

УДК 624.012.045

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ СТАТИКО-ДИНАМИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ В МОМЕНТ РАЗРУШЕНИЯ БЕТОННОЙ РАСТЯНУТОЙ МАТРИЦЫ

В. И. Колчунов, И. А. Яковенко

Национальный авиационный университет

просп. Космонавта Комарова, 1, корп. 5, ауд. 5.510, г. Киев, 03580, Украина. E-mail: i2103@ukr.net

Предложена расчетная модель статико-динамического деформирования железобетонной изгибаемой конструкции в момент разрушения бетонной растянутой матрицы с учетом импульсного воздействия. Приведены основные гипотезы и теоретические диаграммы деформирования бетона и арматуры для оценки эффекта импульсного воздействия на железобетонную изгибаемую конструкцию в момент разрушения бетонной растянутой матрицы. Получены зависимости для определения напряжений в растянутой арматуре и сжатом бетоне в сечении с трещиной, которые возникли бы в этой системе, если бы переход n -системы в систему $(n-1)$ осуществлялся в результате мгновенного разрушения части сечения k .

Ключевые слова: железобетонные конструкции, изгиб, расчетная модель, статико-динамическое деформирование, импульсное воздействие.

РОЗРАХУНКОВА МОДЕЛЬ СТАТИКО-ДИНАМІЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ НА ЗГІН В МОМЕНТ РУЙНУВАННЯ БЕТОННОЇ РОЗТЯГНУТОЇ МАТРИЦІ

В. І. Колчунов, І. А. Яковенко

Національний авіаційний університет

просп. Космонавта Комарова, 1, корп. 5, ауд. 5.510, м. Київ, 03580, Україна. E-mail: i2103@ukr.net

Запропоновано розрахункову модель статико-динамічного деформування залізобетонної конструкції, яка працює на згин в момент руйнування бетонної розтягнутої матриці з урахуванням імпульсного впливу. Наведено основні гіпотези і теоретичні діаграми деформування бетону і арматури для оцінки ефекту імпульсного впливу на залізобетонну конструкцію, яка працює на згин в момент руйнування бетонної розтягнутої матриці. Отримано залежності для визначення напружень в розтягнутій арматурі і стиснутому бетоні в перерізі з тріщиною, які виникли б у цій системі, якби перехід n -системи в систему $(n-1)$ здійснювався у результаті миттєвого руйнування частини перерізу k .

Ключові слова: залізобетонні конструкції, згин, розрахункова модель, статико-динамічне деформування, імпульсний вплив.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В процессе совершенствования теории железобетона все больше внимания уделяется переходному состоянию от сопротивления железобетонных конструкций со сплошной растянутой зоной к сопротивлению после нарушения сплошности и появления целого ряда трещин [1–3].

В момент разрушения бетонной растянутой матрицы (образования трещин) в железобетонных конструкциях имеет место импульсное воздействие, которое в ряде случаев необходимо учитывать в расчете [1–3].

Цель работы – разработка расчетной модели статико-динамического деформирования железобетонной изгибаемой конструкции в момент разрушения бетонной растянутой матрицы с учетом импульсного воздействия на основе анализа и обобщения экспериментальных и теоретических исследований. Для достижения поставленной цели необходимо задаться рабочими гипотезами, наиболее полно отражающими действительное НДС конструкции с учетом эффекта импульсного воздействия в виде мгновенного выключения из работы отдельного элемента (сечения или его части, узла) железобетонной системы.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Для оценки эффекта импульсного воздействия в виде мгновенного выключения из работы отдельного элемента (сечения или его части, узла)

системы будем исходить из следующих *основных гипотез* [1–5]:

- под мгновенным разрушением элемента (или его части) из двухкомпонентного упруго-хрупкого материала будем понимать разрушение, продолжительность реализации которого исчисляется десятками и сотыми долями секунды;
- теоретическая диаграмма состояния арматуры до наступления текучести принимается в виде линейной диаграммы, рис. 1;

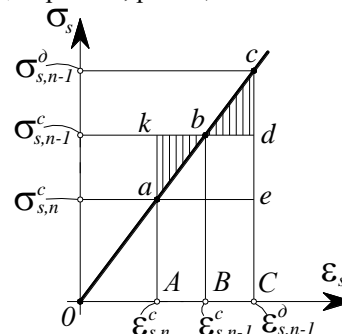


Рисунок 1 – Теоретическая диаграмма деформирования арматуры, используемая для определения динамических напряжений арматуры в сечении с трещиной $(n-1)$ -раз внутренне статической неопределимой системы из двухкомпонентного материала

– при мгновному переході заданої n -ої стержневої конструктивної системи (її розрахункової моделі) із двохкомпонентного матеріала к $(n-1)$ системі (розрахункової моделі), повна удельна енергія системи не змінюється;

– теоретична діаграма стану бетону приймається в вигляді деякої довільної нелінійної діаграми [6, 7] (рис. 2);

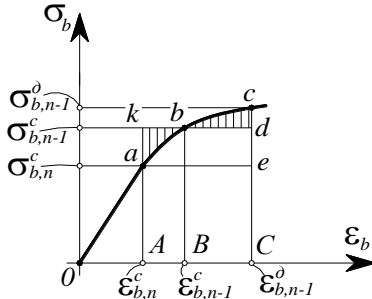


Рисунок 2 – Теоретична діаграма деформування бетону, використовується при утворенні тріщин в залізобетонних конструкціях для визначення динамічних напружень стислого бетону в сеченні з тріщиною $(n-1)$ раз внутрішньої статички неопределимої системи із двохкомпонентного матеріала

– при мгновному виключенні із роботи розтягнутої зони окремого сечення (утворення в ній тріщини) динамічний ефект проявляється згідно принципу Сен-Венана лише в місцевій зоні, прилеглої к сеченню з тріщиною; при цьому найбільш суттєве проявлення динамічного ефекта має місце в арматурі [8], в місці перетинання її тріщиною, як в момент утворення тріщини [3, 9], так і в разі руйнування от розриву арматури.

В стислом бетоні динамічний ефект надає суттєве впливання лише в разі переходу n -ої стержневої конструктивної зовнішньої статички неопределимої системи к $(n-1)$ системі в результаті наступлення предельного стану в бетоні стислого зони; при цьому узагальнена діаграма, що характеризує стан сечення статички неопределимої залізобетонної конструкції при мгновному навантаженні, в першому наближенні може бути описана квадратною параболою з нисходящою гілкою деформування (розгляду цього випадку буде присвячена окрема стаття).

Напруження в арматурі (бетоні) σ_{n-1}^d і відповідні їм відносні деформації в довільному k -тому сеченні незрушеної частини $(n-1)$ -раз внутрішньої (зовнішньої) статички неопределимої системи в часі першого напівперіоду її коливань; безумовно вони будуть перевищувати аналогічні параметри, які мали б місце в цій системі, якщо б перехід n -системи в систему $(n-1)$ здійснювався не в результаті мгновного руйнування частини сечення k , а шляхом його повільного примусового розвантаження від деякого значення предельного

напруження, що сприймається цією частиною сечення до нуля. При незмінній зовнішній навантаженні на систему ($\eta = \eta_k = const$) і повільному примусовому переході системи n в систему $(n-1)$ напруження в арматурі (бетоні) σ_{n-1}^c і відповідні їм відносні деформації в сеченні з тріщиною залізобетонної конструкції вирівнялись б відповідними значеннями напружень і деформацій в початковій нелінійно-упругій системі з раніше віддаленою частиною сечення (тріщиною) при повільному статичкому зростанні параметра η від нуля до η_k .

Перед утворенням тріщини в сеченнях залізобетонної конструкції має місце стадія напружено-деформованого стану – Ia. Розтягуючі напруження в бетоні – σ_{bt} наближаються к пределу міцності при розтягненні – R_{bt} . В розтягнутій зоні сечення виникають неупругі деформації, епюра напружень бетону викривляється, а деформації подовження досягають предельних значень $\epsilon_{bt,u}$. В стислій зоні бетон ще відчуває переважно еластичні деформації. Епюра напружень бетону в стислій зоні бетону трикутна (рис. 3, а).

Із рівняння рівноваги проекцій всіх сил на вісь X рівних нулю ($\sum X = 0$) визначається висота стислого зони бетону x_n^c :

$$-N_{b,n}^c + N_{bt,n}^c + N_{s,n}^c - N_{sc,n}^c = 0; \quad (1)$$

$$-0,5 \cdot \sigma_{b,n}^c \cdot \frac{(b' + b_n)}{2} x_n^c + R_{bt} \cdot \frac{b + b_n}{2} (h - x_n^c) + \sigma_{s,n}^c \cdot A_s - \sigma_{sc,n}^c \cdot A_s' = 0. \quad (2)$$

Тут $\sigma_{s,n}^c = 2\alpha \cdot R_{bt}$; $\sigma_{b,n}^c$ і $\sigma_{sc,n}^c$ визначаються з використанням гіпотези плоских сечень по формулам:

$$\sigma_{b,n}^c = \frac{\epsilon_{bt,u} \cdot x_n^c}{h - x_n^c} \cdot E_b \quad (3)$$

і
$$\sigma_{sc,n}^c = \frac{\epsilon_{bt,u} \cdot (x_n^c - a_s')}{h - x_n^c} \cdot E_s, \quad (4)$$

де $\sigma_{s,n}^c(\epsilon_{s,n}^c)$ – напруження (відносні деформації) в розтягнутій арматурі перед утворенням тріщин; $\sigma_{sc,n}^c(\epsilon_{sc,n}^c)$ – напруження (відносні деформації) в стислій арматурі перед утворенням тріщин; $\sigma_{b,n}^c(\epsilon_{b,n}^c)$ – напруження (відносні деформації) в стислом бетоні перед утворенням тріщин; x_n^c – висота стислого бетону перед утворенням тріщин.

Тоді, підставляючи (3) і (4) в (2), отримаємо:

$$-0,5 \cdot \frac{\epsilon_{bt,u} \cdot x_n^c}{h - x_n^c} E_b \frac{(b' + b_n)}{2} x_n^c + R_{bt} \frac{(b + b_n)}{2} (h - x_n^c) + 2\alpha \cdot R_{bt} A_s - \frac{\epsilon_{bt,u} \cdot (x_n^c - a_s')}{h - x_n^c} \cdot E_s A_s' = 0. \quad (5)$$

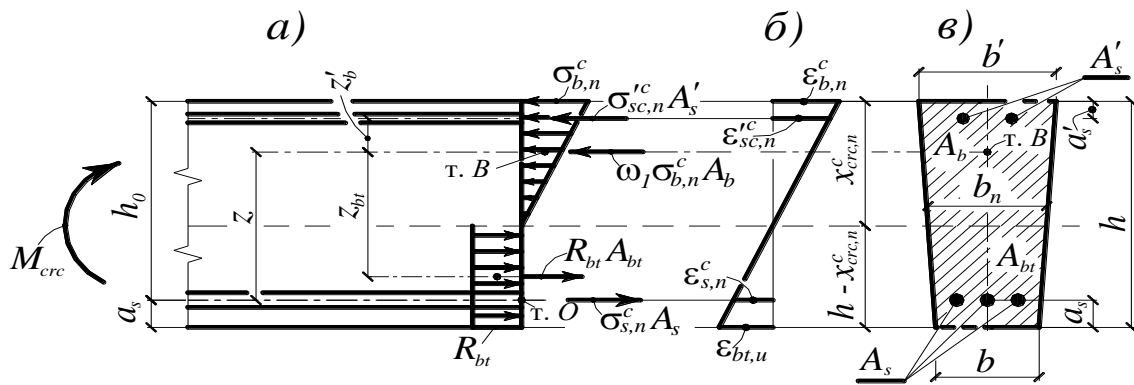


Рисунок 3 – Напряженно-деформированное состояние железобетонной изгибаемой конструкции в стадии Ia:
 а – схема усилий в поперечном сечении; б – гипотеза плоских сечений для деформаций;
 в – поперечное сечение

В итоге, после алгебраических преобразований, высота сжатой зоны бетона x_n^c определяется из квадратного уравнения:

$$A \cdot (x_n^c)^2 + B \cdot x_n^c + C = 0; \quad (6)$$

где $A = 0,5 \cdot \varepsilon_{bt,u} \cdot E_b \cdot (b' + b_n) - R_{bt} \cdot b - R_{bt} \cdot b_n$;

$$B = 2h \cdot R_{bt} \cdot b + 2h \cdot R_{bt} \cdot b_n + 4\alpha \cdot R_{bt} \cdot A_s - 2 \cdot \frac{\varepsilon_{bt,u} \cdot (x_n^c - a_s')}{h - x_n^c} \cdot E_s \cdot A_s';$$

$$C = -4\alpha \cdot R_{bt} \cdot A_s h + \frac{2\varepsilon_{bt,u} (x_n^c - a_s') \cdot E_s A_s' h}{h - x_n^c} - R_{bt} \cdot b \cdot h^2 - R_{bt} \cdot b_n \cdot h^2.$$

Момент, вызывающий образование трещин определяется из уравнения равновесия моментов всех сил относительно точки B ($\sum M_B = 0$):

$$M_{crc} - \sigma_{s,n}^c A_s (h_0 - k_1 k_2 \cdot x_n^c) - R_{bt} \frac{(b + b_n)}{2} \cdot \left[\frac{h - x_n^c}{3} \cdot \frac{2b + b_n}{b_n + b} + x_n^c - k_1 k_2 \cdot x_n^c \right] \cdot (h - x_n^c) + \frac{\varepsilon_{bt,u} \cdot (x_n^c - a_s')}{h - x_n^c} E_s (k_1 k_2 \cdot x_n^c - a_s') = 0, \quad (7)$$

где $k_1 = y_0 / (0,5 \cdot x_n^c)$ – коэффициент учета влияния трапеции по сравнению с принятым изменением центра тяжести геометрической фигуры (y_0 – расстояние от верхнего основания трапеции до центра ее тяжести);

k_2 – уже известный коэффициент, учитывающий форму эпюры напряжений при определении расстояния до геометрического центра эпюры сжатого бетона перед образованием трещин, равный 1/3 для треугольной эпюры напряжений (она остается треугольной и при трапециевидной площади сечения).

Оба коэффициента k_1 и k_2 влияют на положение центра тяжести сложной пространственной фигуры (изменяется **площадь** в одном направлении и **наполнение** эпюры напряжений в другом направлении).

$$\text{Тогда, } k_1 k_2 = \frac{2b_n + b'}{b' + b_n} \cdot \frac{x_n^c}{3} \cdot \frac{1}{0,5 x_n^c} = \frac{2(2b_n + b')}{9(b' + b_n)}.$$

При прямоугольном сечении конструкции произведение этих коэффициентов возвращается к известному значению: $k_1 \cdot k_2 = \frac{2 \cdot (3b)}{9 \cdot (2b)} = \frac{1}{3}$.

С учетом выше принятых обозначений будем иметь:

$$M_{crc} = 2\alpha \cdot R_{bt} \cdot A_s (h_0 - k_1 k_2 \cdot x_n^c) + R_{bt} \frac{(b + b_n)}{2} \times \left[\frac{h - x_n^c}{3} \cdot \frac{2b + b_n}{b_n + b} + x_n^c - k_1 k_2 \cdot x_n^c \right] \cdot (h - x_n^c) - \frac{\varepsilon_{bt,u} \cdot (x_n^c - a_s')}{h - x_n^c} E_s (k_1 k_2 \cdot x_n^c - a_s') = R_{bt} \cdot W. \quad (8)$$

Тогда,

$$M_{crc} = R_{bt} \cdot W, \quad (9)$$

где

$$W = 2\alpha \cdot A_s (h_0 - k_1 k_2 \cdot x_n^c) + \frac{(b + b_n)}{2} \cdot \left[\frac{h - x_n^c}{3} \cdot \frac{2b + b_n}{b_n + b} + x_n^c - k_1 k_2 \cdot x_n^c \right] \cdot (h - x_n^c) - \frac{\varepsilon_{bt,u} \cdot (x_n^c - a_s') \cdot E_s}{R_{bt} (h - x_n^c)} (k_1 k_2 \cdot x_n^c - a_s'). \quad (10)$$

После образования трещин в сечениях железобетонной конструкции имеет место стадия напряженно-деформированного состояния – II. В растянутой зоне трещина распространяется до нулевой линии и все растягивающие усилия в сечении с трещиной воспринимаются только растянутой арматурой, рис. 4, б (сопротивлением бетона в растянутой зоне над трещиной пренебрегаем). На участке между трещинами сцепление арматуры с бетоном не нарушено и бетон продолжает работать на растяжение, несколько разгружая арматуру [1–3].

По высоте сечения с трещиной деформации при изгибе в стадии II изменяются нелинейно [3, 6, 7],

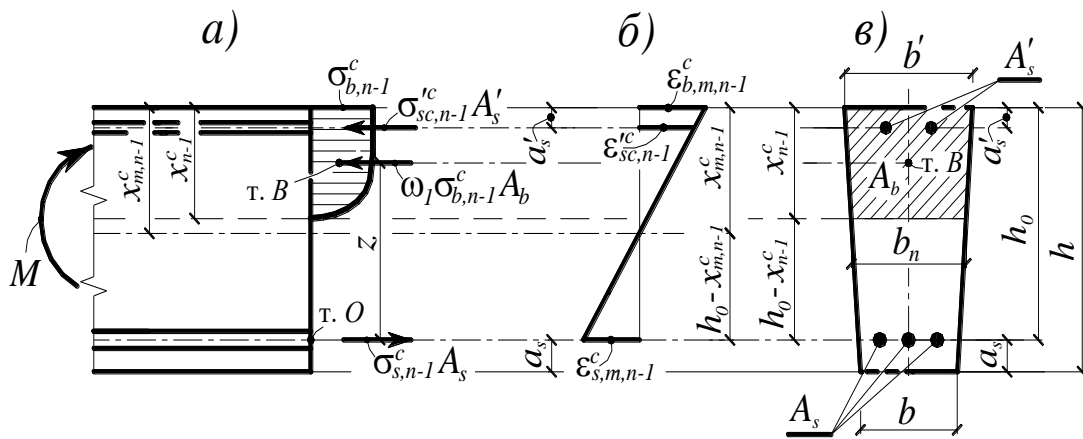


Рисунок 4 – Напряженно-деформированное состояние железобетонной изгибаемой конструкции в стадии II: а – схема усилий в поперечном сечении; б – гипотеза плоских сечений для средних деформаций в блоке между трещинами; в – поперечное сечение

так как вследствие нарушения равновесия внутренних сил в момент разрыва бетона растянутой зоны появляются силы сдвига, искривляющие сечение.

По длине элемента деформации сжатой и растянутой зон сечения и высота сжатой зоны также переменные, а нейтральная ось волнообразная.

Для средних сечений, расположенных на участке между трещинами и испытывающих симметричные воздействия слева и справа, может быть принята гипотеза плоских сечений. Исходя из средних деформаций $\epsilon_{b,m,n-1}^c$ для края бетона сжатой зоны и $\epsilon_{s,m,n-1}^c$ для растянутой арматуры, находим среднюю высоту сжатой зоны:

$$x_{m,n-1}^c = \frac{\epsilon_{b,m,n-1}^c}{\epsilon_{s,m,n-1}^c + \epsilon_{b,m,n-1}^c} \cdot h_0, \quad (11)$$

где h_0 – расстояние от центра тяжести сечения растянутой арматуры до сжатой грани бетона (рабочая высота сечения). Зависимость между средней высотой сжатой зоны $x_{m,n-1}^c$ и высотой сжатой зоны в сечении с трещиной x_{n-1}^c может быть выражена эмпирической формулой:

$$\varphi = \frac{x_{n-1}^c}{x_{m,n-1}^c} = 1 - \frac{0,7}{100\mu + 1}. \quad (12)$$

С увеличением коэффициента армирования $\mu = A_s/b \cdot h_0$, коэффициент φ стремится к единице. В сечении с трещиной (рис. 4) напряжения, выраженные через деформации, будут определяться:

– в растянутой арматуре по формуле:

$$\sigma_{s,n-1}^c = \epsilon_{s,n-1}^c E_s; \quad (13)$$

– в бетоне у сжатой грани по формуле:

$$\sigma_{b,n-1}^c = \frac{\psi_s \cdot \nu \cdot x_{n-1}^c}{\alpha(h_0\varphi - x_{n-1}^c)} \cdot \sigma_{s,n-1}^c, \quad (14)$$

– в сжатой арматуре по формуле:

$$\sigma_{sc,n-1}^c = \frac{x_{n-1}^c - a'_s \cdot \varphi}{h_0 \cdot \varphi - x_{n-1}^c} \cdot \psi_s \cdot \sigma_{s,n-1}^c. \quad (15)$$

Здесь $\sigma_{s,n-1}^c(\epsilon_{s,n-1}^c)$ – напряжения (относительные деформации) в растянутой арматуре в сечении с трещиной, которые возникли бы в этой системе, если бы переход n -системы в систему $(n-1)$ осуществлялся не в результате мгновенного разрушения растянутой части бетона в сечении k , а путем его медленного принудительного разгрузки от некоторого значения предельного напряжения, воспринимаемого этой частью сечения до нуля;

$\sigma_{sc,n-1}^c(\epsilon_{sc,n-1}^c)$ – напряжения (относительные деформации) в сжатой арматуре в сечении с трещиной, которые возникли бы в этой системе, если бы переход n -системы в систему $(n-1)$ осуществлялся не в результате мгновенного разрушения растянутой части бетона в сечении k , а путем его медленного принудительного разгрузки от некоторого значения предельного напряжения, воспринимаемого этой частью сечения до нуля;

$\sigma_{b,n-1}^c(\epsilon_{b,n-1}^c)$ – напряжения (относительные деформации) в сжатом бетоне в сечении с трещиной, которые возникли бы в этой системе, если бы переход n -системы в систему $(n-1)$ осуществлялся не в результате мгновенного разрушения растянутой части бетона в сечении k , а путем его медленного принудительного разгрузки от некоторого значения предельного напряжения, воспринимаемого этой частью сечения до нуля;

x_{n-1}^c – высота сжатого бетона в сечении с трещиной, которая имела бы место, с напряжениями (относительными деформациями) которые возникли бы в этой системе в бетоне и арматур, если бы переход n -системы в систему $(n-1)$ осуществлялся не в результате мгновенного разрушения части сечения k , а путем его медленного принудительного разгрузки от некоторого значения предельных напряжений воспринимаемых этой частью сечения до нуля;

$x_{m,n-1}^c$ – середня висота сжатого бетона в сечении с трещиной, которая имела бы место, с напряжениями (относительными деформациями) которые возникли бы в этой системе в бетоне и арматуре, если бы переход n -системы в систему $(n-1)$ осуществлялся не в результате мгновенного разрушения части сечения k , а путем его медленного принудительного разгрузки от некоторого значения предельных напряжений воспринимаемых этой частью сечения до нуля;

ψ_s – коэффициент, учитывающий работу растянутого бетона на участке между трещинами [10], равный отношению соответствующих средних деформаций арматуры к ее деформациям в сечении с трещиной; в соответствии с действующими нормативными документами он отыскивается по формуле:

$$\psi_s = 1 - 0,8 \cdot \frac{M_{crc}}{M} \quad (16)$$

Таким образом, при неизменной внешней нагрузке на систему ($\eta = \eta_k = const$) и медленном принудительном переводе системы n в систему $(n-1)$ напряжения в арматуре (бетоне) и соответствующие им относительные деформации в сечении с трещиной железобетонной конструкции равнялись бы соответствующим значениям напряжений и деформаций в исходной нелинейно-упругой системе с заранее удаленной частью сечения (трещиной) при медленном статическом возрастании параметра η от нуля до η_k . При этом из уравнения равновесия проекций всех сил на ось X равных нулю ($\sum X = 0$) определяем высоту сжатой зоны бетона в сечении с трещиной x_{n-1}^c :

$$-N_{b,n-1}^c + N_{bt,n-1}^c + N_{s,n-1}^c - N_{sc,n-1}^c = 0; \quad (17)$$

Так как в стадии II $N_{bt,n-1}^c = 0$, тогда

$$-N_{b,n-1}^c + N_{s,n-1}^c - N_{sc,n-1}^c = 0;$$

$$-\omega_1 \cdot \sigma_{b,n-1}^c \cdot A_b + \sigma_{s,n-1}^c \cdot A_s - \sigma_{sc,n-1}^c \cdot A_s' = 0; \quad (18)$$

где ω – коэффициент полноты объема криволинейной эпюры напряжений бетона сжатой зоны (для прямоугольного сечения ω изменяется от 0,5 при треугольной эпюре до 1 при прямоугольной); с развитием пластических деформаций бетона сжатой зоны величина ω стремится к единице.

Применительно к рис. 4, получим:

$$-\omega_1 \cdot \sigma_{b,n-1}^c \cdot \frac{(b' + b_n)}{2} \cdot x_{n-1}^c + \sigma_{s,n-1}^c \cdot A_s - \sigma_{sc,n-1}^c \cdot A_s' = 0; \quad (19)$$

Принимая во внимание рис. 2 и учитывая в соответствии с (12) – (15), что

$$\sigma_{sc,n-1}^c = \frac{x_{n-1}^c - a_s' \cdot \varphi}{h_0 \cdot \varphi - x_{n-1}^c} \cdot \psi_s \cdot \sigma_{s,n-1}^c$$

$$\text{и } \sigma_{b,n-1}^c = \frac{\psi_s \cdot v \cdot x_{n-1}^c}{\alpha(h_0 \varphi - x_{n-1}^c)} \cdot \sigma_{s,n-1}^c,$$

выражение (19) принимает вид:

$$-\omega_1 \cdot \frac{\psi_s \cdot v \cdot x_{n-1}^c}{\alpha(h_0 \varphi - x_{n-1}^c)} \cdot \frac{(b' + b_n)}{2} \cdot x_{n-1}^c + A_s \cdot \frac{x_{n-1}^c - a_s' \cdot \varphi}{h_0 \cdot \varphi - x_{n-1}^c} \cdot \psi_s \cdot A_s' = 0. \quad (20)$$

Выполнив соответствующие алгебраические преобразования, получим:

$$A_1 \cdot (x_{n-1}^c)^2 + B_1 \cdot (x_{n-1}^c) + C_1 = 0, \quad (21)$$

где $A_1 = \omega_1 \cdot \psi_s \cdot v \cdot (b' + b_n)$;

$$B_1 = 2\alpha \psi_s A_s' + 2\alpha A_s;$$

$$C_1 = -2\alpha a_s' \varphi \psi_s A_s' - 2\alpha A_s h_0 \varphi.$$

Изгибающий момент в сечении с трещиной может быть выражен как момент внутренних усилий относительно т. B – центра тяжести эпюры сжатия в бетоне ($\sum M_B = 0$):

$$M = \sigma_{sc,n-1}^c \cdot A_s' \cdot (k_1 k_2 \cdot x_{n-1}^c - a_s') + \sigma_{s,n-1}^c A_s \cdot (h_0 - k_1 k_2 \cdot x_{n-1}^c) = \sigma_{s,n-1}^c \cdot W_t. \quad (22)$$

Учитывая, что после образования трещин внешний статический момент не изменился, то приравняв зависимости (8) и (22), получим:

$$M = M_{crc} = \sigma_{s,n}^c A_s (h_0 - k_1 k_2 \cdot x_n^c) + R_{bt} \frac{(b + b_n)}{2} \times \left[\frac{h - x_n^c}{3} \cdot \frac{2b + b_n}{b_n + b} + x_n^c - k_1 k_2 \cdot x_n^c \right] \cdot (h - x_n^c) - \frac{\varepsilon_{bt,u} \cdot (x_n^c - a_s')}{h - x_n^c} \cdot E_s \cdot (k_1 k_2 \cdot x_n^c - a_s') = \sigma_{sc,n-1}^c \cdot A_s' \cdot (k_1 k_2 \cdot x_{n-1}^c - a_s') + \sigma_{s,n-1}^c A_s \cdot (h_0 - k_1 k_2 \cdot x_{n-1}^c). \quad (23)$$

Из уравнения (23) отыскивается неизвестное напряжение в растянутой арматуре в сечении с трещиной $\sigma_{s,n-1}^c$.

$$\sigma_{s,n-1}^c = \frac{R_{bt} \cdot W}{K \cdot A_s \cdot (h_0 - k_1 k_2 \cdot x_{n-1}^c)}, \quad (24)$$

где $K = \frac{x_{n-1}^c - a_s' \cdot \varphi}{h_0 \cdot \varphi - x_{n-1}^c} \cdot \psi_s \cdot A_s' \cdot (k_1 k_2 \cdot x_{n-1}^c - a_s')$,

а W определяется по формуле (10).

В формулу (24), подставляется высота сжатого бетона в сечении с трещиной x_{n-1}^c как известный параметр, определяемый по формуле (21).

Теперь, принимая во внимание исследования, проведенные в работе [11], применительно к рабочей арматуре с учетом рис. 1, будем иметь:

$$\sigma_{s,n-1}^o = 2\sigma_{s,n-1}^c - \sigma_{s,n}^c. \quad (25)$$

Подставляя в формулу (25) выражения для определения $\sigma_{s,n-1}^c$, полученные из уравнения (24),

а также учитывая, что $\sigma_{s,n}^c = 2\alpha \cdot R_{bt}$, отыскиваем напряжения в арматуре $\sigma_{s,n-1}^d$ в произвольном k -том сечении неразрушенной части $(n-1)$ -раз внутренне (внешне) статически неопределимой системы в течение первого полупериода колебаний.

$$\sigma_{s,n-1}^d = \frac{2 \cdot R_{bt} \cdot W}{K + A_s \cdot (h_0 - k_1 k_2 \cdot x_{n-1}^c)} \cdot \sigma_{s,n}^c, \quad (26)$$

где $\sigma_{s,n-1}^d$ – напряжения в растянутой арматуре в сечении с трещиной, которые возникли бы в этой системе, если бы переход n -системы в систему $(n-1)$ осуществлялся результате мгновенного разрушения части сечения k .

Здесь W определяется по формуле (10), а высота сжатого бетона в сечении с трещиной x_{n-1}^c – из уравнения (21), соответственно.

Аналогично, напряжения в сжатом бетоне $\sigma_{b,n-1}^d$ в сечении с трещиной, которые возникли бы в этой системе, если бы переход n -системы в систему $(n-1)$ осуществлялся в результате мгновенного разрушения части сечения k , определяются в соответствии с формулой, аналогичной формуле (25), примут вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{b,n-1}^d &= 2\sigma_{b,n-1}^c - \sigma_{b,n}^c = \\ &= \frac{2 \cdot \psi_s \cdot \nu \cdot x_{n-1}^c}{\alpha(h_0 \varphi - x_{n-1}^c)} \cdot \sigma_{s,n-1}^c - \frac{\varepsilon_{bt,u} \cdot x_n^c}{h - x_n^c} \cdot E_b. \end{aligned} \quad (27)$$

В формуле (27) значения x_{n-1}^c определяется по формуле (21), а значения x_n^c по формуле (6). При этом фигурирующие в формуле (27) напряжения в растянутой арматуре ($\sigma_{s,n-1}^d$), в сечении с трещиной, которые возникли бы в этой системе, если бы переход n -системы в систему $(n-1)$ осуществлялся результате мгновенного разрушения части сечения k .

ВЫВОДЫ. Таким образом, в результате проведенных исследований предложена расчетная модель статико-динамического деформирования железобетонной изгибаемой конструкции в момент разрушения бетонной растянутой матрицы с учетом импульсного воздействия. Приведены основные гипотезы и теоретические диаграммы деформирования бетона и арматуры для оценки эффекта импульсного воздействия на железобетонную конструкцию в момент разрушения бетонной растянутой матрицы.

Получены зависимости для определения напряжений в растянутой арматуре $\sigma_{s,n-1}^d$ и сжатом бетоне $\sigma_{b,n-1}^d$ в сечении с трещиной, которые возникли бы в этой системе, если бы переход n -

системы в систему $(n-1)$ осуществлялся в результате мгновенного разрушения части сечения k .

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко В.М., Колчунов В.И. Расчетные модели силового сопротивления железобетона: монография. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 472с.
2. Голышев А.Б., Колчунов В.И. Теория и расчет железобетонных конструкций с учетом длительных процессов: монография. – К.: Талком, 2016. – 264 с.
3. Голышев А.Б., Колчунов В.И. Сопротивление железобетона: монография. – К.: Основа, 2009. – 432 с.
4. Теория и расчет железобетонных сборно-монолитных конструкций с учетом длительных процессов: монография / А.Б. Голышев, В.И. Колчунов, И.А. Яковенко; под ред. д-ра техн. наук А.Б. Голышева. – К.: «Талком», 2013. – 337 с.
5. Сопротивление железобетонных конструкций, зданий и сооружений, возводимых в сложных инженерно-геологических условиях: монография / А.Б. Голышев, В.И. Колчунов, И.А. Яковенко. – К.: «Талком», 2015. – 371 с.
6. Bambura A. To assessment of bearing capacity and deformability of the reinforced concrete structures on the basis of material deformation real diagrams and deformation approach / Andriy Bambura, Oleksandr Gurkivskiy, Marianna Bezbozhna // *FIP Symposium «Keep Concrete Attractive»*. Budapest, (2005), pp. 742–747.
7. Павліков А.М. Нелінійна модель напружено-деформованого стану косо завантажених залізобетонних елементів у закритичній стадії: монографія. – Полтава: ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка, 2007. – 259 с.
8. Методика определения жесткости плосконапряженных и стержневых железобетонных составных конструкций при сейсмических воздействиях / В.И. Колчунов, Н.Г. Марьенков, Е.В. Омельченко и др. // *Промышленное и гражданское строительство*. – М.: 2014. – № 2. – С. 12–15.
9. Salnikov A., Kolchunov V.I., Yakovenko I. The computational model of spatial formation of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending // *Applied Mechanics and Materials*. Vols. 725–726 (2015), pp 784–789.
10. Биджосян Г.К. Основные результаты экспериментальных исследований сопротивления растянутого бетона между трещинами составных внецентренно сжатых железобетонных конструкций // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. – 2011. – Вип. 6/2011 (71). – Ч. 2. – С. 45–50.
11. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях: монография / Г.А. Гениев, В.И. Колчунов, Н.В. Клюева и др. – М.: АСВ, 2004. – 216 с.

**THE CALCULATION MODEL OF STATIC AND DYNAMIC DEFORMATION
REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTIONS IN BENDING AT THE DESTRUCTION MOMENT
OF STRETCHED CONCRETE MATRIX**

V. Kolchunov, I. Yakovenko

National Aviation University,

prosp. Kosmonavta Komarova, 1, build. 5, class 5.510, Kiev, 03580, Ukraine. E-mail: i2103@ukr.net

Purpose. To develop a calculation model of static and dynamic deformation reinforced concrete constructions in bending at the destruction moment of stretched concrete matrix taking into account the impact of the pulse based on the analysis and synthesis experiments. To create the working hypothesis, fully reflecting the actual stress-strain state taking into account the effect of impulsive action in the form of instant shutdown of the operation of a separate element (cross-section or part of a node) of reinforced concrete systems. This influence is represented by the instantaneous shutdown impact of the operation separate element (cross section or part of a node) of reinforced concrete systems.

Methodology. The experimentally-theoretical method is used. The theoretical and numerical studies that are presented in the work, the methods used by the general theory of reinforced concrete, solid mechanics and fracture mechanics.

Results. It is purposed the calculation model of static and dynamic deformation reinforced concrete constructions in bending at the destruction moment of stretched concrete matrix based on pulse action. It is presented the basic hypothesis and theoretical concrete and reinforcement stress-strain diagrams to assess the effect of pulsing action on the concrete constructions at the time of the destruction of concrete stretched matrix. The equations and formulas are obtained for calculating the stress in the tension reinforcement and compressed concrete in a cross section with crack.

Originality. The calculation model of static and dynamic deformation reinforced concrete constructions in bending is suggested at the destruction moment of stretched concrete matrix taking into account the impact of the pulse, obtained analytical dependences to determine the actual stress-strain state of constructions in their cross section with crack.

Practical value. It is purposed the analytical dependences for determining the stress in the tension reinforcement and compressed concrete in a cross section with a crack. These relationships would arise in the system, if the transition n -system in $(n-1)$ was carried out as a result of the instantaneous destruction of part of the section k reinforced concrete construction. References 11, figures 4.

Key words: reinforced concrete constructions, bending, calculation model, static and dynamic deformation, impulse action.

REFERENCES

1. Bondarenko, V.M., Kolchunov, V.I. (2004), *Raschetnyie modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona* [The computational model of a power resistance of reinforced concrete], ASV Publ., Moscow, Russia.
2. Golishev, A.B., Kolchunov, V.I. (2016), *Teoriya i raschet zhelezobetonnykh konstruksiy s uchetom dlitelnykh protsessov* [Theory and calculation of reinforced concrete constructions based on long-term processes], Talkom Publ., Kiev, Ukraine.
3. Golishev, A.B., Kolchunov, V.I. (2009), *Soprotivlenie zhelezobetona*, [The resistance of reinforced concrete], Osнова Publ., Kiev, Ukraine.
4. Golishev, A.B., Kolchunov, V.I., Yakovenko, I.A. (2013), *Teoriya i raschet zhelezobetonnykh sborno-monolitnykh konstruksiy s uchetom dlitelnykh protsessov* [Theory and calculation of reinforced concrete precast monolithic constructions based on long-term processes], Talkom Publ., Kiev, Ukraine.
5. Golishev, A.B., Kolchunov, V.I., Yakovenko, I.A. (2015), *Soprotivlenie zhelezobetonnykh konstruksiy, zdaniy i sooruzheniy, vozvodimyyh v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh* [The resistance of reinforced concrete constructions, buildings and structures, erected in difficult engineering-geological conditions], Talkom Publ., Kiev, Ukraine.
6. Bambura, A.N., Gurkivskiy, A.B., Bezbozhna, M.S. (2005), "To assessment of bearing capacity and deformability of the reinforced concrete structures on the basis of material deformation real diagrams and deformation approach", *FIP Symposium "Keep Concrete Attractive"*, Budapest, Hungary, pp. 742–747.
7. Pavlikov, A.M. (2007), *Nelinijna model` napruzheno-deformovanogo stanu koso zavantazheny`x zalizobetonny`x elementiv u zakry`ty`chnij stadiyi* [The nonlinear model of stress-strain state obliquely loaded reinforced concrete elements in supercritical phase], Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University Publ., Poltava, Ukraine.
8. Kolchunov, V.I., Maryenkov, N.G., Omelchenko, E.V. et al. (2014), "The method for determining rigidity of the plane-stress and the pivotal and reinforced concrete composite constructions under seismic actions", *Industrial and Civil Engineering*, no. 2, pp. 12–15.
9. Salnikov, A., Kolchunov, V., Yakovenko, I. (2015), "The computational model of spatial formation of cracks in reinforced concrete constructions in torsion with bending", *Applied Mechanics and Materials*, vol. 725–726, pp. 784–789.
10. Bidgosyan, G.K. (2011), "The main results of experimental studies of concrete in tension resistance between the cracks of composite eccentrically compressed reinforced concrete constructions", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, iss. 6, no. 71, part 2, pp. 45–50.
11. Geniev, G.A., Kolchunov, V.I., Klueva, N.V. et al (2004), *Prochnost i deformativnost zhelezobetonnykh konstruksiy pri zaproektnykh vozdeystviyakh* [The strength and deformability of reinforced concrete of constructions at beyond design impacts], ASV Publ., Moscow, Russia.

Стаття надійшла 03.06.2016.