

**Овчинников Илья Игоревич**  
Ovchinnikov Ilya Igorevich  
Саратовский государственный технический  
университет имени Гагарина Ю.А.  
Доцент/docent  
05.23.17 Строительная механика  
E-Mail: bridgeart@mail.ru

**Овчинников Игорь Георгиевич**  
Ovchinnikov Igor Georgievich  
Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет  
Профессор/professor  
E-Mail: bridgesar@mail.ru

**Мигунов Виктор Николаевич**  
Migunov Victor Nikolaevich  
Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства  
Доцент/docent  
E-Mail: kisek90@mail.ru

## **Расчет предварительно напряженного армированного стержневого конструктивного элемента с учетом коррозионного растрескивания**

Calculation of prestressed reinforced rod nomenclature based corrosion cracking

**Аннотация:** В статье рассматривается задача расчёта стержневых армированных предварительно-напряжённых железобетонных элементов строительных конструкций, подвергающихся воздействию агрессивной среды.

**The Abstract:** This paper deals with the calculation of core reinforced pre-stressed reinforced concrete building structures exposed to aggressive environments

**Ключевые слова:** Агрессивная среда, предварительно-напряжённый железобетонный элемент, напряжённо-деформированное состояние.

**Keywords:** Aggressive environment, pre-stressed reinforced concrete, pre-stressed state.

\*\*\*

Как известно, предварительно напряженные армированные конструкции весьма широко применяются в гражданских и промышленных зданиях [1,2], в конструкциях атомных электростанций [2], в морских сооружениях и судостроении [2], в мостостроении [2, 3, 4, 5].

Использование предварительного напряжения позволяет достичь больших пролетов конструкций, уменьшения их сечения. Предварительное напряжение повышает трещиностойкость конструкций и ограничивает ширину раскрытия трещин, вследствие чего повышается долговечность конструкций, уменьшается их деформативность. Предварительно напряженные

армированные конструкции обладают высокой усталостной прочностью, так как разброс напряжений арматуры даже при частичном предварительном напряжении небольшой, а их значения далеки от усталостной прочности. Железобетонные конструкции с предварительным напряжением без большого ущерба могут воспринимать завышенные против проектных значений нагрузки. Образующиеся при этом трещины способны закрываться, пока напряжения в арматуре остаются ниже предела упругости.

Условия работы предварительно напряженной армированной конструкции имеют некоторые особенности по сравнению с работой обычной армированной конструкции:

1) предварительно напряженная конструкция находится под действием двух видов нагрузок: усилия предварительного натяжения и эксплуатационной нагрузки. При этом в отличие от эксплуатационной нагрузки, которая во многих случаях действует кратковременно и не всегда в расчетном сочетании, усилие предварительного натяжения загружает конструкцию постоянно в течение всей жизни сооружения;

2) в процессе эксплуатации под постоянным воздействием усилия натяжения арматуры в бетоне в течение нескольких лет протекают неравномерные по высоте необратимые деформации ползучести, которые могут даже вызвать увеличение строительного подъема [4]. В обычных же армированных (железобетонных) конструкциях, наоборот, со временем под нагрузкой накапливаются остаточные прогибы, направленные вниз;

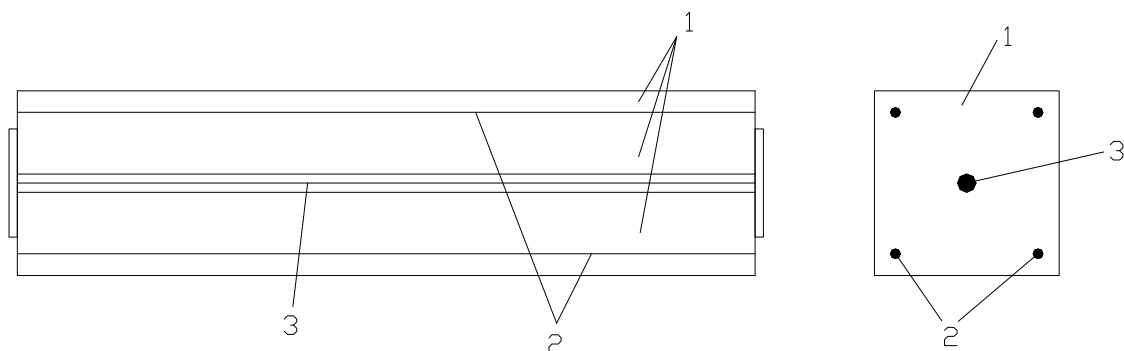
3) в предварительно напряженных конструкциях основную часть потерь предварительного напряжения составляют потери, вызванные усадкой и ползучестью бетона [6,7]. Из-за статической неопределимости либо армированных сечений, либо целиком армированных конструкций влияние этих процессов может привести к значительному перераспределению усилий;

4) в случае эксплуатации армированных конструкций в условиях воздействия агрессивной среды в предварительно напряженной арматуре развивается процесс коррозионного растрескивания, который может привести к преждевременному обрыву напряженной арматуры и последующему разрушению конструкции.

Расчет армированных предварительно напряженных конструкций, работающих в агрессивной эксплуатационной среде, с учетом всех развивающихся во времени процессов (проникание агрессивной среды, изменение свойств составляющих материалов, деформирование и накопление повреждений, усадка бетона, коррозионное поражение ненапряженной арматуры, коррозионное растрескивание напряженной арматуры и других) представляет собой весьма сложную задачу, так как требует: построения корректных моделей, описывающих развитие указанных процессов, наличия достаточного количества экспериментальных данных и отработанных методик идентификации построенных моделей, разработанных методов решения сложных задач деформирования и разрушения армированных конструкций с учетом сопровождающих эффектов.

В работе рассматривается задача расчета стержневых армированных предварительно напряженных элементов конструкций, подвергающихся воздействию агрессивной среды. Из перечисленных выше процессов учитываются: упругое деформирование ненапрягаемой и напрягаемой арматуры, нелинейное неодинаковое сопротивление деформациям растяжения и сжатия бетона, проникание агрессивной среды и ее влияние на свойства бетона, коррозионный износ ненапрягаемой арматуры, коррозионное растрескивание напрягаемой арматуры.

Рассматривается прямой стержень, армированный ненапрягаемой и напрягаемой арматурой так, что обеспечивается осесимметричное деформирование. Схема армирования элемента представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема армирования элемента.: 1 – нелинейный разномодульный материал (бетон); 2 – ненапрягаемая арматура; 3 – предварительно-напрягаемая арматура (затяжка).

Обозначения:  $F_b$  – площадь сечения бетона;  $F_a$  – площадь сечения ненапрягаемой арматуры,  $F_n$  – площадь сечения напрягаемой арматуры.

Полагаем, что арматура (и ненапрягаемая и напрягаемая) работает упруго, так что

$$\sigma_a = E_a \varepsilon \quad (1)$$

$$\sigma_n = E_n \varepsilon \quad (2)$$

где  $\sigma_a$  - напряжения в ненапрягаемой арматуре;  $\sigma_n$  - напряжение в напрягаемой арматуре;  $E_a$  - модуль упругости ненапрягаемой арматуры;  $E_n$  - модуль упругости напрягаемой арматуры;  $\varepsilon$  - относительная деформация.

Диаграмма деформирования бетона с учетом нелинейности деформирования и неодинаковой работы на растяжение и сжатие принимается в виде:

$$\sigma = \begin{cases} A_p \varepsilon - B_p \varepsilon^3, & \sigma > 0, \\ A_c \varepsilon - B_c \varepsilon^3, & \sigma < 0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $A_p, B_p, A_c, B_c$  – коэффициенты соответственно для растяжения и сжатия.

Если на армированный стержень действует агрессивная среда, вызывающая деградацию бетона, коррозионный износ ненапряженной арматуры и коррозионное растрескивание напряженной арматуры, то принимаем:

а) агрессивная среда проникает в сечение армированного элемента по закону активированной диффузии [8]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div} D(\text{grad} C) \quad , \quad (4)$$

где  $C$  – концентрация агрессивной среды в точке элемента;  $D$  – коэффициент диффузии;  $t$  – время.

б) механические свойства бетона изменяются под влиянием агрессивной среды так, что физические соотношения (3) принимают вид:

$$\sigma = \begin{cases} A_p(C)\varepsilon - B_p(C)\varepsilon^3, & \sigma > 0, \\ A_{сж}(C)\varepsilon - B_{сж}(C)\varepsilon^3, & \sigma < 0, \end{cases} \quad (5)$$

в) происходит коррозионный износ ненапрягаемой арматуры в соответствии с моделью:

$$\frac{d\delta}{dt} = V_{\sigma} \exp(\gamma C), \quad (6)$$

где  $\delta$  - глубина коррозионного износа,  $V$  – зависящая от напряжений скорость коррозии при нулевой концентрации агрессивной среды данного вида,  $\gamma$  - коэффициент.

При этом сохраняется совместная работа ненапряженной арматуры с окружающим материалом.

г) происходит коррозионное растрескивание напряженной арматуры по модели [8]:

$$\frac{d\Pi}{dt} = a(C) \left( \frac{\sigma_n}{1 - \Pi} \right)^{b(C)}, \quad \Pi(0) = 0, \quad (7)$$

где  $\sigma_n$  - напряжение в напрягаемой арматуре.

д) Полагаем, что передача натяжения от напрягаемой арматуры происходит по торцам армированного элемента, при этом в качестве расчетного рассматриваем сечение, удаленное от концов армированного элемента так, чтобы в соответствии с принципом Сен-Венана влияние анкеровки не сказывалось на характере распределения напряжений.

При анализе предварительно напряженного армированного элемента рассматриваются несколько стадий его работы и определенные программы нагружения и воздействия агрессивной среды. Напомним, что коррозионное растрескивание высокопрочной арматуры происходит только при одновременном действии и напряжений и коррозионной среды.

Рассмотрим следующую программу нагружения предварительно напряженного армированного стержня:

- 1) натяжение напрягаемой арматуры до напряжения  $\sigma_n^0$ ;
- 2) передача усилия от напрягаемой арматуры на армированное сечение с формированием в нем начального уравновешенного поля напряжений, т.е. создания предварительного напряжения;
- 3) загрузку предварительно напряженного элемента внешней нагрузкой – продольным усилием (сжимающим или растягивающим);
- 4) погружение предварительно напряженного армированного элемента в агрессивную среду и работа этого элемента с учетом влияния агрессивной среды на материал и арматуру армированного элемента.

Рассмотрим эти стадии более подробно.

*Стадия 1.* Натяжение напрягаемой арматуры усилием  $P_0$ . В этом случае напряжение в напрягаемой арматуре будет  $\sigma_n^0 = P_0 / F_n$ , а деформация напрягаемой арматуры составит  $\varepsilon_n^0 = \sigma_n^0 / E_n$ . В ненапрягаемой арматуре и бетоне напряжения и деформации отсутствуют.

*Стадия 2.* Передача натяжения на армированный элемент. При этом напрягаемая арматура разгружается, а ненапрягаемая арматура и бетон – нагружаются сжатием. После передачи натяжения с напрягаемой арматуры на стержень его сечения получают деформацию сжатия  $\varepsilon_1$ , при этом деформация напрягаемой арматуры уменьшается на эту величину и напряжение в ней станет равным

$$\sigma_n = E_n (\varepsilon_n^0 - \varepsilon_1) \quad (8)$$

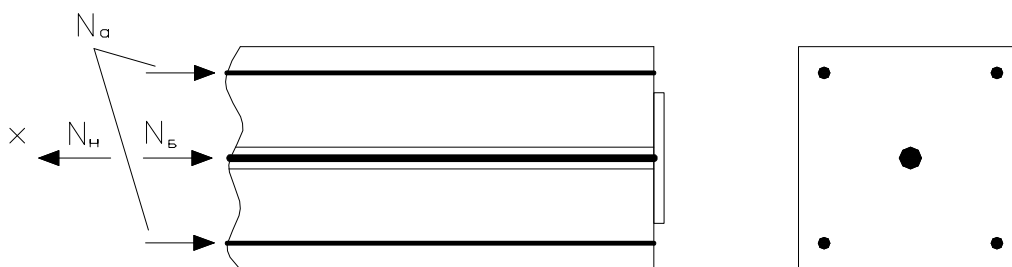
Сжимающее напряжение в ненапрягаемой арматуре будет:

$$\sigma_a = -E_a \varepsilon_1 \quad (9)$$

а сжимающие напряжения в бетоне окажутся следующими:

$$\sigma_b = -(A_{сж} \varepsilon_1 - B_{сж} \varepsilon_1^3) \quad (10)$$

Рассмотрим равновесие отсеченной части армированного стержня (рис. 2),



**Рис. 2.** Усилия в армированном стержне после передачи предварительного напряжения на элемент

В соответствии с методом сечений имеем:  $\sum x = 0$ , или

$$N_n - N_a - N_b = 0 \quad (11)$$

где  $N_n$  – усилие в напрягаемой арматуре;  $N_a$  – усилие в ненапрягаемой арматуре;  $N_b$  – усилие в бетоне.

С учетом (8) – (10) запишем (11) в виде:

$$E_n (\varepsilon_n^0 - \varepsilon_1) F_n - E_a \varepsilon_1 F_a - (A_{сж} \varepsilon_1 - B_{сж} \varepsilon_1^3) F_b = 0 \quad (12)$$

Отсюда получаем нелинейное алгебраическое уравнение для определения деформации  $\varepsilon_1$ :

$$J_1 \varepsilon_1 + I_1 \varepsilon_1^3 = \sigma_n^0 F_n, \quad (13)$$

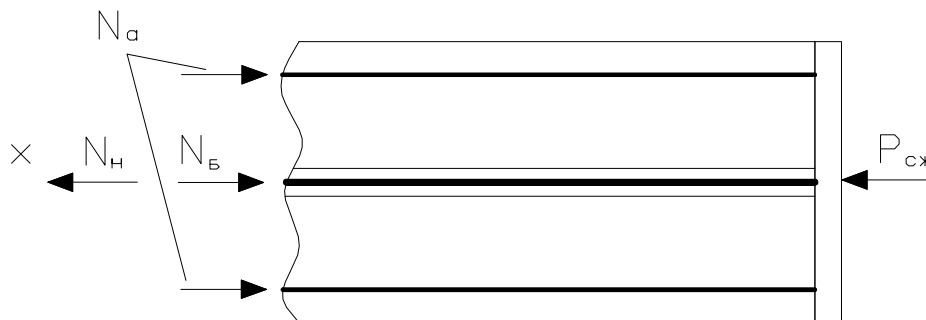
где обозначено:

$$J_1 = E_n F_n - E_a F_a - A_{сж} F_b; \quad I_1 = B_{сж} F_b \quad (14)$$

Решив уравнение (13), найдем  $\varepsilon_1$ , а затем по формулам (8)-(10) определим напряжения в напрягаемой и ненапрягаемой арматуре, а также в бетоне после предварительного напряжения.

**Стадия 3. Загружение предварительно напряженного элемента внешней нагрузкой.**

**Случай 3.1.** Внешняя нагрузка сжимающая  $P_{сж}$ . В этом случае (рис. 3) под действием внешней нагрузки в стержне возникнет деформация  $\varepsilon_2$ .



**Рис. 3.** Усилия в армированном элементе после приложения внешней сжимающей нагрузки  $P_{сж}$

В силу принятой гипотезы плоских сечений деформации у всех компонентов сечения, то есть напрягаемой и ненапрягаемой арматуры, и бетона будут одинаковы.

Напряжения в напрягаемой арматуре будут:

$$\sigma_n = E_n (\varepsilon_n^0 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2) = \sigma_n^0 - E_n \varepsilon_1 - E_n \varepsilon_2. \quad (15)$$

Напряжения в ненапрягаемой арматуре

$$\sigma_a = -E_a (\varepsilon_1 + \varepsilon_2), \quad (16)$$

а напряжения в бетоне

$$\sigma_b = -[A_{сж} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - B_{сж} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^3]. \quad (17)$$

Подставляя выражения (15)-(17) в уравнение равновесия

$$N_n - N_a - N_b + P_{сж} = 0, \quad (18)$$

получим:

$$J_1 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + I_1 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^3 = \sigma_n^0 F_n + P_{сж}. \quad (19)$$

Решив уравнение (19), определим  $(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ , а затем по формулам (15)-(17) найдем напряжения в составляющих предварительно напряженного сечения после приложения нагрузки.

Очевидно, что армированный стержень будет сохранять предварительное напряжение до тех пор, пока напряжения в напрягаемой арматуре не достигнут нулевого значения  $\sigma_n = 0$ , в этом случае  $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \varepsilon_n^0$ , а величина сжимающей силы при превышении которой напрягаемая арматура выключается из работы будет равна

$$P_{сж} = \left[ E_a F_a \varepsilon_n^0 + A_{сж} F_b \varepsilon_n^0 - B_{сж} F_b (\varepsilon_n^0)^3 \right]. \quad (20)$$

Случай 3.2. Внешняя нагрузка растягивающая. В этом случае очевидно, что если внешняя нагрузка будет равна усилию в напрягаемой арматуре, то есть

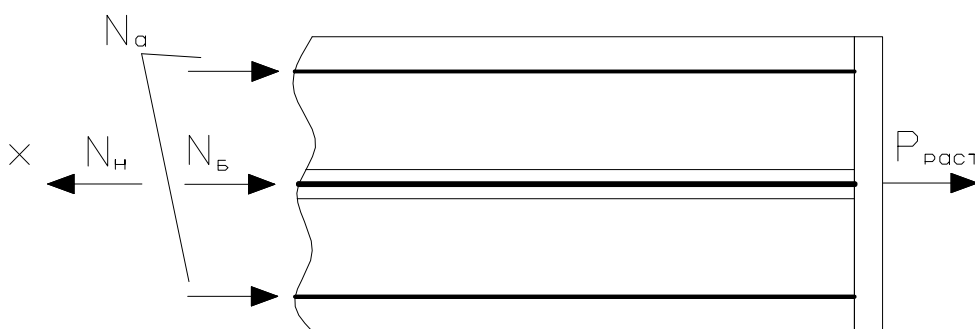
$$P_{раст}^* = \sigma_n^0 F_n \quad (21)$$

то почти все сечение (и бетон и ненапрягаемая арматура) будет ненапряжено.

Если внешняя растягивающая нагрузка будет меньше  $P_{раст}^*$ , т.е.

$$P_{раст} < P_{раст}^* \quad (22)$$

то для определения напряжений в компонентах армированного сечения рассмотрим (рис. 4)



**Рис. 4.** Усилия в армированном элементе при действии растягивающей нагрузки

Из условия равновесия  $\sum x = 0$  имеем:

$$N_n - N_a - N_b - P_{раст} = 0 \quad (23)$$

Полагая, что рассматриваемое сечение получило деформацию  $\varepsilon_3$ , противоположную по направлению деформацию предварительного напряжения  $\varepsilon_1$ , запишем следующие выражения для напряжений:

$$\sigma_n = E_n (\varepsilon_n^0 - \varepsilon_1 + \varepsilon_3); \quad (24)$$

$$\sigma_a = -E_a (\varepsilon_1 - \varepsilon_3); \quad (25)$$

$$\sigma_b = - \left[ A_c (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) - B_c (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^3 \right]. \quad (26)$$

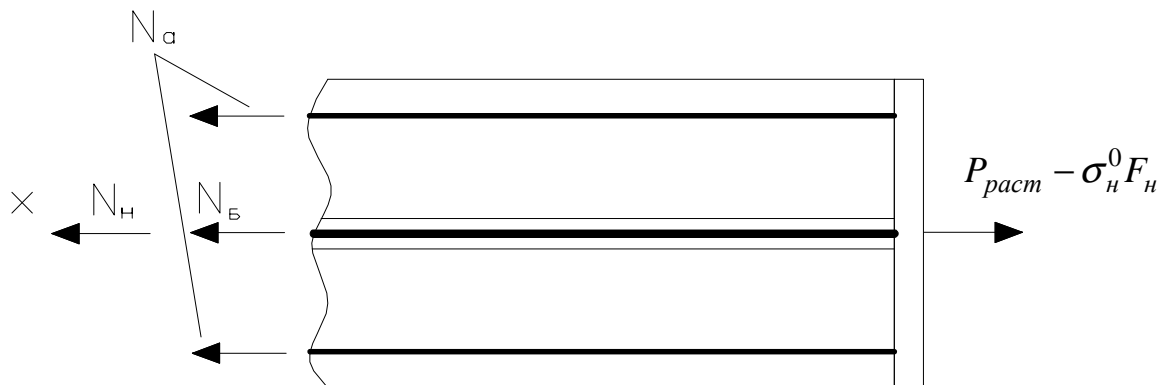
Подставляя (24)-(26) в (23) получим уравнение:

$$J_1 (\varepsilon_1 - \varepsilon_3) + I_1 (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^3 = \sigma_n^0 F_n - P_{раст} \quad (27)$$

решив которое, найдем  $(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)$ , а затем по формулам (24)-(26) определим напряжения в компонентах предварительно армированного сечения. Напомним, что уравнение (27) справедливо только при положительной правой части.

Если же внешняя растягивающая нагрузка  $P_{раст}$  будет больше  $P_{раст}^*$ , то бетон в армированном сечении начнет работать на растяжение совместно с напрягаемой и ненапрягаемой арматурой, но в этом случае растяжение будет вызывать только часть внешней нагрузки, равная  $P_{раст} - P_{раст}^* = P_{раст} - \sigma_n^0 F_n$

Из условия равновесия  $\sum x = 0$  (рис. 5)



**Рис. 5.** Усилия в армированном сечении при действии растягивающей нагрузки, большей усилия натяжения

имеем:

$$N_n + N_a + N_b - (P_{раст} - \sigma_n^0 F_n) = 0 . \quad (28)$$

Полагаем, что, в силу справедливости гипотезы плоских сечений, деформации всех компонентов сечения равны  $\epsilon$ , а напряжения в них имеют вид:

$$\sigma_n = E_n \epsilon; \quad (29)$$

$$\sigma_a = E_a \epsilon; \quad (30)$$

$$\sigma_b = A_p \epsilon - B_p \epsilon . \quad (31)$$

Подставляя (29)-(31) в (28) получим следующее уравнение:

$$J_2 \epsilon - I_2 \epsilon^3 = P_{раст} - \sigma_n^0 F_n , \quad (32)$$

где

$$J_2 = E_n F_n + E_a F_a + A_p F_b; \quad (33)$$

$$I_2 = B_p F_b$$

Если предельная растягивающая нагрузка, которую выдерживает армированное сечение, определяется предельной деформацией бетона на растяжение, то из условия

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = A_p - 3B\epsilon^2 = 0 \text{ найдем}$$

$$\epsilon_{max} = \sqrt{\frac{A_p}{3B_p}} \quad (34)$$

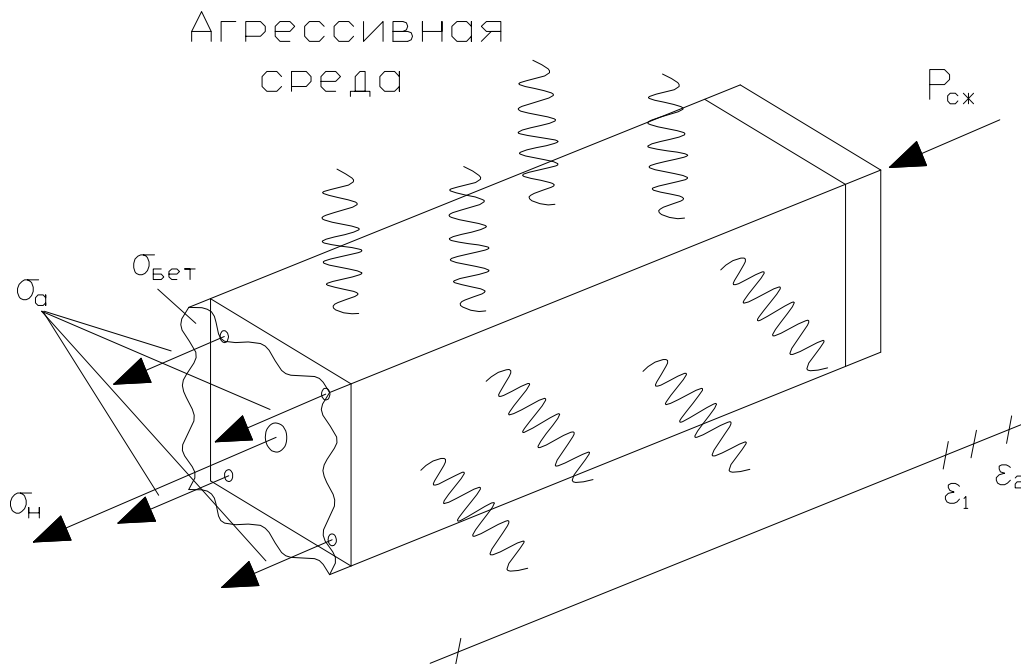


Подставляя (34) в (32) после некоторых преобразований получим выражение для предельной растягивающей нагрузки, при которой образуются трещины в бетоне:

$$P_{раст}^{пред} = \sigma_n^0 F_n \left( E_n F_n + E_a F_a + \frac{2}{3} A_p F_{\sigma} \right) \sqrt{\frac{A_p}{3B_p}}. \quad (35)$$

*Стадия 4.* Погружение предварительно напряженного армированного элемента в агрессивную среду и работа его с учетом влияния агрессивной среды.

Рассмотрим случай, когда внешняя нагрузка - сжимающая  $P_{сж}$  (рис. 6).



**Рис. 6.** Одновременное действие сжимающей нагрузки и агрессивной среды

В этом случае напряжение в произвольной точке бетонного сечения будет зависеть и от деформации сечения  $\epsilon_2$  и от концентрации агрессивной среды в этой точке  $C(y,z)$  (которая находится из решения уравнения (4) с соответствующими начальными и граничными условиями):

$$\sigma_{\sigma} = - \left[ A_{сж}(C) (\epsilon_1 + \epsilon_2) - B_{сж}(C) (\epsilon_1 + \epsilon_2)^3 \right]. \quad (36)$$

Напряжение в ненапрягаемой арматуре будет определяться выражением:

$$\sigma_a = -E_a (\epsilon_1 + \epsilon_2), \quad (37)$$

а площадь сечения ненапрягаемой арматуры  $F_a(t)$  будет зависеть от глубины коррозионного износа стержней. Если сечение армировано «К» арматурными стержнями начальным диаметром  $d_0$ , то к моменту времени  $t$  площадь  $F_a(t)$  будет:

$$F_a(t) = \sum_{j=1}^K \frac{\pi}{4} (d_0 - 2\delta_j)^2 \quad (38)$$

где  $\delta_j$  - глубина коррозионного износа  $j$ -го стержня, определяется с использованием модели (6).

Напряжение в напрягаемой арматуре будет определяться выражением:

$$\sigma_n = E_n (\varepsilon_n^0 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2). \quad (39)$$

Во всех выражениях (36)-(38):  $\varepsilon_1$  - деформация армированного элемента вследствие предварительного напряжения, определяемая из (13),  $\varepsilon_2$  - дополнительная деформация, вызванная совместным действием внешней нагрузки и агрессивной среды.

Для нахождения  $\varepsilon_2$  составим уравнение равновесия всех сил, действующих на армированный элемент с учетом происходящих деструктурирующих процессов:

$$N_n - N_a - N_b + P_{сж} = 0 \quad \text{или}$$

$$\sigma_n F_n - \sigma_a F_a(t) - \int_{F_b} \sigma_b dF + P_{сж} = 0. \quad (40)$$

С учетом (36)-(39):

$$J_3 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + I_3 (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^3 = \sigma_n^0 F_n + P_{сж}, \quad (41)$$

где

$$J_3 = E_n F_n - E_a \sum_{j=1}^K \frac{\pi}{4} (d_0 - 2\delta_j)^2 - \int_{F_b} A_{сж}(C) dF, \quad (42)$$

$$I_3 = \int_{F_b} B_{сж}(C) dF$$

Решив уравнение (41), определим  $(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ , а затем по формулам (36)-(39) определим напряжения в бетоне и арматуре в заданный момент времени. Ввиду того, что коэффициент диффузии  $D$  в (4) может зависеть от напряженного состояния бетона, скорость коррозии предварительно напряженной арматуры, а также величина коррозионного растрескивания предварительно напряженной арматуры, характеризуемая параметром поврежденности  $\Pi$  из уравнения (7), зависят от напряженного состояния соответствующих элементов сечения, а те, в свою очередь, зависят от закона распределения концентрации агрессивной среды по сечению, то поставленная задача относится к связанным задачам механики деформируемого твердого тела, для решения которой может быть применен следующий алгоритм:

1. Задание исходных данных,  $E_n, E_a, D, V(d), g, A_{сж}(C), B_{сж}(C), a(C), b(C), F_n, F_{бет}, F_a^0, P_{сж}, \sigma_n^0, d_0, K$ .

2. Определение напряжений в элементах сечения от предварительного напряжения. Решение уравнения  $J_1 \varepsilon_1 + I_1 \varepsilon_1^3 = \sigma_n^0 F_n$ , и нахождение  $\sigma_n = \sigma_n^0 - E_n \varepsilon_1$ ;  $\sigma_a = -E_a \varepsilon_1$ ;  $\sigma_b = -[A_{сж}^0 \varepsilon_1 - B_{сж}^0 \varepsilon_1^3]$ .

3. Определение напряжений от совместного действия предварительного напряжения и нагрузки. Решение уравнения

$$J_1(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + I_1(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^3 = \sigma_n^0 F_n + P_{сж}$$

и нахождение напряжений

$$\sigma_n = \sigma_n^0 - E_n(\varepsilon_1 + \varepsilon_2); \quad \sigma_a = -E_a(\varepsilon_1 + \varepsilon_2);$$
$$\sigma_{\bar{\sigma}} = -\left[ A_{сж}^0(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - B_{сж}^0(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^3 \right].$$

4. Задание начальных условий:  $t=0, \delta_0 = 0, \Pi=0, C(y,z)=0$ .

5. Задание шага по времени  $\Delta t, t=t+\Delta t$

6. Задание  $D(\sigma_{бет})$  и нахождение концентрационного поля агрессивной среды  $C(y,z)$  из решения уравнения диффузии

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}[D(\sigma) \text{grad} C].$$

7. Нахождение поля механических характеристик  $A_{сж}(C), B_{сж}(C)$ .

8. Определение глубины коррозионного износа ненапрягаемой арматуры  $\delta_j$  - из решения уравнения  $\frac{d\delta_j}{dt} = V(\sigma_a) \exp(\gamma C)$ .

9. Определение уровня коррозионного растрескивания напрягаемой арматуры  $\Pi$  из решения уравнения:

$$\frac{d\Pi}{dt} = a(C) \left( \frac{\sigma_n}{1 - \Pi} \right)^{b(C)}.$$

10. Нахождение площади сечения ненапряженной арматуры:

$$F_a(t) = \sum_{j=1}^n \frac{\pi}{4} (d_0 - 2\delta_j)^2.$$

11. Решение уравнения

$$J_3(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + I_3(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^3 = \sigma_n^0 F_n + P_{сж},$$

и нахождение напряжений

$$\sigma_n = \sigma_n^0 - E_n(\varepsilon_1 + \varepsilon_2); \quad \sigma_a = -E_a(\varepsilon_1 + \varepsilon_2);$$
$$\sigma_{\bar{\sigma}}(y,z) = -\left[ A_{сж}(C)(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - B_{сж}(C)(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^3 \right].$$

12. Проверка выполнения условий прочности по ненапрягаемой арматуре  $\sigma_a \leq \sigma_a^T$  и по бетону  $\sigma_{бет}(y, z) \leq \sigma_{бет}^{пред}(C)$ ; проверка сопротивляемости коррозионному растрескиванию  $P \leq 1$ .

13. Если условие выполняется, то остановка по этому условию с выдачей информации, если нет, то переход к пункту 5.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Предварительно напряженный железобетон / К.В. Михайлов, Г.И. Бердичевский, Ю.С. Волков и др. – М.: Стройиздат, 1983. – 208 с.
2. Леонгардт Ф. Предварительно напряженный железобетон / Ф. Леонгардт // Пер. с нем. В.Н. Гаранина. – М.: Стройиздат, 1983. – 246 с.
3. Захаров Л.В. Сборные неразрезные железобетонные пролетные строения мостов / Л.В. Захаров, Н.М. Колоколов, А.Л. Цейтлин. – М.: Транспорт, 1983. – 232 с.
4. Иосилевский Л.И. Долговечность предварительно напряженных железобетонных балочных пролетных строений мостов / Л.И. Иосилевский. – М.: Транспорт, 1967. – 288 с.
5. Штильман Е.И. Объединение балок мостов напрягаемыми стержнями / Е.И. Штильман, В.И. Березецкий. – М.: Транспорт, 1968. – 56 с.
6. Гольшев А.Б. Расчет железобетонных стержневых конструкций с учетом фактора времени / А.Б. Гольшев, В.П. Полищук, И.В. Руденко. – Киев: Будивельник, 1975. – 112 с.
7. Лившиц Я.Д. Расчет железобетонных конструкций с учетом влияния усадки и ползучести бетона / Я.Д. Лившиц // Киев: Вища школа, 1975. – 280 с.
8. Овчинников И.И., Наумова Г.А. Накопление повреждений в стержневых и пластинчатых армированных конструкциях, взаимодействующих с агрессивными средами. Волгогр. гос. архит. – строит. ун-т. Волгоград. Изд – во ВолгГАСУ. 2007. 272 с.

*Данная работа выполнена в рамках работы над грантом РФФИ № 12-01-31130 Мол\_а «Нелинейные модели деформирования и методы определения долговечности элементов конструкций, взаимодействующих с агрессивными средами и полями».*