

На правах рукопису

КУКУШ АНАТОЛІЙ ЛЕОНТІЙОВИЧ

УДК 539.376+621.039.584+624.012.46

УРАХУВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ ДЕФОРМАЦІЙ  
ПОВЗУЧОСТІ БЕТОНУ В РОЗРАХУНКАХ  
ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД ЕНЕРГЕТИЧНИХ  
ОБ'ЄКТІВ В УМОВАХ ПЛОСКОГО  
НАПРУЖЕНОГО СТАНУ

Спеціальність: 05.23.01 - Будівельні  
конструкції, будівлі і споруди

Автореферат дисертації на здобуття  
вченого ступеня кандидата технічних наук



00801723 (L)

Ав 29.76

дисертацією є рукопис

Робота виконана в Донбаському інженерно-будівельному інституті

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор Кирилос О.П.

Офіційні опоненти - доктор технічних наук професор Яременко О.Ф.

кандидат технічних наук  
доцент Митрофанов В.П.

Провідна організація - Донецький Промбуд НДІПроект

Захист відбудеться "31" Травня 1994 р. в 14 годин на засіданні спеціалізованої вченої ради по захисту кандидатських дисертацій К.068.46.01 у Полтавському інженерно-будівельному інституті за адресою: ЗІ4601, м.Полтава, Першотравневий проспект, 24.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотечі Полтавського інженерно-будівельного інституту.

Відгуки на автореферат просимо надсилати на ім'я вченого секретаря в двох примірниках, стверджених печатком.

Автореферат розісланий "28" Квітня 1994 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
к.т.н., доцент

В.О.Бондар

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. В теперішній час пред'являються все більше жорсткі вимоги до надійності та безпеки крупних енергетичних об'єктів (судин високого тиску, захистних оболонок АЕС, гідротехнічних споруд та ін.) як на стадії будівництва, так і на стадії експлуатації. Питання енерго- та ресурсозберігання, а також розробка достатньо обгрунтованих методів розрахунку залізобетонних конструкцій атомних електростанцій на навантаження, які виникають при аваріях, завжди знаходились в центрі уваги інженерів-проектувальників. Неодмінна умова надійної та безпечної роботи АЕС – забезпечення герметичності реакторного відділення, що частіше сполучається з перевитрачанням матеріалів та грошових коштів.

Одним з шляхів підвищення економічності споруд без зниження надійності при експлуатації є врахування резервів їх деформування при проектуванні конструкцій. Так як більшість енергетичних об'єктів розраховані на тривалу експлуатацію, врахування реологічних процесів, пов'язаних з повзучістю бетону, має важливе практичне значення.

Існуючі нормативні документи по розрахунку інженерних споруд енергетичних об'єктів в більшості випадків не враховують впливу тривалого деформування бетону в складному напруженому стані. В цьому зв'язку для отримання даних про тривкість і та деформативні характеристики бетону в умовах неоднорівного навантаження, а також побудови теоретичних залежностей, які відповідають та дозволяють зобразити більш реальну картину напруженого стану розраховуваних споруд, настійною необхідністю є подальше проведення та розвиток експериментально-теоретичних досліджень.

Метою дисертаційної роботи є експериментально-теоретичне обгрунтування та подальший розвиток фізичних рівнянь зв'язку деформацій повзучості бетону на тривало діючих постійних та змінних напруг, які дозволяють на основі врахування реологічних властивостей бетону оцінити напружено-деформований стан залізобетонних конструкцій в умовах складного нелінійного деформування при пласкому напруженому стані.

Автор захищає:

- методику та результати експериментальних досліджень тривалого деформування бетону в умовах двовісного стиснення при постійних та змінних в часі високих рівнях стискувальних напруг;

- пропозиції по диференційному врахунку впливу виду напруженого стану та послідовність його реалізації на уточнення процесу деформування бетону при постійних та змінних в часі діючих напруг в умовах плаского напруженого стану;

- результати теоретичних досліджень по оцінці вимову реологічної поведінки бетону в розрахунках напружено-деформованого стану залізобетонної захисної оболонки АЕС на стадіях зведення, експлуатації та аварії.

Наукову новизну роботи складає:

## 1. Експериментальні дані:

- про вплив високих рівней завантаження на тривалу деформативність бетону при пласкому напруженому стані;

- про вплив силової анізотропії на деформації повзучості при двовісному стисненні;

- по дослідженню тривалого деформування бетону при змінюючихся в часі складних режимах навантаження в умовах плаского напруженого стану.

2. Обґрунтування та розробка аналітичних виражень залежності тривалих деформацій бетону від напруг при постійних в часі стиснених навантаженнях.

3. Врахунок впливу широкого спектру рівней стискувальних напруг при пласкому напруженому стані на деформативність бетону в ортогональних напрямках.

4. Пропозиції по врахунку розподільного по напрямках змінення лінійних та нелінійних деформацій повзучості бетону при двовісному стисненні.

5. Загальні аналітичні залежності деформацій повзучості бетону, отримані на основі використання модифікованого принципу накладення впливу при складних режимах навантаження в умовах плаского напруженого стану.

Практичне значення експериментальних та теоретичних результатів досліджень роботи складається: в уточненні та розвитку представлень про фізичну сутність нелінійного деформування бетону; в отриманні теоретичних залежностей для плаского напружено-деформованого стану, дозволяючих більш точно оцінити резерви деформування споруд в порівнянні з існуючими в теперішній час розрахунковими вираженнями; в реалізації отриманих експериментально-теоретичних залежностей для оцінки напруженого стану просторової залізобетонної конструкції типу оболонки АЕС для ряду важливіших етапів її будівництва, експлуатації та аварійних режимів.

Апробація роботи. Основні результати роботи були докладені та обмірковані на XIV-XVII науково-технічних конференціях Донбаського ІВІ 1989-1993 р.р., на Республіканській конференції "Удосконалення залізобетонних конструкцій, працюючих на складні види деформацій, та їх впровадження в будівельну практику" М.Полтава, 1989 р.

Публікації. Основні результати досліджень опубліковані в 7 статтях.

Об'єм роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти глав, загальних висновків, списку літератури з 158 найменування та додатку. Вона представлена на 156 сторінках, які утримують 44 малюнки та 8 таблиць.

## ЗМІСТ РОБОТИ

Стан питання. Важливим експериментально-теоретичним пропозиціям по врахуванню деформацій повзучості в підрахунках різних та залізобетонних конструкцій присвячено багато робіт: С.В.Александровського, М.Х.Арутюняна, А.Я.Барашикова, В.М.Бондаренко, З.П.Базанта, Я.Аягі, А.А.Гвоздева, А.Б.Голишева, Д.Діамантідіса, М.Д.Карчемського, Е.А.Кюгана, Дж.Іллстона, І.Дж.Джардана, Я.Д.Лившиця, Ю.М.Малашкіна, А.А.Мельникової, В.І.Петрова, І.С.Прокоповича, В.М.Ткачука, І.І.Улицького, Д.Дж.Ханнанта, А.Ф.Яременко, Є.А.Яценко, А.В.Яшина та інших.

В методичному відношенні роботи перерахованих авторів мали істотну різницю. Іспитам підлягали зразки різної форми

та розмірів. Дослідження відрізнялися класами та складами бетонів, тривалістю іспитів, засобами передавання навантажень на зразки, віком бетону до моменту завантаження рівними діючих в ортогональних площинах навантажень та їх співвідношеннями, а також температурно-вогкісними умовами іспитів.

В подавляючій більшості експериментальних досліджень тривалих деформацій бетону при складному напруженому стані рівних стискуєчих напруг зразків не перевищували традиційно-лінійної галузі деформування ( $\epsilon_{xy} = \sigma_{xy} / R_B \leq 0,5$ ). Практично відсутні дослідження повзучості бетону при зміненнях в часі ортогональних напруг, як з величини, так і зі знаку, що не дозволяє оцінити найбільш важливі експериментально-теоретичні закономірності його тривалого деформування.

В результаті узагальнення значної кількості експериментальних досліджень цілком встановлено, що повзучість бетону при двовісному стисненні менш повзучістю при одновісному стисненні та істотно залежить від рівней напруг, які додаються та їх співвідносин.

На підставі проведеного аналізу більшості існуючих в теперішній час експериментально-теоретичних робіт, присвячених вивчання тривалого деформування бетону в умовах складного напруженого стану, можна виділити два основних напрями аналітичного представлення деформацій повзучості. Багато авторів для спису так званих питомих деформацій повзучості бетону при двох- та трьохвісному навантаженні використовують питомі відносні деформації, які отримані при одновісному стисненні. Хоч по цим вираженням можна з тим, або іншим ступенем точності отримати деякі дані про деформування бетону, при постійних в часі напруженнях, представлено більш коректним для неодновісного напруженого стану використовувати фізичні рівняння, які пов'язують в часі відносні деформації повзучості по любому напрямку з відповідними величинами тензору напруг. Очевидно, в ці аналітичні залежності і повинні входити питомі відносні деформації повзучості, які залежать в свою чергу від напруг.

Методика проведення експериментальних досліджень. Для отримання експериментальних даних було проведено три основних та три допліжних методичних серій іспитів. В якості зразків використовувалися бетонні призми з розмірами 70x70x280 мм та 100x100x400 мм. По результатах методичних серій були відраховані засоби кріплення вимірвальних приборів, уточнено вплив чергості додаваних пов'язувальних та поперечних напруг, давалася оцінка силової анізотропії, яка з'являлася при завантаженні. Завантаження зразків природного затвердіння проводилися у віці 10, 26, 118 та 152 діб. Класи бетону варіювалися в межах В20-В30.

В дисертації описані три основні робочі серії експериментів, які охоплюють найбільш широкий спектр класів бетону та відносних рівней стискувальних напруг. Для експериментального вивчення впливу високих рівней напруг на деформації в першій серії був прийнят бетон класу В15. У другій та третій серіях склад бетону підбирався з умов отримання бетону класу В35, який часто використовується у відповідальних інженерних спорудах енергетичного будівництва. Дані по складах досліджувальних бетонів доведені у таблиці.

Склад довідувальних бетонів

Номер серії	Склад бетону за вагою	W/C	Расход цементу кг/м <sup>3</sup>
I	I : I,3 : 3,3	0,52	388
2,3	I : I,22 : 3,0	0,42	426

Примітка: для виготовлення бетонної суміші використано портландцемент марки 500, песок кварцевий, щебінь гранитний фракції 5-10 та 10-20 мм.

Зразки перших двох серій іспитів були не ізольовані від висихання, а зразки третьої серії пароізовані від оточуючої середовища. Ізоляція здійснювалася за допомогою двох шарів парафіну, технічного вазеліну та двох шарів поліетиленової плівки відразу після распалубки та контрольного заміру перетину зразку. На протязі всього часу іспитів за результатами зваження проб зруйнованих зразків означувалася вагова відносна вогкість бетону.

Для виключення погрішностей заміру, пов'язаних з впливом на показання приборів незначних коливань температури оточуючого середовища, скористовувались незавантажені зразки-близнюки, які були температурними еталонами компенсаторами. Усі заміри деформацій здійснювалися за допомогою важільних тензометрів з ціною ділення 0,001 мм та індикаторів годинникового типу, ціна ділення яких складала 0,001 та 0,002 мм.

При виборі величин стиснених напруг на зразки  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  а також їх співвідносин  $\sigma_y / \sigma_x$  основна увага приділялася дослідженням як ізольованого, так і неізольованого бетону в нелінійної галузі деформування.

Для отримання достатньо об'єктивної кількісної та якісної картини залежності відносних деформацій повзучісті бетону при двохвісному стисненні як при постійних, так і при змінних напругах був використан широкий спектр напруг. В поздовжньому напрямі він змінювався від 0,2 до 0,81 призменої тривкості, а у поперечному напрямі досягав 0,67 призменої тривкості у момент завантаження. Співвідносини напруг, діючих у взаємно ортогональних площинах, змінювалися від  $\sigma_y / \sigma_x = 0$  до  $\sigma_y / \sigma_x = 1,9$ .

Основна увага дослідження була спрямована на вивчення реологічної поведінки старіючого бетону, завантаженого у ранніх віках 5,6 діб. В деяких серіях вивчалися тривали деформації бетону, для чого завантаження груп зразків проводилося в більш пізні терміни, щільно до 152 діб.

Дослідження проводилися як при постійних, так і при змінних в часі стискувальних напруг. В зв'язку з цим в кожній серії одночасно з основними робочими призмами були завантажені й режимні зразки з пропорціональними та непропорціональними зміненнями в часі напруг,  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$ .

Як правило, в кожній іспитовій серії використовувалося не менш 3 рівней стискувальних вертикальних напруг. В першій серії для одновісно завантажених зразків таких рівней було чотири. Кожному співвідношенню напруг  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  відповідало по два зразки-близнюка.

Вертикальне осіве навантаження відтворювалося за допомогою важільних та важільно-пружинних установ. В поперечному

напрямі напрути відтворювались за допомогою гідравлічної мембранної системи, яка рівномірно передавала навантаження на дослідований зразок. З метов підтримання постійного тиска в мембранному пристосуванні на протязі всього часу іспитів в систему з'єднаних шлангів підключався балон-акумулятор еленіств 2 литри, в який передчасно накачувалося повітря та масло під тисненням.

Для оцінки фізико-механічних властивостей на всьому інтервалі досліджень одночасно з тією ж бетонної суміші було виготовлено і в відповідних віках випробувана велика кількість контрольних зразків-близнюків: призм та кубів. Аналогічно робочим призмам контрольні зразки третьої серії відразу після распаубки до моменту іспиту були ребельно ізольовані від висихання. За результатами цих іспитів означувалися кубікова та призмenna тривкості, модуль бетону та коефіцієнти попереочних деформацій бетонів для різних моментів часу у ході тривалих експериментів.

#### Дослідження повзучості бетону при постійних напругах.

із існуючих різновидів сучасної теорії повзучості основні фізико-механічні властивості бетону найбільш повно відображає теорія упруго-повзучого тіла. Однак ступінь відповідності експериментальних даних врахункових величинам деформацій повзучості залежить від підбору аналітичних залежностей наслідкових функцій  $\dot{\epsilon}$ , закрема, функцій питомих відносних деформацій повзучості  $C(\sigma, t, \tau)$ .

В зв'язку з цим для означення реологічних характеристик бетону та аналітичного опису процесу деформування в усіх іспитових серіях одночасно з двовісно стисненням випробували одновісно завантажені зразки. Рівні додаваних вертикальних напруг в відповідних двох та одновісно завантажених призмах підбиралися однаковими.

При теоретичній обробці отриманих експериментальних кривих питомих відносних деформацій повзучості в даній роботі були використані відомі вираження С.В.Александровського та В.М.Бондаренка, які гарно описують процес неупругого деформування важкого бетону.

$$C(\sigma, t, \tau) = C_L(t, \tau) + C_N(\sigma, t, \tau), \quad (1)$$

де  $C_L(t, \tau)$  та  $C_N(\sigma, t, \tau)$  - лінійна та нелінійна складові питомих деформацій повзучості, при цьому лінійна складовка  $C_L(t, \tau)$  виділялася традиційним засобом.

За допомогою використання вищезазначеного апарату вдалося досягнути цілком припустимої відповідності іспитових та врахункових значень деформацій повзучості бетону при осівому стисненні по описуваним експериментальним серіям на усіх інтервалах часу спостереження.

На мал. 1 представлено один з графіків<sup>3</sup> відносних деформацій бетону при двовісному стисненні. Швидкість загасання деформацій повзучості двовісних зразків в часі значно більша, ніж в одновісно стиснених. Чим вище рівень напруг  $\sigma_y$ , в поперечному напрямі при близьких значеннях вертикальних напруг  $\sigma_x$ , тим швидше затухають деформації. Наявність навіть невеликого поперечного рівня стискуючих напруг  $\varepsilon_y(\tau) = 0,2$  приводить до значного (більш 50%) зниження деформацій повзучості в порівнянні з одновісним завантаженням. Тому для молодого бетону більш доцільно оперувати не абсолютними величинами напруг, а рівнями стискуючих напруг в кожному з напрямів.

Величина зниження деформацій повзучості при одновісному стисненні в порівнянні з одновісним, залежить як від рівня стискуючих напруг, так і від класу бетону. Чим вище клас, тим менш зниження і цілком деформативність. Необхідно відмітити, що при збільшенні рівня напруг  $\varepsilon_y(\tau)$  при однакових напругах  $\sigma_x$  спостерігався більш ранній, ніж у інших авторів, перехід поперечних деформацій  $\varepsilon_x^{побс.}$  в галузь розтягу. З цих же графіків видно, що незалежно від рівня діючих напруг  $\sigma_x$  при двовісному стисненні відсутня пропорційна залежність зменшення  $\varepsilon_x^{побс.}(t, \tau)$  по мірі росту  $\sigma_y$ .

Для теоретичного опису деформацій повзучості бетону, які натекли з моменту завантаження зразків при двовісному напруженому стані, за основу взяли вираження одного з варіантів сучасної нелінійної теорії упруго-повзучого тіла.

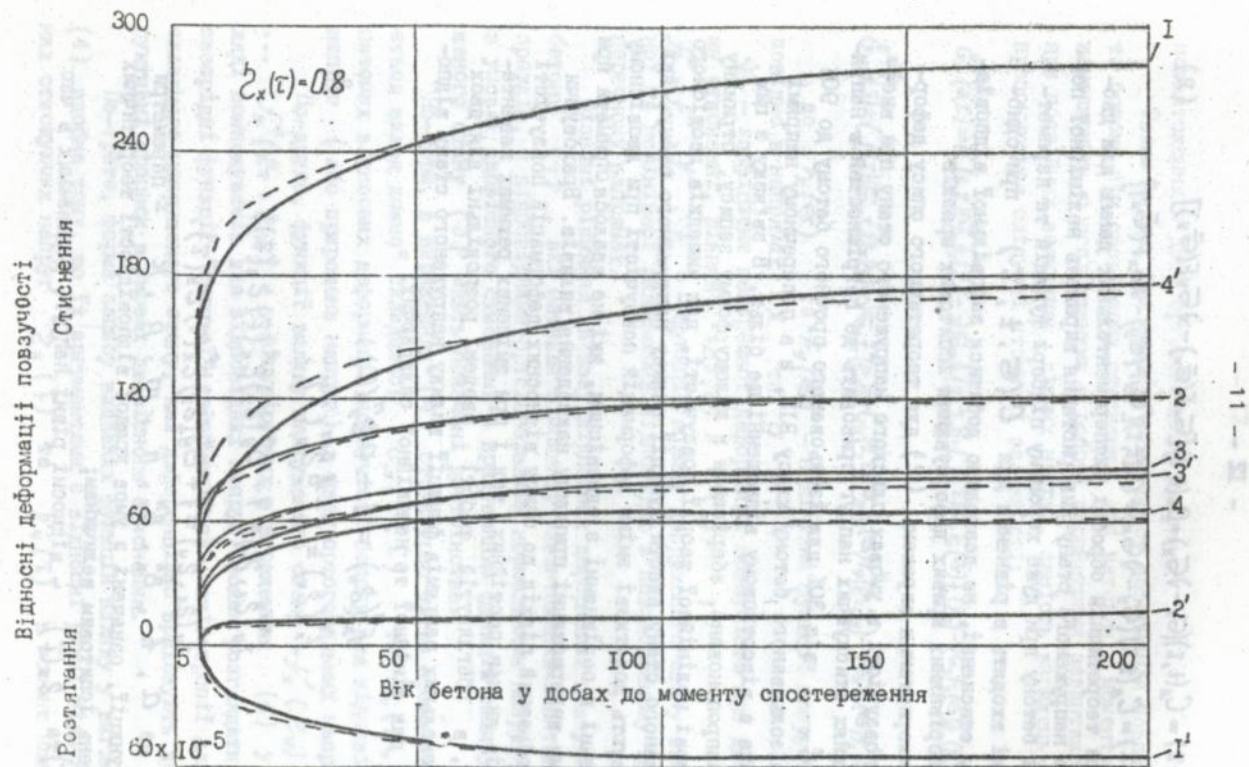


Рис. 1. Деформації повзучості бетону (1-а дослідна серія)  
 1, 2, 3, 4 -  $\epsilon_x$  і 1', 2', 3', 4' -  $\epsilon_y$  при  $\sigma_x$  відповідно рівних 7.3, 6.9, 7.3, 7.3 МПа, а  
 — експеримент, - - - теорія по виразу (4). 0, 2, 4, 6 МПа.

$$\epsilon_x^{повз}(\tau, \tau) = C_x(t, \tau)(\epsilon_x - \nu \epsilon_y) + C_H(t, \tau)[\epsilon_x F(\bar{\epsilon}_x) - \nu \epsilon_y F(\bar{\epsilon}_y)] \quad (2)$$

$$\epsilon_y^{повз}(\tau, \tau) = C_y(t, \tau)(\epsilon_y - \nu \epsilon_x) + C_H(t, \tau)[\epsilon_y F(\bar{\epsilon}_y) - \nu \epsilon_x F(\bar{\epsilon}_x)]$$

При теоретичній обробці експериментальних даних для двовісного напруженого стану використання виражень нелінійної повзучості бетону при дуже хорошому підборі функцій та параметрів, які входять в рівняння для  $C(\epsilon, t, \tau)$  при одновісному стисненні, не дозволило добитися задовільної відповідності порівняних кривих деформування іспитових зразків.

Використання виражень (2) для теоретичного опису деформацій повзучості в умовах плаского напруженого стану при високих рівнях стискувальних напруг приводить до погіршень в напрямі  $\epsilon_x$  від 30% для ізольованого прочного бетону до 90% для неізольованого бетону класу В15, а в поперечному напрямі нев'язка в відсотковому відношенні ще більш. В зв'язку з цим було запропоновано, зберігаючи в цілому форму запису, отриману на основі нелінійної теорії повзучості, для випадків двовісного напруженого стану ввести функції впливу напруженого стану, які враховувать додаткові зміни деформацій повзучості при двовісному стисненні в порівнянні з одновісним, які не вдалося отримати при прямому використанні принципу накладення впливів. Враховуючи однообразний підхід до опису відносних деформацій повзучості зразків як при постійних, так і при змінених режимах навантаження, в розглянутій роботі введені розподільні для двох ортогональних напрямів функції впливу напруженого стану відповідно для лінійної та нелінійної складових:

$$f_x^A(\epsilon_y) = 1 - a \epsilon_y^n(\tau);$$

$$f_x^H(\epsilon_y) = 1 - b \epsilon_y^m(\tau);$$

$$f_y^A(\epsilon_x, \epsilon_y) = 1 + B_y^A(\epsilon_y) \epsilon_x^k(\tau) \epsilon_y(\tau);$$

$$f_y^H(\epsilon_x, \epsilon_y) = 1 + B_y^H(\epsilon_y) \epsilon_x^p(\tau) \epsilon_y(\tau).$$

де  $a, b, B_y^A, B_y^H, n, m, p, k$  - параметри та функції, означені з умов кращої відповідності теоретичних значень іспитовим величинам;

$\epsilon_x(\tau)$  та  $\epsilon_y(\tau)$  - відносні рівні напруг, додаваних в час

навантаження в двох ортогональних напрямках.

Таким чином, для аналітичного опису деформацій повзучісті бетону при двовісному стисненні, які натекли з моменту завантаження, з дослідженими в роботі параметрами завантаження при постійних величинах, діючих напруг, замість виражень (2) пропонується наступні уточнені залежності:

$$\epsilon_x^{повз} = C_n(t, \tau) [\epsilon_x f_x'(\beta_y) - \nu \epsilon_y f_y'(\beta_x \beta_y)] + C_n(t, \tau) [\epsilon_x F_x(\bar{\epsilon}) f_x''(\beta_y) - \nu \epsilon_y F_y(\bar{\epsilon}) f_y''(\beta_x \beta_y)], \quad (4)$$

$$\epsilon_y^{повз} = C_n(t, \tau) [\epsilon_y f_y'(\beta_x \beta_y) - \nu \epsilon_x f_x'(\beta_y)] + C_n(t, \tau) [\epsilon_y F_y(\bar{\epsilon}) f_y''(\beta_x \beta_y) - \nu \epsilon_x F_x(\bar{\epsilon}) f_x''(\beta_y)],$$

де  $F_x(\bar{\epsilon})$  та  $F_y(\bar{\epsilon})$  - нелінійні функції напруг відповідно в напрямках  $X$  та  $Y$  ;

$\nu$  - коефіцієнт поперечної деформації повзучісті при двовісному стисненні, рівний  $\nu_2(t, \tau) = \nu_1(\tau)$  ;

$f_x', f_x'', f_y', f_y''$  - функції впливу напруженого стану лінійної та нелінійної складових відповідно в поздовженому та поперечному напрямках.

Фізичні рівняння зв'язку відносних деформацій повзучісті бетону (4), які натекли з моменту завантаження іспитових зразків, з відповідними ортогональними нормальними напруженнями в умовах двовісного стиснення з врахуванням функцій впливу напруженого стану (3) мають означені достоїнства.

По-перш, в вираженнях (4) структурно чітко прослідковується вклад кожної складової  $C_n(t, \tau)$  та  $C_n(t, \tau)$  питомих відносних деформацій повзучісті бетону для відповідних напруг (або прирощень напруг) в двох ортогональних напрямках.

По-друге, функції впливу напруженого стану  $f_x'(\beta_y) \dots f_y''(\beta_x, \beta_y)$ , фігуріруючих в вираженнях (4) у вигляді сомножувачів для відповідних напруг, можна розглядати як своєрідні функції "силової" деформаційної анізотропії для складного напруженого стану, які диференційно враховують деструктивні процеси в умовах двовісного стиснення.

По-третє, форма запису вказаних функцій впливу у вигляді (4) вдобна тому, що їх аргументами є відносні рівні відповідних стискуючих напруг  $\beta_x(\tau)$  та  $\beta_y(\tau)$  в момент наван-

таження, а не співвідносини  $\sigma_y/\sigma_x$ , що в деяких випадках приводить до неоднозначностей. Для випадків одновісного напруженого стану в напрямі  $X$  або  $Y$  вказані функції стають рівними 1, що відображає фізику деформаційного процесу.

Як видно з графіка на мал. 1 отримано посередня відповідність експериментальних та теоретичних величин відносних деформацій повзучості, підрахованих на основі виражень (8) на всьому інтервалі часу нагляду  $t$  та широкого спектру співвідносин напруг  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$ .

#### Дослідження повзучості бетону при змінних напругах.

Для розрахунків складних просторових систем типу залізобетонних атомних реакторів та загусних оболонки АЕС, конструкції гідротехнічних споруд та інших відповідальних об'єктів важливою проблемою є врахунок тривалої поведінки бетону в умовах змінюючихся в часі силових та змушених діянь. Загальновідомо, що використовуємість того або іншого варіанту теорії повзучості бетону найбільш обгрунтовано перевіряється при описі реологічної поведінки бетону в умовах змінення напруг в часі, тобто при режимних завантаженнях.

Для кількісної та якісної оцінки фізичних залежностей деформацій повзучості в умовах плаского напруженого стану при середніх та високих рівнях стискуючих напруг в кожній серії експериментів проводилися іспити при простих та складних режимах завантаження.

Рівні додаваних стискуючих напруг варіювалися від 0,1 до 0,7 призначеної тривкості бетону в момент змінення напруг. Цикл їх змінення в основному складав два тижні. Для одного з режимів першої серії іспитів два етапи навантаження здійснювали при постійному співвідношенні напруг  $\sigma_y/\sigma_x$  та рівному 1, а в наступному трансформували в складний (мал. 2). Для інших досліджуваних режимів напруг в двох ортогональних напрямках змінювалися непропорціонально.

При теоретичній обробці експериментальних даних була використана нелінійна теорія упруго-повзучого тіла з врахуванням розглянутих раніш функцій впливу напруженого стану  $f_x^N$ ,  $f_x^A$ ,  $f_y^A$ ,  $f_y^N$  (див. вираження 3). Використання принципу

Напряги [МПа]

Відносні деформації  
повзучості

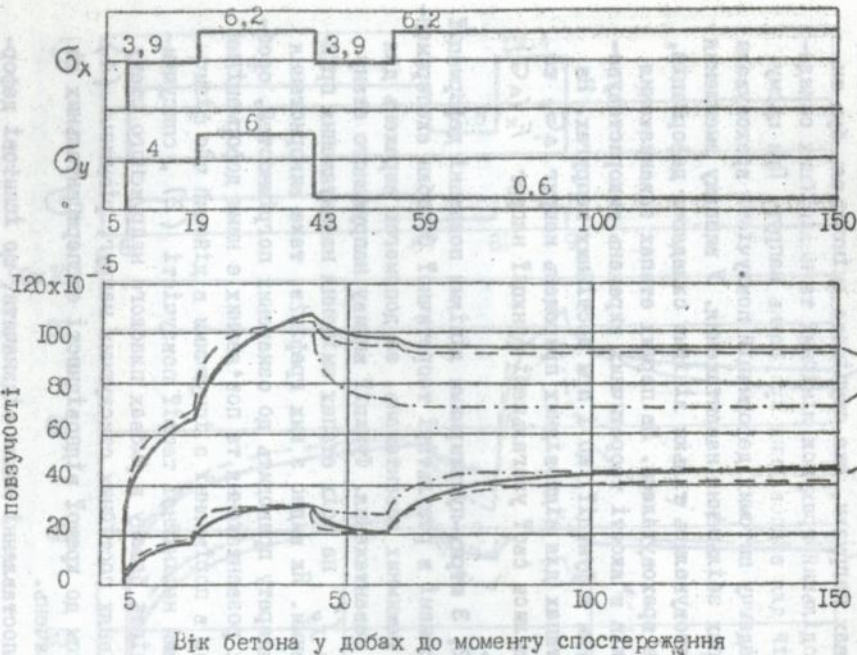


Рис. 2.

Деформації повзучості бетону при змінних напругах

(II-а дослідна серія)

I-  $\epsilon_x(t, T)$ ; 2-  $\epsilon_y(t, T)$ ; — експеримент; - - - теорія по виразам (4, 5); - · - · - теорія по виразу (4).

накладення впливів у чистому вигляді проявилось в значному перевищенні (особливо при високих рівнях стискувальних напруг) величин деформацій повзучості як на етапах довантаження, так і на етапах розвантаження.

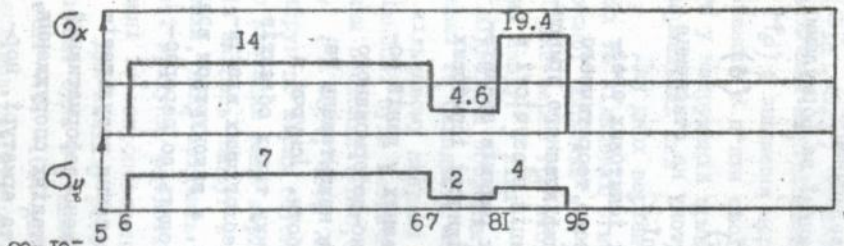
Приймаючи до уваги вищесказане, для опису деформацій повзучості в умовах нагрузки, яка ступіньово змінюється, був використан розподільний врахунок лінійних та нелінійних складових деформацій для відповідних прирощень напруг. При цьому нелінійну складовку питомих деформацій повзучості враховували тільки на етапах збільшення навантаження. У випадку зменшення напруг використовувались тільки лінійна складовка деформацій, а нелінійна не враховувалась. На перших етапах завантаження режимних зразків в якості теоретичних виражень використовувались ті ж формули й функції, що і при постійних напругах. На наступних етапах для відповідних прирощень напруг  $\Delta \epsilon_x$  та  $\Delta \epsilon_y$  знаходились свої узагальнені функції напруг  $F_x(\Delta \epsilon)$  та  $F_y(\Delta \epsilon)$ .

На мал. 2, 3 штрих-пунктирними лініями показані деформації повзучості, отримані в результаті теоретичної обробки експериментальних даних режимних завантажень, за допомогою виражень для першого етапу завантаження. Функції впливу напруженого стану  $f_x^A, f_x^H, f_y^A, f_y^H$  на усіх етапах змінення навантаження приймалися однаковими. Як видно з цих графіків, таке використання теоретичного апарату приводить до означених погрешностей, особливо на етапах розвантаження та пов'язаних з ними деформаціями наслідку. Однак в порівнянні з існуючими в дійсний час фізичними вираженнями нелінійної теорії повзучості (2), списуючи деформативність бетону в умовах плоского напруженого стану при високих рівнях постійних стискувальних напруг, рівняння (4) приводять цілком до кращої відповідності експериментальних та теоретичних значень.

При їх сопоставленні можна відзначити, що іспитові деформації повзучості бетону на етапах розвантаження в середньому на 40-50% менші. Тому для етапів зменшення напруг уявляється необхідним внести деякі зміни аналогічні за фізичним змістом, функції впливу напруженого стану для лінійних складових деформацій повзучості.

ДНБ ім. В. Стефанівського

Напруги [МПа]



Відносні деформації  
повзучості

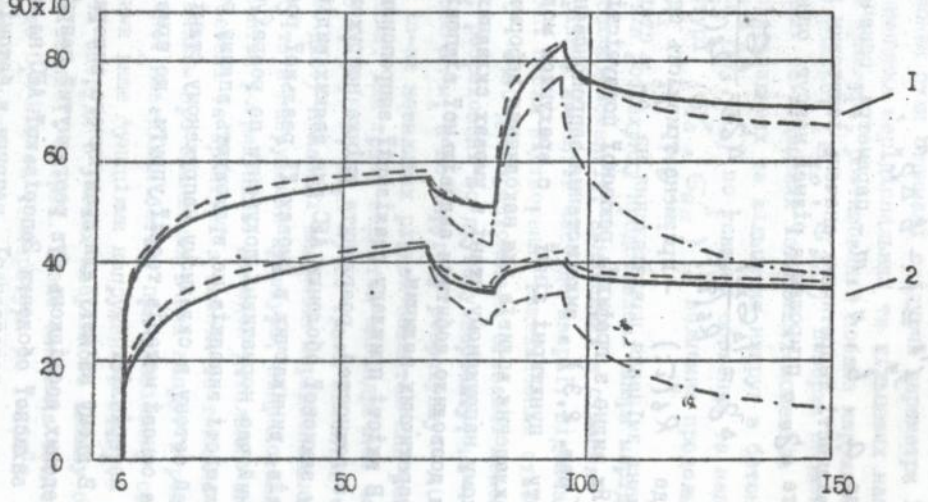


Рис. 3. Деформації повзучості бетону при змінних напругах (2-а дослідна серія). Позначення див. рис. 2.

$$\begin{aligned} f_x^{i,n} &= 1 - a \cdot \Delta \sigma_y^n ; \\ f_y^{i,m} &= 1 - b \cdot \Delta \sigma_x^m , \end{aligned} \quad (5)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $n$ ,  $m$  - параметри, означені з умов кращої відповідності теоретичних значень іспитовим величинам;  
 $\Delta \sigma_x$  та  $\Delta \sigma_y$  - приращення рівней напруг, означені за формулами:

$$\Delta \sigma_x = \frac{|\Delta \sigma_{xi}|}{R_b(\tau_i)} ; \quad \Delta \sigma_y = \frac{\Delta \sigma_{yi}}{R_c(\tau_i)} , \quad (6)$$

де  $R_b(\tau_i)$  - призмена тривкість бетону на стиснення у момент змінення навантаження на  $i$ -м етапі.

Як видно з графіків режимної повзучісті іспитових зразків ( мал. 2,3 ), використання запропонованого теоретичного апарату пунктирні лінії , с врахунком модифікованого принципу накладення впливів для знаходження деформацій повзучісті в пласкому напруженому стані в умовах складних режимів завантаження дозволило добитися задовільної відповідності іспитових та теоретичних величин.

В якості прикладу реалізації запропонованих у даній роботі залежностей, розглянута оцінка напружено-деформованого стану захисної оболонки АЕС для деяких видів навантажень та впливів, виникаючих в умовах її реальної роботи. Існуючи в дійсний час нормативні документи по розрахунку таких об'єктів в більшості випадків не враховують впливу реологічних властивостей бетону в складному напруженому стані, а виконуються взагалі на основі методів теорії упруги, що приводить до перерасходу матеріалів.

В цьому зв'язку для практичного використання результатів проведених досліджень був розглянутий напружено-деформативний стан захисної оболонки Запорізької АЕС на стадіях спорудження, утворення попередньої напруги в бетоні та арматурі, нормальної експлуатації, а також для одного з жорстких аварійних режимів. За допомогою розробленої програми розрахунку оболонки на ПЕЕМ в рамках операційної системи MS DOS були виконані розрахунки для упругої стадії роботи спорудження (I-й варіант) та з врахунком повзучісті бетону в складному напруженому стані

у вигляді залежностей (4) та (5) (2-й варіант).

В результаті розрахунку для кожного з 50-ти розглядаємих ланок по висоті оболонки були отримані наступні параметри їх напруженого стану: значення меридіональних та кільцевих напруг в обидній стержневій арматурі, розташованій поблизу зовнішньої ( $\epsilon_{sa}^N, \epsilon_{\theta a}^N$ ) та внутрішньої ( $\epsilon_{sa}^V, \epsilon_{\theta a}^V$ ) поверхні оболонки; величини меридіональних та кільцевих ізгибаючих моментів  $M_{\theta}$ ; значення меридіональних та кільцевих напруг в бетоні кожного з п'яти слоїв ( $\epsilon_s, \epsilon_{\theta}$ ) по товщині оболонки та напруги у напруженій арматурі ( $\epsilon_{sa}^p, \epsilon_{\theta a}^p$ ); величини продольних нормальних сил  $N_s$  та  $N_{\theta}$ .

Для двох варіантів розрахунку представлені епюри меридіональних та кільцевих згибаючих моментів; виникаючих в січених захисної оболонки для різних моментів часу до аварії. Відмічалось, що вже через три місяці після відтворення вищевказаних стискаючих напруг у віці  $t = 450$  діб меридіональні згибаючі моменти у підвалі оболонки, розраховані по другому варіанту, на 40% менші та складають 2588 Кн·м, а по упругому розрахунку - 4059 Кн·м. У кільцевому напрямі із-за невеликих рівней завантаження розбіжності були незначними. Для трьох відміток циліндричної частини оболонки ( $H=6,5$  м; 30,5 м; 50,4 м) та трьох моментів часу ( $t = 360; 450; 720$  діб.) показані значення меридіональних напруг по шарах бетону та в напруженій арматурі, підрахованих по вказаним вище варіантам розрахунків. Доведен детальний аналіз змінень напруг в бетоні та арматурі з висоти та товщині оболонки, який свідчить цілком про зменшення в них напруг в результаті врахунку реологічної поведінки бетону при довгочасному стисненні із запропонованими вище функціями напруженого стану.

Для аналізу роботи споруди в умовах аварійного впливу був прийнят один з режимів "великої" аварії. Різке звищення тиснення у віці  $t = 1080$  діб до 0,4 МПа та температури до  $T=150^{\circ}\text{C}$  внаслідок розриву паропроводу приводить до виникнення значних розтягуючих зусиль як в меридіональному, так і в кільцевому напрямках, а також більших величин згибаючих моментів.

Як і припускалося, у початковий момент аварійного впливу  $t = 1080$  діб. не відмічалось істотної різниці в величинах отриманих зусиль для вказаних вище двох варіантів розрахунків.

Різниця в величинах моментів не перевищувала 5-ти %. Але вже через 2 часи 24 хвил. після аварії виявлення швидконапікавчої повзучісті приводить до значного зниження величин меридіональних та кільцевих згибаючих моментів на усій висоті оболонки. Різниця у величинах меридіональних моментів в центральній частині оболонки перевищує 30%. Відповідні їм значення для упругого розрахунку складає 3745 кН.м, а для розрахунку з врахунком повзучісті бетону - 2517 кН.м. Для кільцевих моментів на висоті  $H=30,5$  м різниця у величинах моментів досягає 100%, а їх значення складають відповідно 2627 кН.м та 1366 кН.м.

Необхідно відмітити, що для отримання експериментальних значень параметрів напружено-деформованого стану елементів оболонки був розглянутий режим продовженої аварії ( $\Delta t = 2,1$  діб), який, можливо, може здійснюватися в результаті одночасної відмови в роботі декільких протиаварійних систем. На мал. 4 представлені значення згибаючих моментів на висоті оболонки для тих самих двох варіантів розрахунку. Не дивлячись на істотні розбіжності значень меридіональних моментів в зоні крайового ефекту у підвалині оболонки ( $M_3 = -2390$  кН.м - для 1-го варіанту розрахунку та  $M_3 = -554,7$  кН.м - для 2-го варіанту), в середній зоні циліндричної частини різниця у величинах складала коло 40%. Для кільцевих згибаючих моментів отримані значення відповідно були наступні: у підвалині - 9131 кН.м та 5789 кН.м; в середній зоні оболонки - 1775 кН.м та 1099 кН.м.

Як свідчить малюнок, внаслідок розвитку деформацій повзучісті при складному напруженому стані з перебігом часу вздовж меридіану відбувається перерозподіл зусиль  $M_3$  та  $M_\theta$  (їх вирівнювання), що благоприємно впливає на роботу всієї споруди цілком. Менш за все вплив повзучісті бетону відобразився на розподілі меридіональних та кільцевих розтягуючих зусиль в оболонці які для двох варіантів розрахунку були близькими.

Для уточнення картини напруженого стану в тілі циліндричної оболонки в роботі для вказаних вище трьох висотних відміток представлені епюри меридіональних напруг в бетоні по товщині стіни, а також величини напруг в арматурі яка напружується. Зі створених епюр напруг видно, що для розглядаемого жорсткого аварійного режиму врахунок деформацій повзучісті запропо-

$$t = 1082.1 \text{ сут.}$$

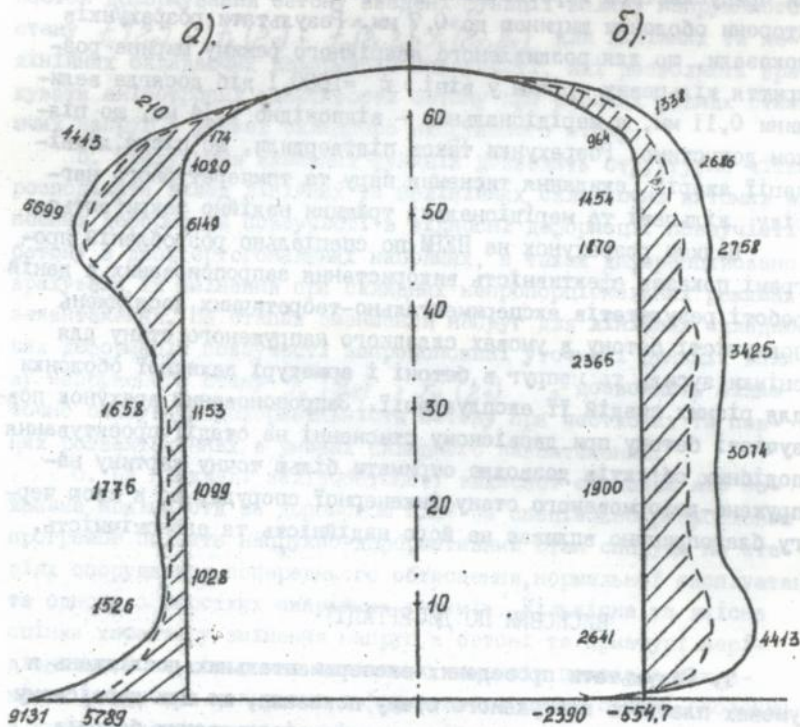


Рис. 4. Кільцеві (а) та меридіональні (б) моменти в захисній оболонці через 48 годин 24 хвил. після аварії [кН·м] :

— пружний розрахунок;

- - - розрахунок з урахуванням повзучості по виразам (4,5).

нований вище по методиці знижує величини напруг у бетоні в порівнянні з упругим розрахунком в середньому на 50%.

До елементів преднапруженої оболонки пред'являються вимоги 2-ої категорії тріщинотривкості, у відповідності з якими припускається короткочасне розкриття тріщин з наружної сторони оболонки шириною до 0,7 мм. Результати розрахунків показали, що для роздвленого аварійного режиму ширина розкриття кільцевих тріщин у віці  $t = 1080,1$  діб досягла величини 0,11 мм, а меридіональних - відповідно 0,14 мм, що цілком допустимо. Розрахунки також підтвердили, що після ліквідації аварії скидання тиснення пару та температурного нагріву кільцеві та меридіональні тріщини надійно закриваються.

Цілком розрахунок на ПЕРМ по спеціально розробленій програмі показав ефективність використання запропонованих в даній роботі результатів експериментально-теоретичних досліджень повзучості бетону в умовах складного напруженого стану для оцінки зусиль та напруг в бетоні і арматурі захисної оболонки для різних стадій її експлуатації. Запропонований врахунок повзучості бетону при двовісному стисненні на стадії проектування подібних об'єктів дозволяє отримати більш точну картину напружено-деформованого стану інженерної споруди, що в свою чергу благоприємно впливає на його надійність та економічність.

## ВИСЬОВИ ПО ДИСЕРТАЦІЇ

1. Результати проведених експериментальних досліджень в умовах плаского напруженого стану показали, що при двовісному стисненні, як для ізольованих, так і неізольованих бетонів в молодому та зрілому віках при високих рівнях стискуючих напруг значний вплив на деформації повзучості в одному напрямі робить наявність напруг в другому ортогональному напрямі.

2. Для досліджуваного широкого спектру рівней стискуючих напруг відзначена нелінійна залежність деформацій повзучості бетону від додаваних величин стискуючих напруг. Деформації повзучості в напрямі меншої напруги  $\epsilon_y$  при постійних величинах напруги  $\epsilon_x$  по мірі зросту напруги  $\epsilon_y$  "переходять" з галузі розтягнення в галузь стиснення.

3. Для всіх досліджених простих та непропорціональних режимів навантаження існуючі різновиди нелінійної теорії повзучості бетону при плоскому напруженому стані незадовільно відображають особливості його деформування.

4. За підставою виявлених в іспитах фізичних закономірностей деформування бетону введені функції впливу напруженого стану  $f_x'(z_y)$ ,  $f_x''(z_y)$ ,  $f_y'(z_x, z_y)$ ,  $f_y''(z_x, z_y)$  для лінійних та нелінійних складючих деформацій повзучості, які дозволяють врахувати анізотропні властивості бетону при високих рівнях стискуваних напруг в умовах складного напруженого стану.

5. Врахування вказаних функцій дозволить структурно чітко розподілити вклад лінійних та нелінійних складючих питомих відносних деформацій повзучості в відносні деформації повзучості бетону в двох ортогональних напрямках, а також диференційовано врахувати їх змінення при складних непропорціональних режимах завантаження. На етапах зменшення напруг для лінійних складючих деформацій повзучості запропоновані уточнені функції впливу напруженого стану  $f_x^{(1)}(z_y)$ ,  $f_y^{(1)}(z_x)$ , дозволяють більш точно описувати деформативність бетону при часткових та повних розвантаженнях в умовах складного завантаження.

6. На прикладі залізобетонної захисної оболонки АМ показана можливість за допомогою ПЕРМ за спеціально розробленою програмою оцінити напружно-деформативний стан споруди на стадіях спорудження, попереднього обтиснення, нормальної експлуатації та одного з жорстких аварійних режимів. Кількісна та якісна оцінки характеру змінення напруг в бетоні та арматурі меридіональних та кільцевих згинаючих моментів показала важливість уточнення напружено-деформованого стану січень оболонки з врахуванням запропонованих у даній роботі вражень.

7. Проведене у даній роботі порівняння двох варіантів розрахунку показало ефективність використання запропонованих аналітичних можливостей, які привели до істотного зменшення зусиль та напруг в бетоні, та арматурі в результаті їх релаксації, отже можливість означеного зменшення матеріальних та енергосатрат на спорудження та експлуатацію таких споруд без зниження жорстких вимог до їх надійності та безпеки.

Основний зміст дисертації надрукован у роботах:

1. Кириллов А.П., Багрий Э.Я., Завялов В.Н., Кузьменко Ю.В., Кукуш А.Л. Ползучесть тяжелого бетона в условиях двухосного сжатия //Деп. в ВНИИС. № 9754. 1989.
2. Багрий Э.Я., Завялов В.Н., Кукуш А.Л. Учет ползучести бетона при двухосном сжатии для расчета железобетонных конструкций инженерных сооружений //Совершенствование железобетонных конструкций, работающих на сложные виды деформаций, и их внедрение в строительную практику: Тез. докл.Республ.конф. - Полтава: 1989. - Часть 1. С. 3-5.
3. Кириллов А.П., Багрий Э.Я., Завялов В.Н., Кузьменко Ю.В., Кукуш А.Л. Особенности длительного режимного деформирования бетона при сложном напряженном состоянии применительно к расчету защитных оболочек АЭС. //Деп. в ВНИИТПИ. № 10247. 1989.
4. Кириллов А.П., Багрий Э.Я., Завялов В.Н., Кукуш А.Л. Ползучесть бетона при его сложном напряженном состоянии // Энергетическое строительство. - 1990. - № 12. - С.62-63.
5. Кириллов А.П., Багрий Э.Я., Завялов В.Н., Кукуш А.Л., Кулаков С.В. Оценка напряженного состояния защитной оболочки АЭС на стадии возведения и нормальной эксплуатации // Энергетическое строительство. - 1991. - № 5. - С.53-54.
6. Кириллов А.П., Кукуш А.Л., Багрий Э.Я., Завялов В.Н. Особенности нелинейного деформирования бетона при высоких уровнях напряжений сжатия в условиях сложного напряженного состояния //Бетон и железобетон. - 1992. - № 8. - С.4-6.
7. Багрий Э.Я., Завялов В.Н., Кукуш А.Л., Кулаков С.З. Анализ напряженного состояния защитной оболочки АЭС на стадиях возведения и нормальной эксплуатации. //Деп. в УкрИНТЭА. № 420. 1993.



СДАНО В ПРОИЗВОДСТВО 28.04.91. ФОРМАТ 60x90/16.  
ОФС. ПЕЧ. ТИРАЖ 100. ЗАКАЗ 214. УЧ.-ИЗД. А. 1,5.  
ЦЕНТРИ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
ЦЕХ ОПЕРАТИВНОЙ ПОЛИГРАФИИ  
340000, г. ДОНЕЦК, ул. АРТЕМА, 60



1109218

AB 29.763

**AB 29.763**