Источник: Совгира, В. В. Полные равновесные диаграммы деформирования одноосно сжатого и растянутого бетона / В. В. Совгира // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. Дветм науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. - Минск, 2016. - Вып. 8. - С. 270-289. https://doi.org/10.23746/2016-8-16

- Совгира Василиса Васильевна, ассистент кафедры, Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса (Украина)
- Vasilisa Sovgira, assistant of the department, Odessa State Academy of Construction and Architecture, Odessa (Ukraine)

# ПОЛНЫЕ РАВНОВЕСНЫЕ ДИАГРАММЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОДНООСНО СЖАТОГО И РАСТЯНУТОГО БЕТОНА

## FULL EQUILIBRIUM DIAGRAMS OF MONOAXIAL COMPRESSED AND STRETCHED CONCRETE DEFORMATIONS

#### АННОТАЦИЯ

Приведены результаты исследований деформирования и разрушения одноосно сжатого тяжелого бетона при «мягком» и «жестком» режимах нагружения. Выполнен анализ его прочностных и упругопластических свойств с учетом влияния значимых факторов и их изменение с ростом нагрузки.

Реализованы экспериментальные исследования равновесных duarpaмм deфopмирования одноосного сжатого (растянутого) бетона с целью возможности их корректного трансформирования на неоднородно сжатый бетон внецентренно нагруженных и изгибаемых конструкций, что очень важно при их проектировании с учетом обеспечения длительной, надежной и безопасной эксплуатации. Обоснован выбор феноменологической зависимости между напряжениями и деформациями (продольными и поперечными) и дано описание полных равновесных диаграмм сжатия (растяжения) бетона аналитическими выражениями при кратковременном действии центрально приложенной нагрузки.

Предложены полные равновесные диаграммы деформирования одноосно сжатого (растянутого) бетона и изменения упругопластических свойств одноосно сжатого и растянутого бетона исследованных прочностей с описанием их относительно простыми, не громоздкими аналитическими выражениями, моделирующими поведение бетона с появлением нисходящего участка диаграммы  $\sigma_c - \varepsilon_c$  при действии кратковременной нагрузки.

Определены зависимости нелинейного изменения секущего модуля деформаций и коэффициента упругости одноосно сжатого бетона, отражающие процессы деструкций (зарождения и интенсивного роста трещин) на макро-, микро- и субмикроуровнях структуры цементного камня и бетона, обусловливающие накопление и развитие пластических псевдодеформаций с ростом уровня нагрузки. Параметры нелинейных диаграмм изменения секущего модуля деформаций и коэффициента упругости отражают нелинейный характер диаграммы  $\sigma_{-\varepsilon}$  деформирования бетона как выражения, характеризующие упругопластические свойства, входящие в состав аналитических зависимостей  $\sigma_{-\varepsilon}(\varepsilon)$ .

#### ABSTRACT

The results of studies of deformation and fracture of uniaxial compression of heavy concrete with «soft» and «hard» loading are presented. The analysis of its strength and elastic-plastic properties taking into account influence of meaningful factors and their change with increasing load is held.

Experimental investigations of equilibrium diagrams of uniaxial compression deformation (tensile) of concrete for the purpose of their possible transformation to correct non-uniformly compressed eccentrically loaded concrete bent designs are realized and that is very important in their design with a view to ensuring long-term, safe and reliable operation. The choice of a phenomenological relationship between stress and strain (longitudinal and transverse) and a full description of the equilibrium diagrams compression (expansion) of concrete analytical expressions for short action centrally applied load.

Offered the complete equilibrium diagram of deformation of uniaxial compressed (stretched) of concrete and changes in the elastic and plastic properties of uniaxial compressed and stretched concrete strengths investigated with a description of their relatively simple not cumbersome analytical expressions that model the behavior of concrete with the appearance of the descending part of the diagram  $\sigma_{-}\epsilon_{c}$  short the action of loads.

The dependence of the nonlinear change secant modulus of elasticity and deformation of concrete uniaxial compression ratio, reflecting the process of destruction (the birth and rapid growth of cracks) at the macro-, micro- and submicro levels cement stone and concrete structures that contribute to the accumulation and development of plastic pseudo deformation with increasing load levels.

The parameters of nonlinear diagrams changing secant modulus of elasticity and deformations ratio reflect the non-linear nature of the chart  $\sigma_c - \varepsilon_c$  deformation as a concrete expression describing elastic-plastic properties are part of the analytical dependences  $\sigma_c(\varepsilon_c)$ .

Ключевые слова: бетон, одноосное сжатие, режим нагружения, полные диаграммы, секущий модуль, коэффициент упругости.

**Keywords:** concrete, uniaxial compression, loading mode, complete diagrams, secant modulus, coefficient of elasticity.

### введение

Структура бетона, включающая твердую фазу, поровое пространство и микротрещины с его реологическими свойствами, неоднородна, и ее изменение при заданной прочности влияет на деформативность, трещиностойкость, упруго-пластичность и другие свойства, которые учесть в явном виде при аналитическом описании экспериментальных диаграмм сжатия (растяжения) бетона – даже с использованием эмпирических выражений – сложно. А вопрос экспериментальных исследований равновесных диаграмм деформирования одноосного сжатого (растянутого) бетона или их корректного трансформирования для расчетов внецентренно сжатых (изгибаемых) конструкций является актуальным по настоящее время.

Учитывая актуальность вопроса, комплексные экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния центрально и внецентренно сжатых бетонных и железобетонных коротких колон осуществлялись с использованием механизма перераспределения потенциальной энергии с образцов, не снижая жесткости испытательного оборудования, в аккредитованной лаборатории кафедры ПСК и лаборатории кафедры строительной механики ОГАСА.

### ПРИЧИНЫ И МЕХАНИЗМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАВНОВЕСНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ КОРОТКИХ БЕТОННЫХ ОДНООСНО СЖАТЫХ КОЛОНН

Длительная, надежная и безопасная эксплуатация систем каркасных зданий и сооружений из бетонных и железобетонных конструкций в условиях влияния различных факторов обеспечивается на стадии исследований, проектирования и их эксплуатации обоснованными решениями систем аналитических выражений с использованием физико-механических характеристик материалов, нормированных при центральном сжатии и растяжении.

Выявление закономерностей нано- микро- и макроразрушений в центрально сжатом бетоне и цементном камне с реализацией полных равновесных диаграмм деформирования, характеризующих свойства материала и корректно отображающих физические процессы его разрушения [9], автором осуществлялось с использованием критериев, отражающих: характер изменения поперечных ( $\varepsilon_{cy}$ ), продольных ( $\varepsilon_{cx}$ ) и объемных ( $\theta_c$ ) деформаций; коэффициента Пуассона ( $\nu$ ); времени распространения ультразвука ( $\Delta t; f_{crc}^{o}; f_{crc}^{v}$ ) на различных уровнях механических испытаний коротких бетонных колонн [9], включая серии призм ( $100 \times 100 \times 400$  мм) в возрасте 180 дней из тяжелого и мелкозернистого бетона [9; 12] призменной прочностью  $f_{crn,15}$ = 18,5; 38,2; 62,0 МПа.

Многочисленные экспериментальные исследования однородно и неоднородно сжатого бетона показывают, что развитие деформаций бетона с ростом нагрузки и форма диаграммы  $\sigma_c - \epsilon_c$  зависит от ряда важных факторов, включая вид напряженного состоянии и режим нагружения, т.е. скорости подачи напряжений  $v_{\sigma} = d\sigma/dt = const$  при так называемом «мягком» нагружении. Достижение напряжений  $\sigma_c = f_c$  с соответствующей деформацией  $\varepsilon_{cl}$  приводит к быстрому исчерпанию несущей способности и невозможности фиксирования нисходящего участка кривой  $\sigma_c - \varepsilon_c$ .

При «жестком» нагружении образцов с обеспечением постоянной скорости деформирования v<sub> $\mathcal{E}$ </sub> =  $\varepsilon/dt$  = const после достижения максимального напряжения  $\sigma_c = f_c$ , которому соответствует деформация  $\varepsilon_{cl}$ , наблюдается нисходящий участок диаграммы  $\sigma_c - \varepsilon_c$ . Дальнейший рост деформаций сопровождается падением величины напряжений  $f_c > \sigma_c$ , которому соответствует предельная деформация  $\varepsilon_{cul} > \varepsilon_{cl}$ .

Методика проведения экспериментов с использованием испытательных машин, обеспечивающих «жесткое» нагружение образцов, и построения равновесных диаграмм на основе результатов эксперимента отсутствует. Чтобы обеспечить постоянную скорость деформирования  $v_{\varepsilon} = d\varepsilon/dt = const$ , исследователи стран СНГ разрабатывают дополнительное оборудование к имеющимся испытательным машинам. За рубежом используется современное автоматизированное сервоуправляемое оборудование с обратной связью, позволяющее контролировать перемещения и обеспечивать нагружение с контролируемой скоростью деформирования, которое эквивалентно «жесткому» режиму.

По вопросу качества этого оборудования и возможности с помощью его корректного обеспечения контроля и реализации постоянной скорости деформирования v $_{\mathcal{E}}=d\mathcal{E}/dt=const$  исследователи выражают противоречивые мнения.

Определение физико-механических характеристик бетона по методике [1] не учитывает влияния упругой энергии, накапливаемой в системе «испытательная машина-образец». Испытательные машины разной жесткости обладают различной способностью накапливать потенциальную энергию и высвобождать ее в процессе деформирования и разрушения образцов, вызывая динамический эффект разной интенсивности разрушения бетона в уровнях  $0,75f_c \leq f_c > \sigma_c$ . Равновесный характер деформирования и разрушения бетонного образца предложено авторами [6] выражать формулой

$$GA \ge Q_0 + Q_{M} \tag{1}$$

где Q<sub>0</sub>, Q<sub>м</sub>,-потенциальная упругая энергия, накапливаемая, соответственно, в образце и испытательной машине; G-энергия

разрушения бетонного образца; А–площадь поперечного сечения образца. При несоблюдении условия (1) избыточная потенциальная энергия в системе «испытательная машина–образец», превращаясь в кинетическую энергию на верхнем уровне  $f_{crc}^{v}$  трещинообразования [3], вызывает интенсивное развитие псевдопластических деформаций в бетоне (раскрытие трещин, их рост и слияние в участки формирующихся магистральных трещин, деление образца на фрагменты) и лавинообразное разрушение [9].

Чтобы создать условия стабильного и равновесного характера деформирования и разрушения бетонного образца с учетом накапливаемой потенциальной энергии в системе «испытательная машина – образец», необходимо предусмотреть перераспределение с образца часть потенциальной энергии с помощью специального механизма, которое отражено в откорректированном выражении (2):

$$GA \ge (Q_{\kappa} + Q_{o}) + Q_{M}$$
(2)

где  $Q_{\kappa}$ -потенциальная упругая энергия, воспринимаемая кондуктором мощностью  $Q_{\kappa} \ge 2...4Q_{o} = 2...4 \cdot (G \cdot A)$  в зависимости от прочности бетона.

Для обеспечения равновесного деформирования и разрушения бетонных образцов автором разработан и реализован упругий кондуктор (по принципу пружинного динамометра), устанавливаемый в стандартную испытательную машину ПСУ-250, который нейтрализует часть накапливаемой потенциальной энергии, не снижая жесткости системы «испытательная машинаобразец» и способствует перераспределению нагрузки, подаваемой машиной, между плитами кондуктора и образцом. Образцы испытывали с кондуктором и без кондуктора кратковременной статической нагрузкой до разрушения, используя индивидуальную оснастку крепления приборов (индикаторов часового типа, ультразвуковых щупов) на поверхности образцов и кондукторе. Давление на образец передавалось через жесткие металлические плиты кондуктора с ножевыми шарнирами. Испытания производились по стандартной [1] методике путем постепенного (ступенями) нагружения призм осевой сжимающей нагрузкой с 5-минутной выдержкой на каждой ступени. Величину нагрузки на каждой ступени принимали примерно  $0,1 f_{cm}$ , в уровнях до  $0,2 f_{cm}$  и после  $0,75 f_{cm}$  до  $0,9 f_{cm}$  ее уменьшали вдвое, а в уровнях от  $0,9 f_{cm} \leq f_{cm} \geq 0,7 f_{cm}$  нагрузку принимали  $0,025 f_{cm}$  и  $0,0125 f_{cm}$ .

#### АНАЛИТИЧЕСКИЕ ВЫРАЖЕНИЯ ОПИСАНИЯ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОДНООСНО СЖАТОГО И РАСТЯНУТОГО БЕТОНА

Методы расчетов изгибаемых и внецентренно сжатых бетонных и железобетонных конструкций, содержащиеся в современных нормах проектирования стран СНГ и большинства зарубежных стран, в том числе в нормах ЕКБ-ФИП, основаны на расчетных моделях, базирующихся на единых принципах, основными из которых являются гипотеза плоских сечений и диаграммы деформирования материалов. Предложенный подход позволяет с единых позиций осуществлять расчет конструкций по прочности, образованию и раскрытию трещин и по деформациям. Выполняемые исследования свидетельствуют о достаточно хорошем согласовании результатов с экспериментами, однако не имеют общей основы в расчетах при различных видах предельных состояний. В действующих строительных нормах методы расчета бетонных и железобетонных конструкций насыщены большим числом эмпирических соотношений, из-за чего зачастую приводят к потере явного физического смысла или затруднению при расчетах.

Совершенствование методик расчетов и развитие теоретических основ определения напряженно-деформированного состояния (НДС) изгибаемых и внецентренно нагруженных бетонных и железобетонных конструкций связано с уточнением физико-механических параметров бетона и их учетом в аналитических выражениях при описании диаграмм деформирования бетона при однородном напряженном состоянии и корректным трансформированием на неоднородное напряженное состояние.

Комплексные исследования в этой области продолжаются. Результаты выполненных работ [3...18 и др.] свидетельствуют, что, какой бы полной ни была информация о поведении одноосно сжатого (растянутого) бетона, она не достаточно адекватно отражает НДС неоднородно сжатого и растянутого бетона, характерного для сжатой и растянутой зоны изгибаемых и внецентренно нагруженных бетонных и железобетонных конструкций. Правомерность переноса результатов диаграмм зависимости  $\sigma_c - \varepsilon_c (\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct})$  одноосно сжатого (растянутого) бетона на неоднородно нагруженный (при изгибе и внецентренном сжатии) исследователями оспаривается.

Учитывая важность для практики установления надежной связи между  $\sigma_{c,e}$  и  $\varepsilon_{c,e}$  бетона в условиях НДС (внецентренное сжатие), проведены исследования сопротивления центральному и внецентренному сжатию масштабно подобных коротких колонн из обычного тяжелого бетона призменной прочностью ( $f_{cm,15} = 18.5$ ; 38.2; 62.0 МПа) и с целью исключения влияния неоднородности материала образцов – мелкозернистого бетона широкого диапазона прочностей по методике, изложенной в работах [9, 12...14]. В этой работе изложены результаты исследований только одноосно сжатого тяжелого бетона.

Анализ имеющихся в литературе экспериментальных данных [3...18 и др.] и результаты опытов авторов [9...14] позволили обнаружить ряд принципиальных особенностей, характеризующих упругопластические свойства бетона в процессе его деформирования при кратковременном одноосном сжатии.

Описание диаграмм сжатия бетона в аналитической форме, учитывающей разнообразие влияющих факторов: возраста, вида, состава и прочности бетона; режима нагружения: кратковременного (при постоянной скорости подачи напряжений  $v_{\sigma} = d\sigma/dt = const$ или при постоянной скорости деформирования  $v_{\varepsilon} = d\varepsilon/dt = const$ ) и длительного; эксцентриситета приложения нагрузки; высоты сечения образцов и др., – сопряжено с известными трудностями.

В настоящее время имеется большое число предложений, рассмотренных в работах [4...18 и др.], для описания диаграмм деформирования бетона, но только для условий простейших нагружений–стандартного кратковременного сжатия, и немногочисленных–растяжения.

Рассмотренные в работах [4...18 и др.] аналитические зависимости  $\sigma_c - \varepsilon_c$  и  $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$  деформирования бетона дают более или менее хорошее совпадение с опытом. Однако при описании ниспадающего участка кривой используется ряд многочленов, не всегда отражающих физические свойства и состояние однородно и неоднородно сжатого бетона, а аппроксимирующие функции не всегда удовлетворяют некоторым феноменологическим закономерностям его деформирования.

Обобщение экспериментальных данных о деформировании одноосно сжатого тяжелого бетона (ТБ), содержащихся в литературе, и результатов наших опытов позволило установить характерный для этого напряженного состояния вид функции  $\sigma_c f(\varepsilon_c)$ .

Поскольку из уравнения  $\sigma_c f(\varepsilon_c)$  обычно исключают t,  $v_{\sigma}$  (или  $v_{\varepsilon}$ ), оно для условий кратковременного сжатия должно содержать, как минимум, координаты одной точки, принадлежащей фактической кривой (например,  $\sigma_c = f_{cm}$  и  $\varepsilon_{cl}$ ), не считая начала координат. Учитывая феноменологические требования к зависимости  $\sigma_c - \varepsilon_c$  (при  $\sigma_c \rightarrow 0$ ,  $d\sigma_c / d\varepsilon_c = E_{cm}$  и при  $\sigma_c = f_{cm}$ ,  $d\sigma_c / d\varepsilon_c = 0$ ), уравнение касательного модуля деформаций при стандартном кратковременном сжатии предложено [18] в виде

$$E_{c} = d \sigma_{c} / d \varepsilon_{c} = E_{cm} \left[ 1 - \sigma_{c} / f_{cm} \right]^{1 - \mathbf{n}_{cu}}$$
(3)

где  $E_{cm}$ -начальный модуль упругости,  $E_{cm} = \sigma_c/d\varepsilon_c = tg\alpha_{o;} \mathbf{n}_{cu}$ -предельный коэффициент упругости центрально сжатого бетона:  $\mathbf{n}_{cu} = f_{cm}/E_{cm} \cdot \varepsilon_{cl}$ . Решением дифференциального уравнения (3) с учетом начальных условий  $\sigma_c = 0$  и  $\varepsilon_c = 0$  для  $\mathbf{n}_{cu} \neq 1$  получим удобные для применения зависимости:

$$\sigma_{c}(r) = f_{cm}(r) \left[1 - \left[1 - \varepsilon_{c}(r) / \varepsilon_{cl}(r)\right]^{1/\mathbf{n}_{cu}}\right], \tag{4}$$

$$\varepsilon_{c}(r) = \varepsilon_{cl}(r) \left[1 \mp \left[1 - \sigma_{c}(r) / f_{cm}(r)\right]\mathbf{n}_{cu}\right], \tag{5}$$

в которых  $\varepsilon_{cl}(r)$  – предельные продольные относительные деформации, зависящие от прочности одноосно сжатого ТБ  $f_c$ , размеров сечения призматических образцов – условного радиуса сечения (r), равного отношению площади сечения образца к его периметру. Знак (–) используется на восходящем участке диаграммы  $\sigma_c - \varepsilon_c$ , а знак (+) – на нисходящем участке диаграммы  $\sigma_c - \varepsilon_c$ .

Напряжения  $\sigma_c(r)$ , вычисленные по формуле  $\sigma_c(r) = \varepsilon_c(r) \cdot \mathbf{n}_c \cdot E_{cm}(r)$  с использованием выражений (5, 9 и 10) близки (отклонение

0...+6%) напряжениям, определенным по формуле (4), что позволяет осуществлять контроль расчетной величины изменения  $\sigma_c(r)$  на восходящем и нисходящем участках диаграмм с ростом нагрузки.

Зависимость  $\varepsilon_{cl} f(f_{cm}(r))$  для кратковременного сжатия в работах [13;14] аппроксимирована выражением  $\varepsilon_{cl}(r) = f_{cm}(r) / (E_{cm}, \mathbf{n}_{cu})$ , в котором  $f_{cm}(r)$  – временное сопротивление осевому сжатию призматических образцов из ТБ с учетом влияния масштабного эффекта в [13; 14] аппроксимировано выражением  $f_{cm}(r) = f_{cm15}$  (4,25+ r)/(3,5+1,2r), где  $f_{cm15}$  – временное сопротивление сжатию стандартных базовых призм сечением 150 х 150 мм, МПа;  $E_{cm}(r)$  – начальный модуль упругости при осевом сжатии (в МПа), который зависит от прочности ТБ и аппроксимирован [13; 14] выражением  $E_{cm}(r) = (74000 \cdot f_{cm15})/(24 + f_{cm15})$ ;  $\mathbf{n}_{cu}$  – уточненный в [13; 14] предельный коэффициент упругости центрально сжатых базовых призм из ТБ –  $\mathbf{n}_{cu}(r) = (19 + f_{cm15}) / (102 + 0.4 f_{cm15})$ . Изменение коэффициента упругости  $\mathbf{n}_c$  с ростом нагрузки при одноосном сжатии (растяжении) аппроксимировано выражением (10).

Учитывая мнение многих исследователей, что между диаграммами сжатия и растяжения бетона наблюдается некоторая количественная и качественная связь, то для аппроксимации экспериментальных кривых  $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$  одноосно растянутого бетона возможно использовать аналитические зависимости вида (4 и 5), выполнив замену показателей характеристик сжатого бетона  $\sigma_{c}$ (r);  $f_{cm}(r)$ ;  $\mathbf{n}_{cu}$ ;  $\varepsilon_c(r)$ ;  $\varepsilon_{cl}(r)$  на параметры растянутого бетона  $\sigma_{ct}$ ;  $f_{cm}$ ;  $\mathbf{n}_{cu}$ ;  $\varepsilon_{ct}$ ;  $\varepsilon_{ctl}$ . Характеристики растянутого бетона определены по рекомендованным [17] выражениям: прочность бетона при растяжении –  $f_{ctm10} = 0,28 f_{cm10}^{0,53}$ , где  $f_{cm10}$  – прочность бетона одноосно сжатых призм размерами  $10 \times 10 \times 40$ см; предельный коэффициент упругости –  $\mathbf{n}_{ctu} = 0,561 f_{ctm}^{1/6}$ ; предельная деформация при осевом растяжении –  $\varepsilon_{ctl} = 5,35 \cdot 10^{-5} f_{ctm}^{1/2}$ ; начальный модуль деформаций бетона при осевом растяжении –  $E_{ctm10} = 33,4 \cdot 10^3 \cdot f_{ctm10}^{1/3}$ , в которых числовые значения перед  $f_{ctm}$  и показатели степени – безразмерные коэффициенты, постоянные для ТБ.

Проверка адекватности выражений (4, 5) для одноосно сжатого и растянутого бетона по Фишеру показала, что они достоверны при 5% уровне значимости для исследованного диапазона прочности ТБ.

На рис. 1*а*, б показаны опытные и теоретические диаграммы зависимости  $\sigma_c - \varepsilon_c$  центрально сжатого и  $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$  одноосно растянутого бетона, аппроксимированные функциями (4, 5), и диаграммы зависимости  $\sigma_{cp} - \varepsilon_{pt}$  и  $\sigma_{cpt} - \varepsilon_{pt}$  в поперечном направлении (рис. 1*в*, *г*) – функциональными выражениями (6 и 7) с использованием опытных  $\varepsilon_{cl}(\varepsilon_{ctl})$  и вычисленных  $\varepsilon_{cl}(r)$ ; ( $\varepsilon_{ctl}(r)$ ) по формулам. Анализ опытных и теоретических значений  $\sigma_c(\sigma_{ct})$  показывает, что они близки, а во многих случаях совпадают.

Преобразованная зависимость (4) аналогична по виду выражению, предложенному Сен-Венаном для описания распределения напряжений по высоте сечения балки из материала с нелинейной связью  $\sigma_c - \varepsilon_c$ .

Формула (4) рекомендована [4] для описания восходящего участка диаграммы  $\sigma_c - \varepsilon_c$  кратковременного сжатия бетона лишь при значении  $\mathbf{n}_{cu} = 0,5$ .

Учитывая единство природы деформирования, корреляционную зависимость  $\sigma_c - \varepsilon_c$  сжатого бетона наших экспериментов и выполнив анализ исследований зависимости  $\sigma_{ct} - \varepsilon_{ct}$ растянутого бетона [11; 17 и др.], пришли к выводу, что корреляционная зависимость поперечных деформаций при сжатии  $\sigma_{cp} - \varepsilon_{pc}$  и растяжении  $\sigma_{cpt} - \varepsilon_{pt}$  также может быть аппроксимирована выражениями вида (4, 5) при некотором их видоизменении и, представлена для  $\sigma_{cp} - \varepsilon_{pc}$  при центральном сжатии бетонных коротких колонн формулами

$$\sigma_{cp} = f_{cpm} \cdot [1 - [1 - \varepsilon_{pc} / \varepsilon_{pl}]^{1/\mathbf{n}_{pu}}], \qquad (6)$$

$$\varepsilon_{pc} = \varepsilon_{pl} \cdot [1 + [1 - \sigma_{cp} / f_{cpm}] \mathbf{n}_{pu}], \qquad (7)$$

в которых  $\sigma_{cp,} f_{cpm} = f_{cm} / 2$ -напряжение и прочность бетона в поперечном направлении при одноосном сжатии бетонных призм;  $\mathbf{n}_{pu} = \mathbf{n}_{cu}$ -предельный коэффициент упругости в поперечном направлении одноосно сжатого бетона;  $\varepsilon_{pc}$ -поперечные деформации при центральном сжатии бетона;  $\varepsilon_{pl}$ -предельные поперечные деформации при одноосном сжатии бетона, получаемые из опытов или из выражения  $\varepsilon_{pl} = -\varepsilon_{cl}\mu_{cl}$ , в котором коэффициент Пуассона  $\mu_{cl}$  в уровне нагрузки  $\sigma_c = f_{cm}$  равен – 0,42; 0,44; 0,46, соответственно, для исследованных прочностей бетона  $f_{cm,10} = 19,2$ ; 39,7; 64,4 МПа.

Напряжения  $\sigma_{cp}(r)$  в поперечном направлении, вычисленные по формуле (6), совпадают с напряжениями, определенными по формуле  $\sigma_c(r) = \varepsilon_{pc}(r) \cdot \mathbf{n}_{pc} \cdot E_{pcm}(r)$  с использованием выражений (7, 9 и 10). На рис. 1*в* приведены графики полных диаграмм поперечного

На рис. 1*в* приведены графики полных диаграмм поперечного деформирования при одноосном сжатии (*в*) бетонных призм исследованных прочностей ТБ.

Корреляционная связь поперечных деформаций при центральном растяжении  $\sigma_{cpt} - \varepsilon_{pt}$  также аппроксимируется выражениями вида (6, 7), в которых необходимо осуществить замену показателей механических и деформационных характеристик в поперечном направлении  $\sigma_{cp}$ ;  $f_{cpm}$ ;  $\varepsilon_{pc}$ ;  $\varepsilon_{pl}$ ;  $\mathbf{n}_{pu}$  центрально сжатого бетона на параметры в поперечном направлении одноосно растянутого бетона $-\sigma_{cpt}$ ;  $f_{cpi}$ ;  $\varepsilon_{pl}$ ;  $\mathbf{n}_{cpu}$ .

бетона –  $\sigma_{cpl}$ ;  $f_{cpl}$ ;  $\varepsilon_{pl}$ ;  $\varepsilon_{pll}$ ;  $\mathbf{n}_{cpu}$ . Механические и деформационные характеристики в поперечном направлении центрально растянутого бетона – из-за малого числа экспериментальных данных – можно вычислить по рекомендованным [17] выражениям:  $\sigma_{cpl}$ ,  $f_{cpl} = f_{ctm}/2$ –напряжение и прочность бетона в поперечном направлении при одноосном растяжении бетона;  $\varepsilon_{pl}$ – поперечные деформации центрально растянутого бетона;  $\varepsilon_{pl}$ – предельные поперечные деформации при одноосном растяжении бетона, получаемые из опытов или из выражения  $\varepsilon_{pl} = -\varepsilon_{ct}\mu_{cl}$ , в котором коэффициент Пуассона  $\mu_{cl}$  в уровне нагрузки  $\sigma_{ct} = f_{ctm}$  равен–0,47 для диапазона прочности одноосно растянутого бетона  $f_{ctm} = 1,341$ ; 1,969; 2,546 МПа исследованных бетонов призменной прочностью  $f_{cm,10} = 19,2$ ; 39,7; 64,4 МПа;  $\mathbf{n}_{cpu} = \mathbf{n}_{ctu}$ –предельный коэффициент упругости в поперечном направлении одноосно растянутого ТБ.

На рис. 1*в*, *г* показаны опытные и теоретические диаграммы зависимости  $\sigma_{cp} - \varepsilon_{pc}$  и  $\sigma_{cpt} - \varepsilon_{pt}$  в поперечном направлении центрально сжатого и растянутого бетона, аппроксимированные функциональными выражениями (6, 7). Анализ опытных и теоретических значений  $\sigma_{cp}$ ( $\sigma_{pc}$ ) показывает, что они близки, а во многих случаях совпадают.

Проверка адекватности выражений (6, 7) для  $\sigma_{cp} - \varepsilon_{pc}$  одноосно сжатого и  $\sigma_{cpt} - \varepsilon_{pt}$  растянутого бетона по Фишеру показала, что они

достоверны при 5% уровне значимости для исследованного диапазона прочности ТБ.

Начальный модуль упругости ( $E_{cm}$ ) равен тангенсу угла наклона касательной к кривой  $\sigma_c - \varepsilon_c$  в начале координат (при  $\sigma_c \rightarrow 0$  $u \varepsilon_c \rightarrow 0$ ), являющейся также предельным положением для секущей к этой кривой:

$$E_{cm} = tg\alpha_o = \lim_{\sigma \to 0} \sigma_c / \varepsilon_c = \lim_{\sigma \to 0} tg\alpha^k = \lim_{\sigma \to 0} E^k_c =$$

$$= E_{cm} \left[1 - \sigma_c / f_{cm}\right]^{1-\text{ncu}} = \lim_{\sigma \to 0} tg\alpha^s = \lim_{\sigma \to 0} E^{sek}_c,$$
(8)

где  $E_{cm}$  и  $E_{cm}^{k}$  – начальный и касательный модуль упругости, угол  $\alpha_{O}$  и  $\alpha^{k}$  устанавливаются по опытной кривой  $\sigma_{c} - \varepsilon_{c}$ , описанной аналитическими выражениями (4, 5) восходящего участка диаграммы  $\sigma_{c} - \varepsilon_{c}$  одноосно сжатого бетона.



**Рисунок 2.** Начальный *E*<sub>cm</sub>, касательный *E*<sup>k</sup><sub>c</sub> и секущий *E*<sup>sek</sup><sub>c</sub> модули деформаций бетона при кратковременном сжатии образцов с ростом нагрузки по результатам опытов [9, 12...14];

1-диаграммы деформирования одноосно сжатого бетонных образцов сечением 10х10 см с начальным E<sub>cm</sub>, касательным E<sup>k</sup><sub>c</sub> и секущим E<sup>sek</sup><sub>c</sub> модулем упругости; 2 – опытные значения бетонных образцов серии В прочностью, f<sub>cm10</sub> = 39,7 МПа Из зависимости (8) следует, что наибольшее приближение секущего модуля упругости ( $E^{sek}_{c}$ ) к касательному ( $E_{c}$ ) или начальному ( $E_{cm}$ ) возможно при малых величинах напряжений  $\sigma_c = 0,05...0,3 f_{cm}$  при которых по восходящей кривой  $\sigma_c - \varepsilon_c$  (рис. 2), согласно рекомендациям [1] определяются их значения. Допуская, что бетон на этом участке кривой  $\sigma_c - \varepsilon_c$  подчиняется линейному закону и зависимость между напряжениями и деформациями выражена в виде  $\sigma_c = \varepsilon_c \cdot E_{cm}$ , то, учитывая (3, 4, 5 и 8) получим условие –  $\sigma_c = \varepsilon_c \cdot E^{sek}_c = \varepsilon_c^l \cdot E_{cm}$ . Подставляя в отмеченное условие значения  $\varepsilon_c^l$  и  $\varepsilon_c$  из (5), получаем возможность установить выражение, характеризующее изменения  $\sigma_c = f_{cm}$  и  $\varepsilon_c = \varepsilon_{cl}$  и нисходящей кривой  $\sigma_c - \varepsilon_c$  до достижения  $\sigma_c = \varepsilon_{cul}$ 

$$E_{c}^{sek} = \sigma_{c} / \varepsilon_{cl} \cdot [1 \mp [1 - \sigma_{c} / f_{cm}]^{\mathbf{n}_{cu}}], \qquad (9)$$

где  $\mathbf{n}_{cu}$ – предельный коэффициент упругости центрально сжатого бетона; знак (–) используется на восходящем участке кривой  $\sigma_c - E^{sek}_{c}$ , а знак (+) – на нисходящем участке.



Рисунок 3. Изменение секущего  $E^{\text{sek}}_{c}$  модуля деформаций (*a*) и коэффициента упругости (*б*)  $\mathbf{n}_{c}$  с ростом нагрузки исследованных серий А, В и С тяжелого бетона прочностью  $f_{cm.10} = 19,2;$  39,7; 64,4 Мпа



и  $\sigma_{ct} - \mathcal{E}_{ct}(6)$ ;  $\sigma_{cpt} - \mathcal{E}_{pt}(\Gamma)$  одноосно растянутого бетона, где B - зависимости  $\sigma_{cp} - \mathcal{E}_{pc}$ поперечного деформирования

при центральном сжатии бетонных элементов и г-зависимости  $\sigma_{\rm c}$  поперечного деформирования при одноосном растяжении;

cpt

Рисунок 1. Диаграммы зависимости  $\sigma_{o}^{}$  -  $\mathcal{E}_{o}^{}$  (a);  $\sigma_{oo}^{}$  -  $\mathcal{E}_{
ho_{o}}^{}$  (в) центрально сжатого

1 – опытные значения образцов серий А, В и С прочностью, соответственно,  $f_{milo}^{}$  = 19,2; 39,7; 64,4 МПа, размерами 100х100х400 мм:

2 – кривые по выражениям (4 ...7)

На рис. За приведены графики изменения секущего модуля *E<sup>sek</sup>* с ростом нагрузки для исследованных прочностей бетона. Зависимости (4, 5, 6, 8 и 9) позволяют выразить коэффициент

Зависимости (4, 5, 6, 8 и 9) позволяют выразить коэффициент упругости **n**, отражающий процесс нарушения упругопластических свойств структуры одноосно сжатого бетона с ростом нагрузки на восходящем и нисходящем участках равновесных диаграмм деформирования бетона.

Преобразование выражения  $\mathbf{n}_c = \varepsilon_c^l / \varepsilon_c$  позволяет получить формулу изменения коэффициента упругости с ростом нагрузки в виде

$$v_{c} = \frac{v_{cu} \cdot \sigma_{c}(r)}{f_{cm}(r)} / \left[ 1 \mp \left[ 1 - \sigma_{c}(r) / f_{cm}(r) \right]^{v_{cu}} \right].$$
(10)

На рис. Зб приведены графики изменения коэффициента упругости  $\mathbf{n}_c$  с ростом нагрузки, отражающие процессы разуплотнения технологически образовавшихся вакансий, дислокаций наномикропор внутри кристаллов, а также микропор и трещин цементного камня, включая микро- и макродефекты структуры бетона [9] до уровня  $f_{crc}^{\nu}$  восходящего участка равновесной диаграммы  $\sigma_c - \varepsilon_c$  и диссипативные процессы интенсивного развития микро- и макротрещин в цементном камне и бетоне со слиянием их в фрагменты формирующихся магистральных трещин и расслоение образца на фрагменты на нисходящем участке равновесной диаграммы деформирования бетона.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование упругого кондуктора в системе «испытательная машина – образец» и контроль процесса интенсивности развития деструкций в структуре бетона с помощью УКБ обеспечивают перераспределение с образца части накапливаемой потенциальной энергии (2), не снижая жесткости системы «испытательная машина – образец», и своевременную реакцию на уровень нагрузки, моделируя, таким образом, сервоуправляемость испытательного оборудования. Используемая методика позволила реализовать равновесное деформирование одноосно сжатого бетона, нейтрализовать процесс преждевременного «лавинообразного» разрушения бетонных образцов на нисходящих участках диаграмм деформирования и экспериментально получать параметры полных равновесных диаграмм  $\sigma_c - \varepsilon_c$ .

Обоснован выбор феноменологической зависимости между напряжениями и деформациями (продольными и поперечными) и предложено описание полных равновесных диаграмм сжатия (растяжения) бетона аналитическими выражениями при кратковременном действии центрально приложенной нагрузки с «жестким» режимом нагружения.

На основании выражений (3...8), определены зависимости нелинейного изменения секущего модуля деформаций и коэффициента упругости одноосно сжатого бетона, отражающие процессы развития деструкций в структуре цементного камня и бетона, обусловливающие пластические псевдодеформации и деформации быстронатекающей ползучести с ростом нагрузки.

Результаты исследований могут быть использованы при проектировании одноосно сжатых бетонных и железобетонных конструкций, а также в качестве сопоставительной оценки при совершенствовании теории деформирования и разрушения неоднородно сжатого и растянутого бетона.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- ГОСТ 24452–80. Бетоны. Методы определения призменной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона.– Москва: Изд-во стандартов, 1981.– 55 с.
- 2. ДБН В.2.6.–98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення проектування.–Київ: Мінрегіонбуд України, 2009.– 96 с.
- Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О.Я. Берг.–Москва: Стройиздат, 1962.– 96 с.
- 4. Байков, В.И. Построение зависимости между напряжениями и деформациями сжатого бетона по системе нормируемых показателей / В.И. Байков, С.В. Горбатов, З.А. Димитров // Изв. вузов. Стр-во и архитектура.– 1977.– № 6.– С. 65–71.

- 5. Бачинский, В.Я. Связь между напряжениями и деформациями бетона при кратковременном неоднородном сжатии / В.Я. Бачинский, А.Н. Бамбура, С.С. Ватагин // Бетон и железобетон.– 1984.– № 10.–С. 18–19.
- 6. Жуков, В.В. Изучение процесса разрушения бетона после пожара с использованием полных диаграмм деформирования / В.В. Жуков, В.И. Шевченко // Изв. вузов. Стр-во и архитектура.– 1988.– № 3.– С. 2–6.
- Карпенко, Н.И. Общие модели механики железобетона / Н.И. Карпенко.– Москва: Стройиздат, 1996.– 411 с.
- Кроль, И. С. Эмпирическое представление диаграмм сжатия бетона (обзор литературных источников) / Исследование в области механики измерений / И. С. Кроль // Москва: ВНИИФТРИ, 1971.–Вып. 8(38).–С. 306–326.
- Мишутин, А.В. Процесс разрушения одноосно сжатого бетона / А.В. Мишутин, В.М. Кобринец, В.В. Совгира // Вісник ОДАБА. Вип. № 55.–Одеса: ОДАБА, 2014.– С. 185–197.
- Назаренко, В.Г. Диаграмма деформирования бетонов с учетом ниспадающей ветви / В.Г. Назаренко, А.В. Боровских // Бетон и железобетон.–1999.– № 2.– С. 18–22.
- Смоляго, Г. А. К вопросу предельной растяжимости бетона / Г.А. Смоляго // Бетон и железобетон.– 2002.– № 6.–С. 6–9.
- 12. Совгира, В.В. Деформирование неоднородно сжатого мелкозернистого бетона / В.В. Совгира, Р.В. Совгира // Сборник студенческих научн. трудов, посвященных 75-летию ОГАСА.–Одесса, 2005.–С. 176–179.
- Совгира, В.Н. Об упругопластических характеристиках бетона при одноосном и внецентренном сжатии / В.Н. Совгира, В.В. Совгира // Вісник ОДАБА.–Вип. № 31.– Одеса: ОДАБА, 2008.–С. 269–274.
- Совгира, В. Н. К вопросу об аналитическом описании диаграммы деформирования бетона / В.Н. Совгира, В.М. Кобринец, В.В. Совгира // Вісник ОДАБА.–Вип. № 32.–Одеса: ОДАБА, 2008.–С. 289–297.

- 15. Узун, И.А. Реализация диаграмм деформирования бетона при однородном и неоднородном напряженных состояниях / И.А. Узун // Бетон и железобетон.– 1991.– № 8.–С. 19–20.
- Чайка, В.П. Особенности деформирования тяжелого бетона при неоднородном кратковременном сжатии / В.П. Чайка // Бетон и железобетон.– 1987.– № 1.–С. 42–43.
- 17. Ящук, В.Е. О прочности и деформациях бетона при растяжении / В.Е. Ящук, П.Г. Курган // Изв. вузов. Стр-во и архитектура.– 1980.– № 11.–С. 31–36.
- Ящук, В.Е. Опрочностиидеформацияхнеоднородносжатого бетона / В.Е. Ящук, В.Н. Совгира // Гидромелиорация и гидротехническое строительство. Респ. межвед. научнотехн. сб., 1989.–Вып. 17.–С. 107–113.
- 19. Eurocode 2: Design of concrete structures–Part 1: General rules and rules for buildings.–European Committee for standardization, 2002.– 226 c.

## REFERENCES

- GOST 24452–80. Betony. Metody opredeleniya prizmenoy prochnosti, modulya uprugosti i koeffitsienta Puassona [Concretes. Methods for determining the prism strength, elastic modulus and Poisson's ratio]. Moscow: Publishing House of Standards, 1981. 55 p. (rus)
- 2. DBN V.2.6.–98:2009. *Concrete and reinforced concrete structures. The main provisions of the design*. Kiev: Ministry of regional development Ukraine. 2009. 96 p. (ukr)
- 3. Berg O.Y. *Fizicheskiye osnovy teorii prochnosti betona i zhelezobetona* [The physical foundations of the theory of concrete and reinforced concrete strength]. Moscow: Construction publishing, 1962. 96 p. (rus)
- 4. Baykov V. I., Gorbatov S. V., Dimitrov Z. A. *Proceedings of the universities. Construction and architecture.* 1977. No. 6. pp. 65–71. (rus)
- 5. Bachinskiy V.Y., Bambura A.N., Vatagin S.S. Beton i zhelezobeton. 1984. No. 10. pp. 18–19. (rus)

- 6. Zhukov V.V., Shevchenko V.I. *Proceedings of the universities*. *Construction and architecture*. 1988. No.3. pp. 2–6. (rus)
- 7. Karpenko N. I. *Obshchiye modeli mekhaniki zhelezobetona* [General mechanics model of reinforced concrete]. Moscow: Construction publishing, 1996. 411 p. (rus)
- Krol I. S. Research on Measurement mechanics. 1971. Vol. 8 (38). pp. 306–326. (rus)
- 9. Mishutin A.V., Kobrinets V.M., Sovgira V.V. Bulletin of Odessa State Academy of Construction and Architecture. Vol.55. 2014. pp.185–197. (rus)
- 10. Nazarenko V.G., Borovskikh A.V. Beton i zhelezobeton. 1999. No. 2. pp.18–22. (rus)
- 11. Smolyago G. A. On the question of ultimate tensile concrete. *Concrete and reinforced concrete*. 2002. No. 6. pp.6–9. (rus)
- 12. Sovgira V.V., Sovgira R.V. *Deformirovaniye neodnorodno szhatogo melkozernistogo betona* [The deformation is inhomogeneous compressed fine-grained concrete] // Collection of students' scientific works devoted to the 75th anniversary of OSACA. Odessa. 2005. pp. 176–179. (rus)
- 13. Sovgira V.N., Sovgira V.V. *Bulletin of OSACA*. Vol.31. 2008. pp. 269–274. (rus)
- 14. Sovgira V.N., Kobrinets V.M., Sovgira V.V. *Bulletin of OSACA*. Vol.32. 2008. pp. 289–297. (rus)
- 15. Uzun I. A. Beton i zhelezobeton. 1991. No.8. pp. 19–20. (rus)
- 16. Chayka V. P. Beton i zhelezobeton. 1987. No. 1. pp. 42–43. (rus)
- 17. Yashcuk V.Y., Kurgan P.G. Proceedings of the universities. Construction and architecture. 1980. No. 11. pp. 31–36. (rus)
- 18. Yashcuk V.Y., Sovgira V.N. *Hydroland and Engineering*. 1989. Vol.17. pp. 107–113. (rus)
- 19. Eurocode 2: Design of concrete structures–Part 1: General rules and rules for buildings.–European Committee for standardization. 2002. 226 p.

Статья поступила в редколлегию 21.11.2016