

УДК 624.012.45

Т.Н. Азізов, Н.Р. Вільданова
ДОСЛІДЖЕННЯ НДС ПРОСТОРОВИХ СИСТЕМ НА ПРИКЛАДІ МОСТОВОЇ
ПРОГОНОВОЇ БУДОВИ

Просторова робота залізобетонних конструкцій з урахуванням нелінійних процесів бетону досліджується у статті.

Ключові слова: просторова робота, крутильна жорсткість, деформації пластичності, діаграма зсуву бетону, чисте кручення.

Рис. 11. Табл. 3. Літ. 13.

Т.Н. Азізов, Н.Р. Вільданова
ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ МОСТОВОГО
ПРОЛЕТНОГО СООРУЖЕНИЯ

В статье исследуется пространственная работа железобетонных конструкций с учетом нелинейных процессов бетона.

Ключевые слова: пространственная работа, крутильная жесткость, деформации пластичности, диаграмма сдвига бетона, чистое кручение.

T.N. Azizov, N.R. Vildanova
RESEARCH STRAIN-STRESS STATE SPATIAL SYSTEMS ON THE EXAMPLE OF
THE BRIDGE SPAN STRUCTURES

The article investigates spatial work of reinforced concrete structures based on nonlinear processes concrete.

Keywords: spatial work, the torsional rigidity of reinforced, plastic deformation, concrete shear diagram, pure torsion.

Сучасна нормативна база передбачає розрахунок конструкцій за пружними жорсткісними характеристиками – а залізобетонні елементи не є суцільними пружними тілами, – тому завжди є ресурс для більш детального вивчення роботи матеріалів і конструкцій з метою підвищення ефективності їх роботи, виявлення економічних і технічних переваг. Але головна причина необхідності подібних досліджень полягає у тому, що в ряді випадків [1-3] неврахування просторової роботи конструкцій, нелінійних властивостей матеріалів, у тому числі при крученні (що обов'язково має місце при перерозподілі зусиль під час просторової роботи конструкції), призводить не просто до нераціонального використання матеріалів, але, що найважливіше, до невірних висновків щодо роботи конструкцій, розподілення внутрішніх зусиль у часі, характеру розвитку деформацій – і, внаслідок цього, до непередбачуваного руйнування конструкцій, утворення незапланованих тріщин тощо. Тому у даній роботі наведені результати чисельних досліджень просторової роботи мостової прогонової будови, що є продовженням досліджень Т.Н.Азізова [1] і його учнів.

Прийняті у найбільш значущих нормативних документах різних країн методи розрахунку залізобетонних конструкцій на кручення, істотно відрізняються між собою. Подібні розбіжності призводять до різних результатів розрахунку і вимагають детального дослідження даного процесу, вдосконалення існуючих методів розрахунку залізобетонних елементів як при дії чистого кручення, так і при комбінації інших зусиль з крученням. Вже відомі результати детального вивчення і порівняльного аналізу процесів, що мають місце при розвитку внутрішніх зусиль від згинальних моментів, поздовжніх і поперечних сил науковцями (В.С.Дорофєєвим, О.С.Залесовим, М.І.Карпенком, В.М.Кобринцем, Т.А.Мухамедієвим, В.М.Совгірою, Т.П.Чистовою, О.Ф.Яременком, Н.Н.Ячменевою, В.Е.Ящуком та ін.), інтенсивно проводяться дослідження міцнісних характеристик матеріалів при різного роду впливах, а також вивчення впливу згинальної жорсткості на НДС конструкцій. Розробляються і вдосконалюються дво- і трилінійні діаграми стиску бетону, в той же час кручення залишається значно менш дослідженим і ще менше освітленим у науковій літературі (вже не кажучи про навчальну, нормативну і науково-популярну). Тому роботи [4-5] присвячені дослідженню деформативних характеристик бетону при крученні і залежності напруження-деформації, їх результати і підтверджені залежності також використані і у даній роботі.

Стисло оглянемо методи та основні принципи і теоретичні передумови чисельних досліджень.

Просторова робота конструкцій. Системи, що деформуються просторово, є багаторазово статично невизначеними, що впливає на методики їх розрахунку і вимагає прийняття в інженерній практиці наближених методів [1]. Просторову роботу ребристих систем, якими є прольотні мостові будови, перекриття тощо, детально досліджували вітчизняні вчені А.І. Лантух-Лященко, Б.Е. Улицький, І.А. Тріфонов, Б.П. Назаренко, Л.Д. Проскуряков, П.Л. Пастернак, М.Е. Гібшман та ін.; але в розроблених методах [3] не враховується робота конструкції як єдиного цілого перерізу, внаслідок чого при малій кількості головних балок і різних значеннях їх жорсткості значення, отримані за цими методами, не можуть бути достовірними через неможливість рівномірно розподілити головні балки, які виконують роль пружної основи залізобетонної пластини, зімітованої прольотною системою. Навіть при рівній жорсткості ребер при нерівномірному завантаженні ребристої системи після утворення тріщин розрахунок вже не буде достовірним. Також сучасні реалії вимагають використання не емпіричних методів розрахунку хоча б внаслідок непродуктивності через значну різноманітність форм залізобетонних конструкцій, які неможливо оцінити через експерименти, а вимагають розробки методів розрахунку залізобетону на основі загальних законів будівельної механіки і єдиних розрахункових моделей.

Для врахування перерозподілу зусиль у залізобетонних елементах у [6] рекомендовано виконувати розрахунок за деформаційними моделями, оскільки це дозволяє зменшувати зусилля в зонах концентрації зусиль і більш рівномірно розподіляти арматуру в залізобетонних елементах. Автор [7] підкреслює, що розрахунок конструктивної системи в цілому не менше важливий, ніж розрахунок окремих залізобетонних елементів, оскільки також вимагає врахування особливостей залізобетону (непружні деформації, розвиток тріщин), – а ці правила не відображені в основних нормативних документах. Чисельні розрахунки методом МСЕ не лише містять ряд умовностей при моделюванні окремих ЗБЕ, але і є доволі трудомісткими і складними для повсякденних інженерних вишукувань, тому дослідники [1-3, 6-8, 11, 13] рекомендують застосування інших, спрощених, розрахункових моделей (наприклад, стрижньової [6] тощо). У [13] наголошується, що визначення внутрішніх зусиль в прогоновій будові недостатньо, оскільки у просторовому розрахунку необхідно знання внутрішніх зусиль в кожному із елементів прогонової будови, тому що проектується саме елементи прогонової будови (у мостових конструкціях це балки головні та допоміжні, діафрагми, плита проїзної частини). Тому **задачею просторового розрахунку** є визначення внутрішніх зусиль від рухомого навантаження в кожному із елементів прогонової будови.

Отже, просторовий розрахунок вимагає єдиного підходу, хоча вищезазначені методи переважно дають вирішення для відносно вузького кола задач. Крім того, вони не дозволяють враховувати або враховують частково жорсткісні параметри елементів з тріщинами [3], сумісну роботу полиць з ребрами та інші фактори, які іноді істотно впливають на просторову роботу прольотних будівель і перекриттів. Т.Н.Азізовим [1-3] розроблений метод розрахунку ребристих систем, окремими випадками якого є монолітні, збірні, збірно-монолітні суцільні і ребристі системи прольотних будов і перекриттів, враховуючи тріщиноутворення і різні схеми опирання і завантаження.

Сучасний інженер виконує розрахунок залізобетонних елементів спираючись на *лінійний закон розподілення деформацій за нормальним перерізом* і на діаграму деформування, за якою напруження в бетоні і арматурі пропорційні деформаціям (тобто стиснута зона бетону має трикутну епюру напружень) [8]. Але при просторовій роботі конструкції *деформації у перерізі не розподіляються лінійно*, що видно навіть з прийнятої відомої схеми зусиль у просторовому перерізі (рис. 1).

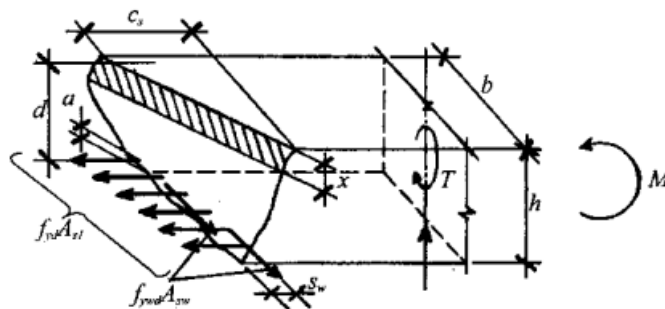


Рис. 1. Схема зусиль при розрахунку на міцність у просторовому перерізі залізобетонного елемента, що працює на крученні зі згином

В реальній роботі епюра крутних моментів розподіляється не лінійно, як прийнято для спрощення у практичних розрахунках: вона «насичується» (рис.1), оскільки характер деформації не лише залежить від природи матеріалу, але і впливає на зміну його механічних характеристик, а отже, і на характер роботи і деформування тіла у подальшому. За допомогою МСЕ, за методикою Б.Е.Улицького [1,3] можливо отримати більш точні значення, які необхідні для детального дослідження крутильної жорсткості елемента перехресно-ребристої системи. Але більш простим є наближений метод Т.Н.Азізова [1-3].

На рис.2 наведено реальне перерозподілення епюри крутних моментів; отримані за допомогою МСЕ (ПК «Лира») результати чисельних розрахунків, що підтверджують даний процес, наведені далі.

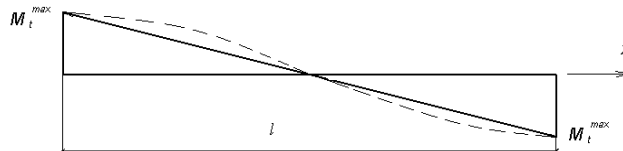


Рис. 2. Епюра крутильних моментів за довжиною плити [2]: штрихова лінія показує реальне розподілення, безперервна – наближені значення (лінійну апроксимацію)

При дослідженні напружено-деформованого стану статично невизначених конструкцій, якими є перекриття і мости, що деформуються просторово, необхідним є як процес внутрішніх ітерацій – для уточнення жорсткостей, – так і зовнішніх, для уточнення за даними жорсткостями закону розподілення зусиль. Сутність поєднання процесів внутрішніх і зовнішніх ітерацій [2] полягає в наступному. На нульовій ітерації визначаються внутрішні зусилля, після чого за допомогою внутрішнього процесу ітерацій уточнюємо жорсткості; далі за новим законом змінення жорсткостей повторюємо статичний розрахунок системи, уточнюючи цим епюри розподілення зусиль вздовж осей системи (перше наближення), і потім за зусиллями першої ітерації знову уточнюємо розрахункові жорсткості, знаходячи за ними епюри другого наближення і т.д. до збіжності. У подібних ітераційних розрахунках при нульовій ітерації у перерізах з максимальними зусиллями в першому наближенні приймається найменша жорсткість, тому у другому наближенні співвідношення жорсткостей різко змінюється і розрахункові зусилля значно збільшуються. Таким чином можна порівняти дані обчислення без урахування змінення крутильної жорсткості внаслідок перерозподілу зусиль у часі з розрахунком за вищенаведеною методикою.

У [7] зазначено, що не лише для перевірки прогинів згинаних ЗБЕ і для оцінки стійкості стиснуто-згинаних елементів, але і для врахування перерозподілу зусиль у залізобетонних елементах доцільно проводити *прямий деформативний розрахунок*. Це дозволяє зменшувати зусилля в зонах їх концентрації і більш рівномірно розподіляти арматуру в залізобетонних елементах.

Деформаційна модель. Дослідниками різних країн вже запропоновано робочі методики розрахунку ЗБК за деформаційними моделями при одно- і двовісному НДС при дії згинальних і крутильних моментів, поздовжніх сил [6]. Ці моделі містять повні діаграми деформування матеріалів, взаємні залежності і умови роботи бетону і арматури, базуючись на гіпотезі плоских перерізів, внаслідок чого не відображають повною мірою реальний фізичний характер деформування перерізів елементів з тріщинами (тріщини враховуються шляхом визначення стиснутої зони бетону над тріщиною і розтягнутої арматури у тріщині); однак результати обчислень за таким розрахунковим апаратом наближуються до експериментальних даних.

Тому діаграму зсуву бетону, що встановлює залежність між напруженнями і кутовими деформаціями бетону при короткочасній дії одноразово прикладеного навантаження до граничних руйнуючих значень, доцільно також розглядати і використовувати як узагальнену характеристику механічних властивостей бетону, подібно діаграмам стиску-розтягу (рис. 3).

На сьогодні методики розрахунку характеристик жорсткості елементів з урахуванням тріщин і непружних деформацій не розроблені в достатній мірі для стабільного впровадження в інженерну практику [7], внаслідок чого в розрахунку приймаються зниженні характеристики згинальної жорсткості залізобетонних елементів через визначальний вплив на загальну деформативність конструктивної схеми і її елементів. Зміну ж крутильної жорсткості [1-3] не враховують взагалі.

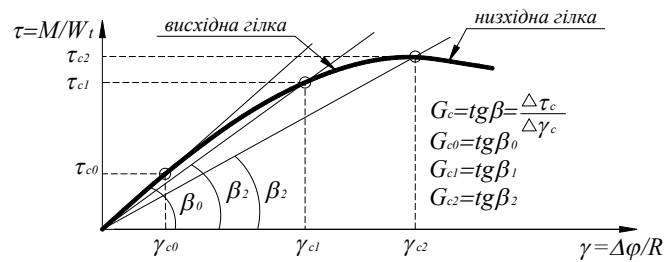


Рис. 3. Загальний вигляд деформування бетону при чистому короткочасному крученні

Тому метою роботи є дослідження впливу крутильної жорсткості на перерозподіл зусиль у прогоновій мостовій будові.

Новизна роботи полягає в дослідженні безпосереднього впливу зміни модуля зсуву бетону з урахуванням деформацій пластичності як складової крутильної жорсткості конструкцій на просторову роботу, що дозволить використовувати більш точну діаграму роботи бетону при зсуві у практичних розрахунках, підвищуючи точність і економічність проектів.

Чисельний розрахунок прогонової мостової будови. При просторовому розрахунку прогонової будови моста задача визначення зусиль в балкових прогонових будовах вирішується сьогодні за допомогою МСЕ як універсальної точної моделі, проте інша перевірена, класична, значно простіша і швидша у використанні, хоч і менш точна модель продовжує застосовуватись. Застосування коефіцієнту поперечного розподілу дозволяє вирішити задачу просторового розрахунку моста. Коефіцієнт поперечного розподілу є безрозмірною величиною, що показує, яка частина рухомого навантаження, встановленого на прогоновій будові, приходить на i елемент (балку) поперечного перерізу [13]. Причому, для визначення КІР існує ряд методів, які варіюються переважно засобами віднаходження ординат ліній впливу різної складності і точності.

Лінії впливу нерозрізних конструкцій будують за правилами будівельної механіки різними методами [2, 9-13] – скінчених елементів при точних розрахунках, визначаючи ординати за спеціальними таблицями [10], за допомогою програмних комплексів [11] для врахування нелінійних явищ в системі і за спрощеними моделями методами важеля, сил, позацентрового стиску тощо.

Для підтвердження важливості врахування реальної крутильної жорсткості шляхом застосування актуального модуля зсуву, в залежності від величини діючого у перерізі внутрішнього зусилля, як приклад, наведемо результати чисельних експериментів прогонової будови за допомогою ПК «Лира».

У даному випадку розрахунок проведено у пружній постановці, без урахування утворення тріщин. При цьому у процесі зовнішніх ітерацій завдяки розрахункам у ПК «Лира» ми отримували значення крутильних моментів, за деформаційними залежностями [14] обчислювали значення модуля зсуву і за значеннями нових жорсткостей розраховували систему у ПК «Лира», і так до збіжності (відносна похибка між значеннями поточної і попередньої ітерацій δ не перевищувала 10^{-7} %).

Розглянуто перехресно-ребристу систему: балки розділені на 20 кінцевих елементів за довжиною, плити – на 5; зміну величин жорсткостей і моментів ми прослідкували за довжиною балок. Вихідні дані: ребра перерізом 25x25см, плити – 15x5см, клас бетону С16/20; довжина балок складає 3м, прольот – 1м. Схема прольотної будови наведена на рис.4. Рівномірно розподілене навантаження $q=5\text{кН/см}$ було прикладене до кожної з трьох балок по чергові (до крайньої – 1-ї або 5-ї, до 2-ї або 4-ї і до 3-ї – центральної).

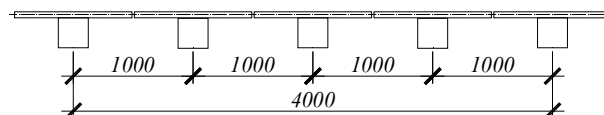


Рис. 4. Схема мостової прогонової будови

Максимальні крутильні моменти розвиваються у крайніх елементах; епюри в елементах балки однієї половини і іншої є зворотно симетричними, тому наводимо значення внутрішніх зусиль для елементів однієї половини балки. Епюри перерозподілу внутрішніх зусиль M_t (кНсм) при врахуванні змінення модуля зсуву бетону як складової крутильної жорсткості K_E при

розрахунку МКЕ у пружній постановці (у ПК «Лира» без утворення тріщин) представлені на рис. 5.

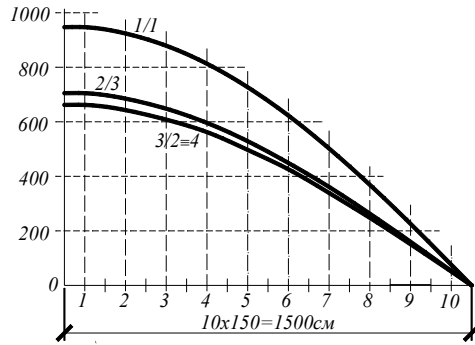


Рис. 5. Порівняння максимальних епюр Mt при 3-х випадках навантаження (для половини ребра за довжиною)

На рис. 5 у чисельнику позначено номер навантаженої балки (1-ша, 2-га або 3-тя), у знаменнику – номер балки, для якої побудовано епюру.

Відносна похибка між значеннями модуля зсуву i , відповідно, крутильної жорсткості (оскільки розрахунок проведено як пружний) досягала 8-13% у різних випадках навантаження. При завантаженні крайньої балки рівномірно розподіленим навантаженням у крайніх елементах стрижня спостерігався максимальний перерозподіл зусиль 13.06%.

У нижченаведених результатах розрахунку КІР зазначеної прогонової будови ординати ліній впливу визначено за допомогою ПК «Лира», КІР – як відношення діючого в кожній балці зусилля до максимально можливого у даному елементі.

Таблиця 1. Навантаження на 1-шу балку

№ балки	1	2	3	4	5
f_{max}	-6.096	-6.096	-6.096	-6.096	-6.096
$y(i)$	-3.952	-1.664	-0.432	-0.062	0.014
КІР	0.64832	0.27295	0.07091	0.0102	-0.0024

При навантаженні на першу балку маємо (табл. 1, рис. 6-7):

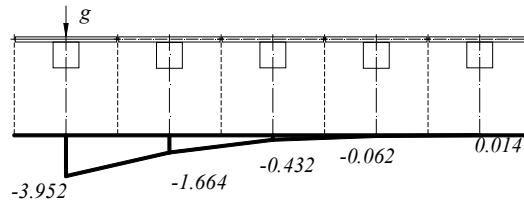


Рис. 6. Лінія впливу при навантаженні першої балки

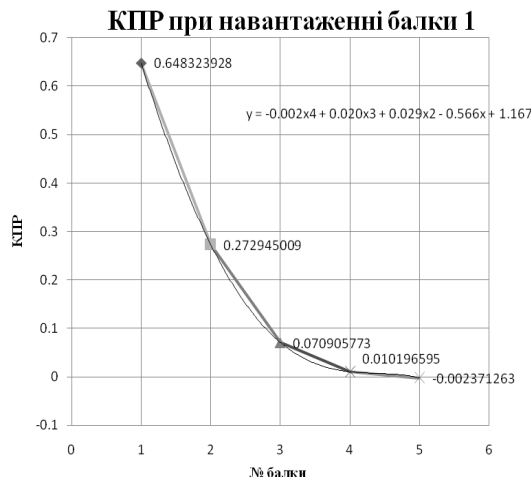


Рис. 7. Розподілення КІР при навантаженні першої балки

Як видно з рис. 1, наведена методика розрахунку дозволяє достатньо точно відобразити нелінійний характер перерозподілу зусиль у ребрах нерозрізної прогонової будови: нелінійне рівняння кривої четвертого ступеня збігається з розрахунковими значеннями.

При навантаженні на другу балку спостерігаємо (табл. 2, рис. 8-9):

Таблиця 2. Навантаження на 2-гу балку

№ балки	1	2	3	4	5
f_{max}	-6.096	-6.096	-6.096	-6.096	-6.096
$y(i)$	-1.664	-2.595	-1.368	-0.407	-0.062
КІР	0.27294	0.42574	0.22433	0.06679	0.0102

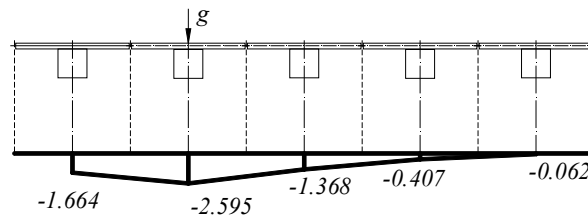


Рис. 8. Лінія впливу при навантаженні другої балки

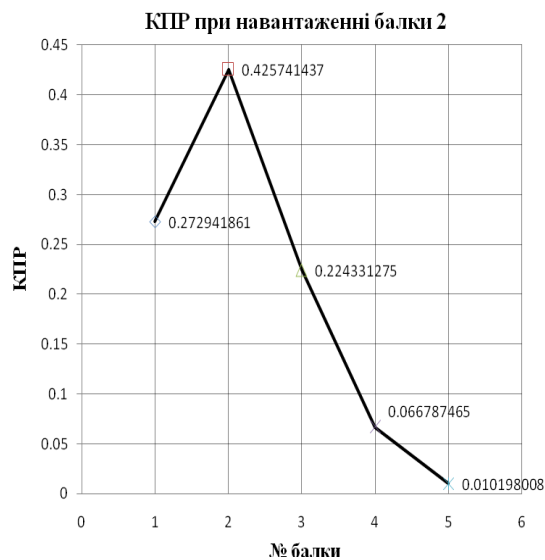


Рис. 9. Розподілення КІР при навантаженні другої балки

КІР при навантаженні на третю балку (табл. 3, рис. 10-11):

Таблиця 3. Навантаження на 3-тю балку

№ балки	1	2	3	4	5
f_{max}	-6.096	-6.096	-6.096	-6.096	-6.096
$y(i)$	-0.432	-1.368	-2.497	-1.368	-0.432
КІР	0.07091	0.22433	0.40953	0.22433	0.07091

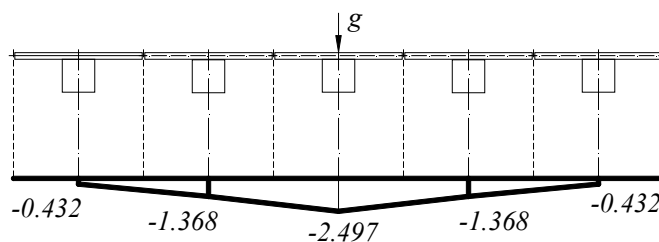


Рис. 10. Лінія впливу при навантаженні третьої балки

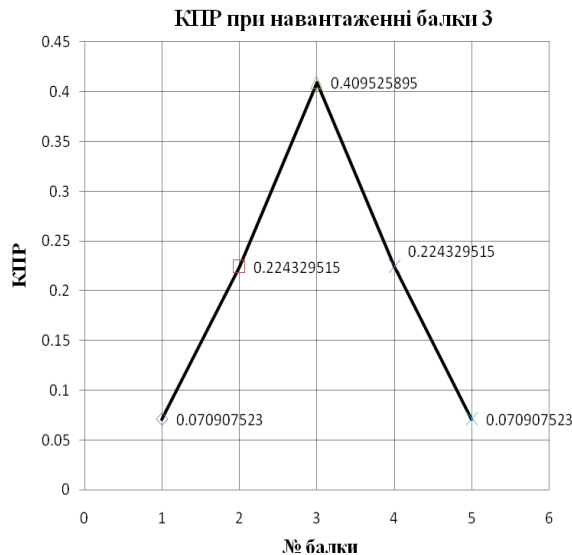


Рис. 11. Розподілення КІР при навантаженні третьої балки

Висновки і перспективи досліджень.

1. Перерозподіл зусиль в системах, що деформуються просторово, залежить від крутильної жорсткості, яка недостатньо досліджена при наявності в елементах нормальних тріщин і ігнорується зазначення нею впливу від зміни модуля зсуву на різних етапах роботи конструкції, що накладає відбиток на нормативні розрахунки і моделі роботи залізобетону, закладені у програмні комплекси.

2. Застосування деформаційних моделей підвищує точність розрахунків, але значно збільшує і трудомісткість, внаслідок чого необхідно розвивати і спрощені методики для застосування в інженерній практиці.

3. Розглянута методика відрізняється точністю і легкістю, що дозволяє вирішувати задачу просторового розрахунку конструкції завдяки нескладному визначенню внутрішніх зусиль від навантаження в кожному з елементів прогонової будови, а також більш детально досліджувати роботу матеріалу і враховувати при проектуванні вплив модуля зсуву бетону в залежності від деформацій пластичності як складової крутильної жорсткості ЗБЕ.

4. Доведена важливість прийняття до уваги при дослідженні НДС конструкції не лише змінення моменту інерції як складової крутильної жорсткості, але і змінювання модуля зсуву матеріалів конструкції в залежності від перерозподілу внутрішніх зусиль в елементах за довжиною балки.

1. Азизов Т.Н. Теория пространственной работы перекрытий. – К: Науковий світ, 2001. – 276 с.
2. Азизов Т.Н. Расчет железобетонных перекрытий и пролётных строений мостов. – Одеса: ОГАСА, 2009. – 192 с.
3. Азизов Т.Н. Пространственный расчёт железобетонных пролётных строений мостов// Дороги і мости. Збірник наукових праць. Вип. 7. – К.: ДерждорНДІ, 2007. – С. 8-21.
4. Азизов Т.Н. Экспериментальне дослідження діаграми зсуву бетону// Азизов Т.Н., Вільданова Н.Р. – Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. 50 – Одеса: ОДАБА, 2013. – С. 3-9.
5. Азизов Т.Н. Экспериментальное определение нелинейной диаграммы сдвига бетона// Азизов Т.Н., Вільданова Н.Р. – Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. 46 – Одеса: ОДАБА, 2012. – С. 3-8.
6. Залесов А.С., Мухамедиев Т.А. Настоящее и будущее расчета железобетона// Бетон и железобетон. – 2005. – №4. – С. 3–6.
7. Залесов А.С. Краткие заметки о расчете железобетонных конструкций монолитных зданий. – М., 2007. – 63 с.
8. Залесов А.С. Краткие заметки о расчете железобетонных конструкций на действие изгибающих моментов и продольных сил. – М., 2008. – 17 с.
9. Кваша В.Г. Розрахунок головної балки розрізної сталезалізобетонної прольотної будови автодорожнього моста: Методичний посібник. – Львів: Видавництво Національного ун-ту «Львівська політехніка», 2003. – 33 с.
10. Лившиц Я.Д., Онищенко М.М., Шкуратовский А.А. Примеры расчёта железобетонных мостов. – К.: Вища школа, 1986. – 263 с.
11. Лучко Й.Й., Коваль П.М., Корнієв М.М., Лантух-Лященко А.І., Харкаліс М.Р. Мости: конструкції та надійність. – Львів: Каменяр, 2005. – 989 с.
12. Розрахунок і проектування мостів. В 2-х т. Навчальний посібник/ За ред. А.Лантуха-Лященка. – К.: НТУ, 2007. – Т.1. – 337 с.
13. Яременко О.Ф., Школа Ю.О. Несуча здатність та деформативність залізобетонних стержневих елементів в складному напруженому стані. – Одеса: ОДАБА, 2010. – 136 с.

Стаття надійшла до редакції 24.09.2013.