

ПОЛТАВСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

ГАРНИЦЬКИЙ Юрій Васильович



РОБОТА ТА НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ  
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОЛОН ЗА КОСОГО ПОЗАЦЕНТРОВОГО  
СТИСКУ

Спеціальність 05.23.01 - Будівельні конструкції,  
будівлі та споруди

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

ПОЛТАВА 1995 р.



00778219 (Y)

Робота виконана  
Українського інституту

- Науковий керівник - кандидат технічних наук,  
доцент В. І. Бабич
- Офіційні опоненти - доктор технічних наук,  
професор Пахомов В. О.  
- кандидат технічних наук,  
доцент Битько М. М.
- Ведуча організація - Рівнеагропроект


Захист дисертації відбудеться "13" 07 1995 р.  
о 10 годині на засіданні спеціалізованої ради Д 05.02.01  
при Полтавському технічному університеті за адресою:  
314601, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці універ-  
ситету.

Відгуки на автореферат просимо надсилати на ім'я вчено-  
го секретаря у ... шляхах, завірені печатком.

Автореферат розіслано "13" 06 1995 р.

Вчений секретар  
спеціалізовані ради

  
В. О. Бондар

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН України

Проблема зниження матеріалоемкості лишається однією з найактуальніших у практиці будівництва. Одним із резервів економії арматури для залізобетонних конструкцій є її попереднє напруження. Експериментально доведено, що попередній обтиск бетону, особливо нерівномірний, суттєво підвищує несучу здатність гнучких колон за позакентрового стиску в одній площині. Однак для стовпів малої та середньої гнучкості ефективність попереднього напруження буває різною, тому що залежить від багатьох факторів. Відомі результати досліджень цих стовпів іноді протирічають одні одним. Оскільки використання високоміцної арматури без попереднього напруження також часто буває ефективним, то виникає проблема пошуку механізму раціонального застосування різних типів армування стиснених елементів звичайною та напруженою арматурою.

Значна частина колон промислових та цивільних будівель, опори спеціальних та підротехнічних споруд, стовпи естакад, мостів та рамних фундаментів працюють як косостиснені. Однак вплив попереднього напруження на роботу таких елементів досліджений слабо, лише за рівномірного обтиску бетону та за дії короткочасного навантаження. Недостатня увага приділена впливу напруження на жорсткість стовпів, що для гнучких елементів багато в чому визначає їх несучу здатність.

Актуальним лишається завдання розробки універсальної методики розрахунку косостиснених стержнів з нерівномірним попереднім обтиском бетону, яку можна буде застосовувати для всіх типів стиснених елементів. Справді, проведені останніми роками дослідження конкретизували положення СНиП 2.03.01-84<sup>а</sup> і дозволили успішно вести розрахунок багатьох типів попередньо напружених та косостиснених стержнів. Але вони не врахо-

вуть спільної дії усіх основних факторів - гнучкості стержня, тривалості дії навантаження, параметрів попереднього обтиску бетону. Окрім того, вказані методики не завжди раціональні з точки зору їх математичної реалізації.

Таким чином, експериментальне вивчення напружено-деформованого стану попередньо напружених елементів за позацентрового стиску у двох площинах та вдосконалення методики їх розрахунку залишається актуальним завданням.

Метою роботи є порівняння ефективності різних типів армування стиснених стояків, встановлення меж раціонального використання кожного з них та розробка практичних рекомендацій до розрахунку будь-яких колон прямокутного перерізу за дії короткочасного та тривалого навантаження на основі дослідження напружено-деформованого стану косостиснених колон з нерівномірним попереднім обтиском бетону.

Автор захищає:

- методику використання характерних точок діаграми " $\sigma_{bc} - \epsilon_{bc}$ " при розрахунку несучої здатності стиснених елементів;
- пропозиції до врахування впливу попереднього напруження на жорсткість гнучких стиснених стояків;
- єдині формули, що зв'язують деякі параметри стисненої зони бетону ( $A_b, \text{tg } \theta, \xi_1$ ) в косостисненому елементі з її координатами, незалежно від положення нейтральної лінії;
- методику розрахунку стиснених стояків та спосіб її математичної реалізації на основі ітераційного методу Ньютонa;
- методику та результати експериментальних досліджень косостиснених стояків з нерівномірним попереднім обтиском;
- пропозиції до оцінки ефективності попереднього напруження та визначення оптимальних меж використання різних типів армування стиснених конструкцій на стадії проектування;

- практичні рекомендації до розрахунку стиснених елементів за дії короткочасного та тривалого навантаження.

Наукова новизна праці є у тому, що:

- доведено, що нерівномірний попередній обтиск підсилює несучу здатність коротких (за великих ексцентриситетів) та гнучких косостиснених колон на 21...35% навіть тоді, коли рівномірний обтиск малоефективний;

- отримано комплекс експериментальних даних про дійсний напружено-деформований стан косостиснених стоеків з нерівномірним по перерізу попереднім обтиском бетону за дії короткочасного та тривалого навантаження;

- вперше досліджено вплив нерівномірного попереднього обтиску бетону на жорсткість гнучких косостиснених стержнів;

- розроблено методику розрахунку стиснених елементів прямокутного перерізу, яка одночасно враховує їх гнучкість, тривалість дії навантаження, тип попереднього обтиску бетону (рівномірний, нерівномірний, відсутній), напружений стан (позацентричний стиск в одній або двох площинах), вид бетону.

Практичне значення роботи полягає в тому, що для косостиснених колон теоретично та експериментально підтверджено ефективність використання нерівномірного попереднього обтиску бетону. Впровадження таких елементів дозволить зменшити витрату арматури та знизити собівартість конструкцій. За результатами досліджень можуть бути створені нові ефективні види армування стиснених елементів.

Розроблена методика розрахунку стиснених елементів доповнює і розвиває існуючі методи проектування косостиснених стоеків і є за своєю суттю оптимізаційною. Вона дозволяє розширити область раціонального проектування будівельних конструкцій, зменшити їх матеріаломісткість.

Реалізація праці. Результати досліджень використані інститутом "Рівнеагропроект" при варіантному проектуванні залізобетонних конструкцій Рокитнівського хлібозаводу, цегельного заводу в с. Лісопіль та інших об'єктів. Опубліковані також рекомендації по розрахунку поперечно напружених косостиснених елементів, які можуть бути використані для оптимального проектування залізобетонних конструкцій.

Публікації. Всього за темою дисертації опубліковано 10 друкованих праць.

Апробація роботи. Основні положення дисертації обговорювались на Республіканській науково-технічній конференції в м. Полтава (1989р.), на Всесоюзній конференції молодих вчених та спеціалістів в м. Кобулеті (1989р.), та на трьох регіональних науково-практичних конференціях, що проходили в м. Рівне у 1988 - 1993 роках.

Обсяг праці. Робота складається із вступу, п'яти глав, загальних висновків, додатків та списку літературних джерел з 118 найменувань. Повний об'єм становить 186 сторінок, які включають 18 таблиць та 29 ілюстрацій.

#### КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми роботи, викладені її мета, наукова новизна та практична цінність.

В першій главі дисертації проаналізовані праці вітчизняних та зарубіжних вчених, присвячені теоретичному та експериментальному вивченню роботи косостиснених колон і стиснених елементів з попереднім напруженням арматури.

Вперше на стадії руйнування розрахунок косостиснених стоеків зустрічається в роботах А. Аас-Якобсена, С. І. Глазера, О. Танга, О. М. Тоцького, Р. Фалонга. Було вирішено ряд частко-

вих питань, проведені перші експериментальні дослідження.

Найбільш суттєвий внесок у вивчення роботи стиснених елементів за складних деформацій внесли М.С.Торяник та його учні і послідовники В.І.Бабич, П.Ф.Вахненко, В.І.Клименко, О.В.Редкін, В.М.Ромашко, Ю.М.Руденко, С.Д.Семенюк та інші. Ряд важливих питань вирішено в роботах В.М.Байкова, В.Я.Бачинського, В.М.Беспалова, С.В.Горбатова, Я.Д.Лівшиця, В.М.Назаренка та інших вчених НДІБК, КАДІ, МІБЗ. На сьогодні проведена значна кількість експериментальних досліджень звичайних стоеків різної гнучкості з важкого та легкого бетону. Попередньо напружені колони вивчені набагато менше. Випробувались лише стержні з рівномірним попереднім обтиском бетону і тільки за короткочасної дії навантаження.

Експериментальні дослідження центрально та позацентрово стиснених в одній площині напружених стоеків проводились досить широко. Слід відмітити публікації А.Г.Азізова, Р.М.Амрахова, В.М.Бойцова, Г.Н.Головнина, А.П.Ковальського, В.І.Копилової, А.А.Кудрявцева, Д.Р.Маїляна, І.І.Набокова, Є.В.Оршанського, Т.М.Пецоляда, І.В.Подмостко, А.А.Светова, В.В.Сімейка, Н.Ж.Сухайля та ін. Аналізуючи їх роботи, приходимо до висновку, що для досить гнучких колон попереднє напруження підвищує їх несучу здатність за рахунок збільшення жорсткості. Ступінь збільшення несучої здатності залежить від параметрів обтиску та ексцентриситету. Нерівномірний обтиск бетону, як правило, більш ефективний, ніж рівномірний. Для відносно коротких стоеків отримані суперечливі дані, хоча більшість дослідників вказує на негативний результат. Отже, ефективність попереднього напруження в стиснених колонках визначається їх гнучкістю, ексцентриситетом навантаження, рівнем та характером попереднього обтиску бетону.

До розрахунку косостиснених стояків існує два підходи. Перший базується на передумовах методу граничних станів, викладених у СНиП 2.03.01-84<sup>\*</sup>. Він конкретизований та доповнений рядом досліджень, проведених, в основному, у Полтавському інженерно-будівельному інституті та в УІІВГ. Так, методика, розроблена П. Ф. Вахненком, поширюється на елементи практично будь-яких перерізів. Для реалізації на ЕОМ зручний алгоритм В. М. Ромашка, який дозволяє розраховувати звичайні колони прямокутного перерізу з важкого та легкого бетону. Косостиснені стояки з рівномірним обтиском розглядаються в роботах О. В. Редкіна. Але питання розрахунку нерівно обтиснених елементів, а також напружених зразків за дії тривалого навантаження поки що не розглядались.

Інший підхід до розрахунку полягає у використанні реальних чи близьких до них діаграм деформування матеріалів. Назвемо тут роботи В. М. Байкова, А. М. Бамбури, О. Б. Голишева, С. В. Горбатова, О. С. Залесова, О. Ф. Ільїна та ін. Розрахунок міцності, тріщиностійкості та деформативності тут виконується за єдиною методикою. Але значного зростання точності обчислення власне несучої здатності стояка при цьому не досягнуто, хоча математична реалізація таких методик дуже складна навіть для випадку простого позацентрального стиску. Основною їх перевагою є те, що роботу конструкції можна прослідкувати на будь-якій стадії від завантаження до руйнування.

Розвиток обох напрямів розрахунку можливий через взаємозбагачення. У методиці норм варто ширше використовувати характерні особливості діаграм деформування матеріалів та розрахунок за деформованою схемою. певні кроки у цьому напрямі зроблені С. І. Аржановським, П. Ф. Вахненком, Д. Р. Маїтїном, О. В. Редкіним. З іншого боку, дещо спрощене описання

кривої " $\sigma_b - \epsilon_b$ " за допомогою гіперболи (Л.П. Макаренко, Г.О. Фенко), або трапеції (О.Б. Голишев) дозволяє зменшити математичні труднощі при реалізації методик другого типу.

Таким чином, основними завданнями досліджень були:

- розробка універсальної методики розрахунку всіх стиснених елементів прямокутного перерізу, у тому числі з нерівномірним попереднім обтиском бетону, і перевірка її коректності;
- експериментальне дослідження ефективності різних типів напружених стояків, у тому числі з нерівномірним обтиском, вивчення особливостей їх напружено-деформованого стану за коного позацентрового стиску;
- встановлення меж ефективного використання різних типів напружених конструкцій та розробка рекомендацій по оптимальному проектуванню стиснених елементів.

У другій главі дисертації виконані теоретичні дослідження несучої здатності попередньо напружених косостиснених стояків. На основі передумов так званого загального випадку розрахунку (п. 3.28 СНиП 2.03.01-84<sup>к</sup>) розроблена єдина методика розрахунку всіх стиснених елементів прямокутного перерізу.

При застосуванні у стиснених елементах високоміцної арматури виникає проблема обчислення її розрахункового опору на стиск. Прийнятий в нормах  $R_{sc,u} = 400$  МПа відповідає значенню  $\epsilon_{bc,r} = 0,002$  (рис. 1), тобто не враховується низпадаюча вітка АВ діаграми " $\sigma_b - \epsilon_b$ ". За даними багатьох досліджень крайові деформації бетону при руйнуванні залізобетонного зразка, як правило, значно більші  $\epsilon_{bc,r}$ . Логічно допустити<sup>1</sup>, що руйнування конструкції за короткочасного наванта-

<sup>1</sup> Байков В.Н., Горбатов С.В. Определение предельного состояния внецентренно сжатых элементов по неупругим зависимостям "напряжения - деформации" бетона и арматуры // Бетон и железобетон. - 1985. - № 6. - С. 13-14.



ження відбувається в тій точці кривої АВ, яка відповідає найбільш вигідним умовам внутрішньої рівноваги. Тобто, при  $\epsilon_b \geq \epsilon_{bc, R}$  з ростом крайової деформації бетону несуча здатність перерізу може спочатку зростати, а потім падає. Точка екстремуму відповідає фізичному руйнуванню стояка.

Низпадавчу вітку можна трактувати, як криву максимально допустимих деформацій бетону, при яких не відбувається його руйнування на даному рівні однократного навантаження. В згаданій роботі В. Н. Байкова та С. В. Горбатова вона продовжена до перетину з віссю деформацій. Частіше, однак, вважають, що низпадавча вітка закінчується на рівні навантаження  $\sigma_b = (0,8 \dots 0,9) R_b$ . Відмітимо, що приблизно цей рівень чисельно дорівнює рівню тривалої міцності бетону.

За результатами випробувань на повзучість можна побудувати графік " $\sigma_{bc} - \epsilon_{bc}$ " за дії тривалого навантаження різного рівня. Він матиме вид лінії ОВ (рис. 1), яку назвемо кривою максимально можливих (тих, що практично досягаються) деформацій за однократного навантаження. Тоді точка В перетину ліній ОАВ і ОВ відповідатиме граничній стиливості бетону і, одночасно, рівню тривалої міцності бетону.

Із сказаного випливає, що крайова деформація бетону  $\epsilon_{bc, u}^*$  при руйнуванні залізобетонного стояка за дії короткочасного навантаження лежить в межах,  $\epsilon_{bc, R} \leq \epsilon_{bc, u}^* \leq \epsilon_{bc, u}$ . За дії тривалого навантаження приймаємо  $\epsilon_{bc, u}^* = \epsilon_{bc, u}$ .

Значення  $\epsilon_{bc, u}$  можна знайти двоюко. По-перше:

$$\epsilon_{bc, u} = \epsilon_{e1} + \epsilon_{p1} = \sigma_{b1} / E_b + \rho_1 \sigma_{b1} / E_b = (1 + \rho_1) \eta_1 R_b / E_b, \quad (1)$$

де  $\rho_1$  - характеристика повзучості для рівня навантаження бетону  $\eta_1$ , що відповідає його тривалій міцності.

З іншого боку, коли відоме рівняння кривої АВ, можна визначити  $\epsilon_{bc, u}$ , знавши величину  $\eta_1$ . У даних дослідженнях

згідно СНиП 2.03.01-84\* приймає  $\eta_1 = \gamma_{bz} = 0,9$  і далі знаходили  $\epsilon_{bc,u}$  за залежність (7.1) норм ЕКБ ФІП<sup>2</sup>.

Несуча здатність стисненої колони визначається з умови:

$$N = N_b - \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} = \gamma_{bz} R_b A_b - \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} \quad (2)$$

Площу стисненої зони бетону  $A_b$  можна виразити через координати її центра ваги  $x_b$  та  $y_b$  (рис. 2), які, в свою чергу, можна визначити із системи нелінійних рівнянь рівноваги:

$$\begin{cases} N_b(e_{ux} - b/2 + x_b) - \sum \sigma_{si} A_{si} (e_{ux} - b/2 + x_{si}) = 0, \\ N_b(e_{uy} - h/2 + y_b) - \sum \sigma_{si} A_{si} (e_{uy} - h/2 + y_{si}) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Перетворивши відому залежність норм для коефіцієнта  $\eta$ , отримуємо граничний прогин гнучкого косостисненого стояка

$$f = \frac{N e_0}{(N_{cr, \beta_0} - N) \cos(\theta - \beta_0)} \quad (4)$$

де  $\beta_0$  - початковий кут нахилу площини дії зовнішньої сили;

$\theta$  - кут нахилу площини прогинів або нейтральної лінії (рис. 2).

Умовна критична сила  $N_{cr, \beta_0}$  визначається за формулою:

$$N_{cr, \beta_0} = 6,4 E_b \left[ I_{bx} p_1 \left( \frac{0,11}{0,1 + \delta_0 / \rho_p} + 0,1 \right) + \alpha_s I_{sx} \right] \times \\ \times \left( \cos^2 \beta_0 + b^2 \sin^2 \beta_0 / h^2 \right) / l_0^2 \quad (5)$$

Зміну жорсткості елемента внаслідок попереднього напруження арматури в залежності (5) враховано коефіцієнтом  $\rho_p$ , для обчислення якого теоретичним шляхом отримано формулу:

$$\rho_p = 1 + \left( \rho_1 + \sqrt{\rho_1^2 - 0,0024 \lambda_1^2} \right) \frac{\sigma_{bp}}{R_{b, ser} - \sigma_{bp}} \quad (6)$$

де  $\rho_1 = 0,5 + 3\delta_0 + 0,0012 \lambda_1^2$ ,

$\lambda_1 = l_0 / h^* = l_0 / (e_0 / \delta_0) = l_0 \delta_0 / e_0$  - відносна гнучкість,

$\delta_0 = \sqrt{(e_{ox} - f_{p,x})^2 / b^2 + (e_{oy} - f_{p,y})^2 / h^2}$  - відносний ексцентриситет з врахуванням початкового вигину від обтиску.

<sup>2</sup> Кодекс-образец ЕКБ ФІП для норм по железобетонным конструкциям. - М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1984. - 284 с.

Параметр  $p_1$  враховує зниження жорсткості бетонного перерізу за дії тривалого навантаження (аналогічно коефіцієнту  $1/\varphi_1$  СНиП). Його обчислюють за пропонованими В.М.Ромашком формулами, врахувавши фіктивне зменшення ексцентриситету в напруженому елементі також за допомогою коефіцієнта  $\varphi_p$ .

Спільне рішення залежностей (3) та (4) становить певну математичну складність. Найбільш оптимальним підходом у цьому випадку, на наш погляд, є застосування ітераційного методу Ньютона. Для пошуку початкового наближення використано гіпотезу В.М.Ромашка. Згідно неї за постійного ексцентриситету зовнішньої сили точка прикладання рівнодіючої зусиль у стисненому бетоні переміщується по еліпсу при зміні кута нахилу площини дії навантаження. Щоб побудувати цей еліпс, переріз спочатку двічі розраховують як позацентрово стиснений у площинах симетрії за розробленими наближеними формулами. Координати точки перетину площини дії зовнішньої сили з указаним еліпсом і вважають початковим наближенням для  $x_b$  та  $y_b$ . Розрахунки показують, що далі достатньо 2...3 наближень за методом Ньютона, щоб визначити величину  $N$ .

Певною математичною проблемою є те, що при проектуванні косостиснених колон розрахункові формули для деяких величин залежать від форми стисної зони бетону. В даній роботі отримано єдині наближені залежності для знаходження цих параметрів, що й дозволило ефективно застосувати вказаний ітераційний метод Ньютона, бо значно зменшило об'єм обчислень.

Позначивши через  $X = x_b/b$ ,  $Y = y_b/h$ ,  $K_{1x} = 1-3X(1-X)$ ,  $K_{2x} = 1-2X$ ,  $K_{1y} = 1-3Y(1-Y)$ ,  $K_{2y} = 1-2Y$ , отримаємо

$$A_b = [-0,05 + 0,3(X+Y) - (X^2+Y^2)]/2 + 4XY \quad ] \quad bh \quad , \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{2 h Y}{15 b X} \left[ 1 + 2,8 \frac{K_{2x}}{K_{1x}} + 0,075 \frac{K_{1y}}{K_{2y}} + 3,6 \frac{K_{1y} K_{2x}}{K_{1x} K_{2y}} \right] \quad , \quad (8)$$

$$\xi_1 = Y h K_g / ( x_{s1} \operatorname{tg} \theta + y_{s1} ) , \quad (9)$$

де

$$K_g = 2.65 + 2.25(X+Y) - 6.8 X^2 - 2.8 Y^2 + 1.05 XY . \quad (10)$$

Як показав проведенний чисельний експеримент, похибка наведених залежностей у порівнянні з точними незначна і помітно не впливає на загальну точність обчислень  $N$ .

За описаною методикою була обчислена короткочасна несуча здатність більш як 200 стояків, випробуваних різними авторами. Деякі статистичні дані порівняння експериментального та теоретичного значення  $N$  наведені у табл. 1. Точність обчислень, в основному, задовільна. Для випадку колон з нерівномірним попереднім обтиском бетону методика потребує експериментальної перевірки і, можливо, уточнення, тому що кількість випробуваних іншими авторами зразків незначна. У першу чергу варто перевірити коректність прийнятих залежностей для визначення  $\epsilon_{bc,u}$  та  $\rho_p$ .

У третій главі наведені програма та методика експериментальних досліджень попередньо напружених косостиснених стояків, конструкція дослідних зразків та установок, характеристики міцності та деформативності матеріалів.

Об'єктом досліджень були косостиснені стояки прямокутного перерізу з високоміцною арматурою. Випробовували зразки чотирьох типів - з нерівномірним по перерізу попереднім обтиском бетону (двох типів), рівномірно обтиснені та ненапружені. Типи напружених зразків відрізнялись точкою прикладання зусилля обтиску. Вар'ювали також на 2 - 3-х рівнях ексцентриситет, гнучкість стержня, кут нахилу силової площини, рівень тривалого навантаження. Клас бетону, клас, кількість та розташування арматурних стержнів лишались незмінними.

Програма досліджень включала випробування за коротко-

Таблиця 1

Статистичні параметри порівняння фактичної несучої здатності стиснених елементів з її теоретичним значенням за розробленою методикою

Т и п зразка	Гнучкість $\lambda_1 = l_0 / h$						Всього		
	$\leq 10$			$> 10$					
	п	$\Delta, \%$	$\sigma, \%$	п	$\Delta, \%$	$\sigma, \%$	п	$\Delta, \%$	$\sigma, \%$
звичайний	53	- 9,7	8,7	90	- 0,1	9,3	143	- 3,7	9,8
напружений з рівном. обтиском	15	- 7,7	8,9	26	- 4,3	13,8	41	- 5,5	12,1
напружений з нерівн. обтиском	7	- 5,5	14,1	13	6,1	16,5	20	2,0	15,3
Разом:	75	- 9,5	9,2	129	- 0,3	11,4	204	- 3,7	11,1

часної дії навантаження 6 коротких і 16 гнучких стояків. За тривалов дії було випробувано 6 гнучких зразків, з них 4 напружених. Отже, досліджено роботу 28 колон, у тому числі 8 звичайних, 2 з рівномірним та 18 з нерівномірним обтиском. Стояки для короткочасних випробувань ділились на групи по 3 + 4 зразки. В межах однієї групи змінювався лише тип попереднього обтиску бетону. Для стояків з нерівномірним обтиском випробовували два зразки-близьки за однакових умов. Міцність та деформативність матеріалів контролювали по бетонних кубах і призмах та арматурних коротяках.

Колони поперечного перерізу 200x130 мм та розрахункової довжини 3200 мм та 1650 мм армували чотирма стержнями арматури  $\varnothing 12 A_T-V$ , розміщеними в кутках перерізу. Арматуру натягували механічним способом, зусилля напруження контролювали електронним приладом ЗИН-МГ2 та за показами тензодатчиків. Фактичне зусилля попереднього обтиску перед завантаженням колон коливалось в межах 196,1...207,3 кН. Відпуск арматури проводили у віці 61...180 діб після бетонування, щоб виключити можливі впливи обтиску на твердіння бетону. Завантажен-

ня зразків відбувалось у віці 64...211 діб, під дією тривалого навантаження стояки перебували більше двох років. Призмова міцність бетону стояків на момент обтиску та завантаження зразків склала 27,9...30,1 МПа.

Нерівномірний обтиск бетону створювали завдяки різному напруженню арматурних стержнів. Перед завантаженням відношення попередніх напружень в бетоні таких зразків  $\sigma_{br} / \sigma'_{br}$  коливалось в межах 2,88...3,68 за середнього рівня обтиску  $(\sigma_{br} + \sigma'_{br})/2 = 0,25 R_b$ .

Випробування проводили за шарнірного опирання кінців колон у пружинних установках. Створене домкратом навантаження контролювали за показами зразкового динамометра і через пружинний пакет передавали на дослідний зразок. Навантаження прикладали ступенями, рівними 1/10 від очікуваного руйнівного. Перед руйнуванням величину ступеня зменшували вдвоє.

У 2 + 3 характерних перерізах по довжині елемента заміряли складові прогину стояків у двох площинах. Деформації бетону та арматури в середньому по довжині перерізі визначали тензометричним комплексом СИП-3. Появу та розвиток тріщин контролювали візуально та за допомогою мікроскопа.

У четвертій главі дисертації наведені та проаналізовані основні результати експериментальних досліджень, перевірена їх відповідність теоретичним розробкам.

Гіпотеза про високу ефективність нерівномірного попереднього обтиску бетону була підтверджена експериментально. Несуча здатність коротких напружених колон при малих ексцентриситетах була принаймі не менша, ніж звичайних, а за великих ексцентриситетів вона зростала на 21...30% (табл. 2).

Для всіх гнучких напружених стояків за дії короточасного навантаження жорсткість, тріщиностійкість та несуча

здатність зросла в порівнянні з ненапруженими (табл. 3). За прийнятих параметрів рівномірного обтиску його ефективність була невисокою. Несуча здатність стояків за нерівномірного обтиску зросла набагато більше. За відносно малих ексцентриситетів цей ріст склав 26...35%, за великих - 20...24%. Ефективність нерівномірного попереднього обтиску значно зростає із збільшенням гнучкості стержня за малих ексцентриситетів навантаження і майже не змінюється за великих.

Для кількісної оцінки ефективності попереднього напруження ввели коефіцієнт  $\eta_{(p)} = N_{\text{напр.}} / N_{\text{звич.}}$ . За результатами проведених випробувань та за даними інших авторів отримано залежність для теоретичного визначення цього параметра. Вона може бути використана для попередньої оцінки ефективності різних типів напруження при проектуванні.

Напрямок площини прогинів всіх гнучких косостиснених стояків був практично перпендикулярний до нейтральної лінії, а форма зігнутої осі близька до синусоїди. В розтягненій арматурі та в стисненій зоні перерізу колон спостерігали перерозподіл зусиль з більш напруженої арматури на менш напружену та міх бетоном та арматуров. Про це свідчили зміна інтенсивності росту деформацій арматури та поворот нейтральної лінії. Дещо помітніше це відбувалось у напружених зразках.

Крайові деформації бетону незадовго до руйнування за дії короткочасного навантаження коливались в межах  $(2,36 \dots 2,94) \times 10^{-3}$ . Приблизно в таких же межах змінювалась величина  $\epsilon_{\text{с.у}}$  для ненапружених стояків, що відповідало максимальним напруженням в стисненій арматурі  $\sigma_{\text{с.у}} = 480 \dots 600$  МПа. Як бачимо, гранична деформативність стисненого бетону була вищою закладеного в СНиП 2.03.01-84\* значення  $\epsilon_{\text{с.р}} = 0,002$  у 1,18...1,47 рази. Теоретичне значення  $\epsilon_{\text{с.у}}$  обчислене за

Таблиця 2

Несуча здатність коротких косостиснених стояків

Зразок	Ексцентрис. навантажен.		Рівень тріщиноутворення	Несуча здатність, кН		$\frac{N_{\text{exp}} - N_{\text{теор.}}}{N_{\text{exp}}} \times 100, \%$	$\frac{N_{\text{напр.}}}{N_{\text{звич.}}}$
	$e_0$	$\delta e$		$N_{\text{exp}}$	$N_{\text{теор.}}$		
КС-10-3 <sub>1</sub>	6,25	0,39	0,5	332,1	312,1	6,0	1,00
КСН2-10-3 <sub>1</sub>	6,25	0,39	0,6	365,8	338,7	7,4	1,10
КСН2-10-3 <sub>2</sub>	6,25	0,39	0,6	350,3	338,7	3,3	1,06
КС-10-4 <sub>1</sub>	12,5	0,78	0,3	148,2	142,3	4,0	1,00
КСН2-10-4 <sub>1</sub>	12,5	0,78	0,5	192,1	174,3	9,3	1,30
КСН2-10-4 <sub>2</sub>	12,5	0,78	0,6	179,5	174,3	2,9	1,21

Таблиця 3

Деякі результати випробувань гнучких стояків за дії короткочасного навантаження

Зразок	Прогин перед руйнуванням f, мм	Рівень тріщиноутв.	Несуча здатність, кН		$\frac{N_{\text{exp}} - N_{\text{теор.}}}{N_{\text{exp}}} \times 100, \%$	$\frac{N_{\text{напр.}}}{N_{\text{звич.}}}$
			$N_{\text{exp}}$	$N_{\text{теор.}}$		
СН1-10-1 <sub>1</sub>	13,72	0,7	190,1	179,9	5,4	-
СН2-10-1 <sub>1</sub>	17,49	0,6	172,3	175,3	- 1,7	-
С-10-2 <sub>1</sub>	29,94	0,4	189,9	199,2	- 4,9	1,00
СН1-10-2 <sub>1</sub>	16,26	0,7	241,0	231,6	3,0	1,27
СН1-10-2 <sub>2</sub>	12,83	0,6	248,8	231,9	6,8	1,31
С-10-3 <sub>1</sub>	28,42	0,3	192,4	205,9	- 7,0	1,00
СН1-10-3 <sub>1</sub>	10,10	0,7	251,9	244,2	2,8	1,31
СН1-10-3 <sub>2</sub>	11,78	0,7	259,8	245,3	5,6	1,35
С-10-3 <sub>2</sub>	30,57	0,3	212,2	225,9	- 6,5	1,00
СР-10-3 <sub>1</sub>	20,51	0,7	237,4	239,5	- 0,9	1,12
СН2-10-3 <sub>1</sub>	13,03	0,7	267,2	253,7	5,1	1,26
СН2-10-3 <sub>2</sub>	16,84	0,7	269,2	255,3	5,2	1,27
С-10-4 <sub>1</sub>	33,41	0,3	133,0	129,2	2,9	1,00
СР-10-4 <sub>1</sub>	29,02	0,6	144,7	150,7	- 4,1	1,09
СН2-10-4 <sub>1</sub>	26,01	0,6	160,5	162,7	- 1,4	1,20
СН2-10-4 <sub>2</sub>	23,95	0,7	165,3	163,2	1,3	1,24

пропоновано вище методиком на основі норм ЕКБ ФІП дорівнювало  $(2,57 \dots 2,82) \times 10^{-3}$  і задовільно співпадало з фактичним.

Було отримано також задовільне співпадання значень коефіцієнта  $\varphi_p$ , обчислених за фактичними параметрами (прогини, характеристики матеріалів) та за формулою (6). Середнє квадратичне відхилення останнього становило 6,4%, середнє арифметичне дорівнювало - 5,94%.

За результатами експерименту підтверджено також коректність в цілому розробленої методики розрахунку стиснених елементів. Так, для випробуваних зразків з нерівномірним обтиском середнє арифметичне відхилення величини  $\frac{N_{theory} - N_{exp}}{N_{exp}}$

склало  $\Delta = -3,9\%$ , середнє квадратичне  $\sigma = \pm 5,1\%$ . Для всіх 22 випробуваних стояків отримано  $\Delta = -2,0\%$  і  $\sigma = \pm 5,1\%$ . З урахуванням даних інших авторів (табл. 1) для 34 колон з нерівномірним обтиском маємо  $\Delta = -0,4\%$  і  $\sigma = \pm 12,0\%$ , а для всіх 226 стояків отримаємо  $\Delta = -3,5\%$  та  $\sigma = \pm 10,7\%$ .

За дії тривалого навантаження однакового рівня корткість та тріщиностійкість напружених зразків з нерівномірним обтиском бетону приблизно така сама, як і звичайних. Проте, оскільки абсолютне значення навантаження для напружених стояків більше, то, таким чином, попередній обтиск бетону ефективний і за дії тривалого навантаження.

У п'ятій главі дисертації даю рекомендації щодо визначення меж раціонального застосування різних типів армування стиснених елементів, а також наведена методика практичного їх проектування та приклад розрахунку.

Окрім обчислення несучої здатності стиснених елементів, виникає задача визначення необхідної площі арматури. Для раціонального її вирішення можна запропонувати такий шлях:

- проаналізувати діюче навантаження (знакопостійне чи

знакозмінне, діє в одній площині чи у двох);

- визначити можливість застосування несиметричного армування та попереднього напруження арматури;

- попередньо оцінити ефективність кожного виду армування за наведеними рекомендаціями, вибрати 2...3 найкращих;

- розрахувати площу арматури за пропонуваню методикю для вибраних варіантів і визначити оптимальний.

## В И С Н О В К И Т А П Р О П О З И Ц І І

1. Нерівномірний попередній обтиск бетону на 20...35% підвищує несучу здатність гнучких косостиснених стоеків у порівнянні з ненапруженими навіть тоді, коли ефективність рівномірного обтиску незначна. Це відбувається внаслідок значного зростання жорсткості стоеків. Ефективність напруження можна попередньо оцінити коефіцієнтом  $\eta_{\text{р}}$ , який залежить від ексцентриситету, гнучкості зразка та параметрів обтиску.

2. За вдало підібраних параметрів нерівномірний попередній обтиск бетону не знижує міцність коротких косостиснених стоеків за малих ексцентриситетів навантаження і підвищує її на 21...30% за великих. Це зумовлено, очевидно, кращим використанням міцносних властивостей матеріалів у напружених колонах, зокрема за рахунок інтенсивнішого перерозподілу зусиль.

3. Розрахунок стиснених елементів прямокутного перерізу на стадії руйнування можна вести за розробленою універсальною методикою на основі передумов СНиП 2.03.01-84\*. Її реалізація на основі ітераційного методу Ньютона достатньо ефективна, а достовірність підтверджена обробкою результатів випробувань більш як 220 експериментальних зразків.

4. Вплив попереднього напруження на жорсткість бетонного перерізу гнучкого стисненого стержня слід враховувати за допо-

могою коефіцієнта  $\varphi_p$ , який обчислюється за формулою (6).

5. Розрахункові параметри, формули для знаходження яких залежать від форми стисненої зони бетону, можна обчислювати за універсальними залежностями (7)...(10).

Основний зміст досліджень відображено в таких роботах:

1. Бабич В.І., Гарницький Ю.В. Рекомендації до розрахунку міцності косостиснених залізобетонних стояків прямокутного перерізу з попереднім напруженням арматури // Український інститут інженерів водного господарства. - Рівне, 1994. - 34с.
2. Гарницький Ю.В., Бабич В.І. Методика експериментальних досліджень попередньо напружених косостиснених залізобетонних колон // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво: Республіканський міжвідомчий науково-технічний збірник. - Львів: Світ, 1993 р. - Вип. 20. - С. 135-137.
3. Гарницький Ю.В., Бабич В.І. Расчет железобетонных элементов прямоугольного сечения с неравномерным предварительным обжатием бетона при косом внецентренном сжатии // Известия вузов. Строительство и архитектура. - 1990 г., N 7. - С. 1-5.
4. Гарницький Ю.В., Бабич В.І. Эффективность предварительного напряжения в коротких сжатых стержнях // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво: Республіканський науково-технічний збірник. - Львів: Світ, 1990 г. - Вип. 18. - С. 106-109.
5. Бабич В.І., Гарницький Ю.В. Робота гнучких косостиснених елементів з попереднім напруженням арматури при тривалому навантаженні // Регіональна науково-практична та методична конференція: Тези доповідей. - Рівне, 1993 р. - С. 14-15.
6. Гарницький Ю.В. Вплив попереднього напруження на міцність коротких косостиснених стержнів // Там же. - С. 16.
7. Бабич В.І., Гарницький Ю.В. Эффективность попереднього напруження арматури в косостиснутих залізобетонних стояках //

Науково-технічна конференція: Тези доповідей. - Рівне,  
1992 р. - С. 2.

#### АННОТАЦІЯ

Гарницький Ю.В. Работа и несущая способность предварительно напряженных железобетонных колонн при косом внецентренном сжатии.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 - строительные конструкции, здания и сооружения. Полтавский технический университет, г. Полтава, 1995 г.

Экспериментально-теоретически исследованы работа и несущая способность кососжатых стоек с неравномерным предварительным обжатием бетона. Изучена эффективность указанных элементов и предложена методика их расчета.

Ключевые слова: железобетон, несущая способность, кососжатые стойки, преднапряжение, неравномерное предварительное обжатие бетона.

#### SUMMARY

Garnitskij Y.W. Work and bearing strength of prestressed reinforced concrete columns under biaxial eccentric compression. Thesis for a Candidate's of Technical Sciences Degree. 05.23.01 - building constructions, buildings and structures. Poltava technical university. Poltava, 1995.

The work and bearing strength of the biaxial compression columns with asymmetric precompression of concrete have been investigated experimentally and theoretically. The efficiency of above mentioned elements has been studied and their design technique has been suggested.

Key words: reinforced concrete, bearing strength, columns under biaxial compression, prestressing, asymmetric precompression of concrete.



АВ 32.651

Підписано до друку 05.05.95.  
Формат 60x84 0 I/16 Обсяг 70 др. ар.  
Замовлення 667 Тираж 100 приміт.

---

Рівне, УІІВГ, Соборна, 11