кН/м}^3$	Враховано ПК «ЛІРА-САПР 2013» автоматично						
Разом:				81,22			100,58
Тертя цукру по стінам силосу	3,70	1,0	0,975	3,61	1,2	1,1	4,88
Сніг	16,25	0,49	0,975	7,76	1,0	1,1	17,88
Всього:				92,59			123,34

Таблиця 2 Визначення навантажень на 1м^2 монолітного перекриття

Назва навантаження	$P, \text{кН/м}^2$	γ_{fe}	γ_{ne}	$P_e, \text{кН/м}^2$	γ_{fm}	γ_{nm}	$P_m, \text{кН/м}^2$
З/б плита підсилення $t=0,2 \text{ м}$, $g=25 \text{ кН/м}^3$	5,00	1,0	0,975	4,88	1,1	1,1	6,05
Монолітна з/б плита $t=0,43 \text{ м}$, $g=25 \text{ кН/м}^3$	10,75	1,0	0,975	10,48	1,1	1,1	13,01
Монолітні балки перекриття	Враховано ПК «ЛІРА-САПР» автоматично						
Разом:				15,36			19,06
Цукор – пісок *	314,5	1,0	0,975	306,68	1,1	1,1	380,59
Всього:				322,03			399,65

Примітка: * - тут приведено середнє розподілене значення, в ПК «ЛІРА-САПР 2013» навантаження від цукру – піску задано з урахуванням конусу природного відкосу 33° .

При визначенні навантаження від цукру – піску, відповідно до нормативних документів,

прийняті його наступні характеристики: вологість 0,02-0,04%, температура 20-22°C, відносна вологість повітря у силосі 55-60%, характеристична насипна щільність сухого цукру 8,5 кН/м³, кут природного відкосу цукру – піску в силосі – 33°. Максимальна висота завантаження силосу по контуру складає 32м, а по центру – 46,6м, діаметр силосу – 45м.

Коефіцієнт надійності за відповідальністю γ_n приймаємо, як для будівлі класу відповідальності СС2 та конструкції категорії відповідальності А: $\gamma_{nm}=1,1$, $\gamma_{ne}=0,975$.

Навантаження від цукру – піску, при виконанні нелінійних розрахунків, прийнято виходячи із максимального завантаження силосу на даному циклі – 400120кН. Дане навантаження в ПК «ЛІРА-САПР 2013», задано з урахуванням конусу природного відкосу 33° (усереднювалося для кожної із чарунок розмірами 4х4м).

В ПК «ЛІРА-САПР 2013» [4], фізично

нелінійна задача вирішувалася покроковим методом. Було прийнято 100 розрахункових кроків із мінімальною кількістю ітерацій на кожному кроці – 300 (до досяжності збіжності результатів). Після кожного кроку навантаження отримані переміщення вузлів та зусилля в елементах.

У таблиці 3 приведені розрахункові нелінійні і дослідні прогини для 1-ї групи балок при початкових (256680кН), пікових (400120кН) і кінцевих після розвантаження (256680кН) навантаженнях. У таблиці 4 приведені розрахункові нелінійні і дослідні прогини для 2-ї групи балок при початкових (282350кН), пікових (400120кН) і кінцевих після розвантаження (282350кН) навантаженнях. Наведені розрахункові прогини балок обчислені, як різниця переміщень середніх вузлів балок і середніх значень переміщень вузлів балок, розташованих по граням колон (із обох сторін балок).

Таблиця 3 Розрахункові нелінійні та дослідні прогини 1-ї групи балок, мм

№ балки	Нелінійний розрахунок			Дослідні дані			
	Завантаження, кН		$\Delta = \frac{f_{400120} - f_{256680}}{f_{256680}}$	Завантаження силосу, кН			
	256 680	400 120		256 680	400 120	381 250.. 315 240	256 680
1	0,556	0,989	0,432	0	0,394	0,546	0,342
2	0,588	1,043	0,455	0	0,386	0,496	0,311
3	0,569	1,012	0,443	0	0,290	0,423	0,263
4	0,527	0,933	0,406	0	0,369	0,482	0,412
5	0,617	1,094	0,477	0	0,360	0,49	0,365
6	0,578	1,024	0,446	0	0,321	0,58	0,500
7	0,552	0,985	0,433	0	0,301	0,434	0,350
8	0,642	1,138	0,496	0	0,425	0,519	0,318
9	0,631	1,121	0,489	0	0,383	0,525	0,321

Таблиця 4 Розрахункові нелінійні та дослідні прогини 2-ї групи балок, мм

№ балки	Нелінійний розрахунок			Дослідні дані			
	Завантаження, кН		$\Delta = \frac{f_{400120} - f_{282350}}{f_{282350}}$	Завантаження силосу, кН			
	282 350	400 120		282 350	400 120	387 370.. 304 630	282 350
10	0,757	1,174	0,417	0	0,259	0,460	0,451
11	0,637	0,989	0,352	0	0,309	0,365	0,217
12	0,738	1,144	0,406	0	0,205	0,272	0,270
13	0,609	0,945	0,336	0	0,349	0,365	0,296
14	0,657	1,019	0,362	0	0,359	0,425	0,380
15	0,674	1,046	0,372	0	0,328	0,550	0,432
16	0,614	0,952	0,338	0	0,308	0,490	0,400

Виходячи із того, що дослідні прогини фактично являють собою прирости прогинів на кінцевій стадії завантаження, у яких за нульовий відлік прийнято стан монолітного перекриття при завантаженні силосу 256680кН і 282350кН (для 1-ї і 2-ї груп балок відповідно), у таблицях 3 і 4 приведені відповідні значення приростів розрахункових нелінійних прогинів.

Максимальні значення нелінійних прогинів монолітної плити і балок отримані для центральної частини силосу, що зумовлено специфікою його завантаження (з урахуванням конусу природного відкосу 33°). Індикатори для визначення дослідних прогинів балок були зосереджені також у центральній частині силосу,

на балках типу армування Б9.

При аналізі розрахункових нелінійних прогинів, при завантаженні силосу 400120кН, чітко вирізняються прогини балок центральної частини (№ 8, 9, 10, 12), які на 14% більші порівняно із прогинами інших балок. Для дослідних приростів прогинів такої закономірності не спостерігається, що імовірно пов'язано з розкидом жорсткісних характеристик балок.

Співставлення приростів нелінійних прогинів ($f_{400120} - f_{256680}$, табл.3) з приростами дослідних прогинів, для 1-ї групи балок, показує у середньому 10% перевищення дослідних приростів прогинів над розрахунковими. Аналогічне співставлення приростів нелінійних прогинів

($f_{400120} - f_{282350}$, табл.4) з приростами дослідних прогинів, для 2-ї групи балок, показує у середньому 14% перевищення дослідних приростів прогинів над розрахунковими. Загалом, сумарне перевищення дослідних приростів прогинів над розрахунковими складає 12%.

Тобто, отримано задовільну збіжність приростів дослідних прогинів монолітних балок ребристого перекриття силосу та відповідних приростів нелінійних розрахункових прогинів балок. Таким чином, результати чисельного моделювання, отримані на основі розробленої нелінійної розрахункової моделі монолітного ребристого перекриття силосу, яка враховує фактичні характеристики міцності бетону і арматури та наявне армування, задовільно узгоджуються із відповідними дослідними даними на початковому циклі завантаження – розвантаження силосу, а дана розрахункова модель може бути

застосована у якості обґрунтованого засобу контролю технічного стану перекриття силосу у процесі циклів завантаження – розвантаження.

Висновки:

1. Результати чисельного моделювання, отримані на основі розробленої нелінійної розрахункової моделі монолітного ребристого перекриття силосу, яка враховує фактичні характеристики міцності бетону і арматури та наявне армування, задовільно узгоджуються із відповідними дослідними даними на початковому циклі завантаження – розвантаження силосу.

2. Розроблена нелінійна розрахункова модель монолітного ребристого перекриття силосу може бути застосована у якості обґрунтованого засобу контролю технічного стану перекриття силосу у процесі циклів завантаження – розвантаження.

Список використаної літератури:

1. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – Київ: Мінрегіонбуд, 2011. – 71 с.
2. Карпенко Н.И. Теория деформирования железобетона с трещинами. – М.: Стройиздат, 1976. – 204 с.
3. Руководство по расчету статически неопределимых железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1975. – 192с.
4. Программный комплекс ЛИРА-САПР® 2013: Учебное пособие / Городецкий Д.А., Барабаш М.С. и др.; Под ред. Городецкого А.С. – К. –М.: Электронное издание, 2013, – 376 с.

Адаменко В.Н. НЕЛИНЕЙНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ МОНОЛИТНОГО РЕБРИСТОГО ПЕРЕКРЫТИЯ СИЛОСА НА ОСНОВЕ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

Для монолитного ребристого перекрытия силоса разработана нелинейная расчетная модель, которая учитывает фактические характеристики прочности бетона и арматуры, площади сечения арматуры по зонам армирования. Результаты нелинейных расчетов по шагам нагружения сопоставлены с опытными данными прогибов монолитных балок перекрытия, полученными во время цикла нагружения – разгрузки существующего силоса.

Ключевые слова: монолитное ребристое перекрытие, балка, нелинейный расчет, прогиб.

Adamenko V. NONLINEAR MODELING OF SILO SLAB-STRINGER SYSTEM BEHAVIOR ON THE BASIS OF EXPERIMENTAL DATA

Silo slab-stringer systems usually work under heavy pay load. For such constructions are necessary control technical states of the slab-stringer systems in time of loading unloading cycles. For qualitative control is necessary have a nonlinear design model which takes into account real data of concrete and steel strengths, area of reinforcement according to zones of armoring, results of nonlinear calculations which were verified by experimental data.

In the article considered the silo for 500000 kN of sugar. This silo is 46 meters in diameter and includes steel and reinforced concrete parts. Slab-stringer system consists of monolithic slab 430 mm in depth and monolithic beams 770 mm in depth. For the monolithic floor beams presented experimental data of deflections which were obtained in time of real silo loading unloading cycle.

For slab-stringer system of the silo created the nonlinear design model which takes into account real data of concrete and steel strengths, area of reinforcement according to zones of armoring. Nonlinear modeling behaviour of silo slab-stringer system performed with «LIRA-SAPR 2013» software. In accepted finite element design model monolithic slab was modeling by materially nonlinear finite elements numbers 241, 242 and 244, 430 mm in depth, monolithic beams were modeling by materially nonlinear finite elements numbers 241, 242 and 244, 770 mm in depth, monolithic hoop beam was modeling by materially nonlinear finite elements number 210, 955 mm in depth, monolithic columns were modeling by materially nonlinear finite elements number 210, monolithic outwalls were modeling by materially nonlinear finite elements numbers 242 and 244, 300 mm in depth. In «LIRA-SAPR 2013» software materially nonlinear task was solved by step-by-step method. After each step nonlinear monolithic floor beams deflections were obtained.

Results of nonlinear calculations on the loading steps were compared with the experimental data of monolithic floor beams deflections which were obtained in time of real silo loading unloading cycle.

Keywords: slab-stringer system, rib floor, beam, nonlinear calculation, deflection.

Дата надходження в редакцію: 15.10.14 р.

Рецензент: к.т.н., професор Душин В.В.