

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛАСТИНЫ В ХЛОРИДСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ. СООБЩЕНИЕ 2. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА**

При расчете напряженно-деформированного состояния и долговечности железобетонной пластины следует учитывать задаваемые программу нагружения и схему воздействия хлоридсодержащей среды.

Рассмотрим методику расчета напряженно-деформированного состояния и поврежденности железобетонной пластины для следующего случая:

1) сначала к пластине прикладывается определенная нагрузка, создающая в ней соответствующее напряженно-деформированное состояние;

2) если эта нагрузка выдерживается в течение некоторого времени от  $t = 0$  до  $t = t_0$ , то в бетоне происходит накопление повреждений в соответствии с уравнениями

$$d\Pi/dt = a_j(C) [\sigma_u^b / (1 - \Pi)]^{v_j(C)}, \Pi(0) = 0, \quad j = 1, 2, \tag{1}$$

где  $a_j(C)$  и  $v_j(C)$  – коэффициенты, принимаемые для бетона, не поврежденного воздействием хлоридсодержащей среды;

2) на поверхность пластины в момент ( $t = t_0$ ) начинает действовать хлоридсодержащая среда, проникающая в материал пластины в соответствии с уравнением диффузии

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(D \cdot \text{grad} C) - g(C), \tag{2}$$

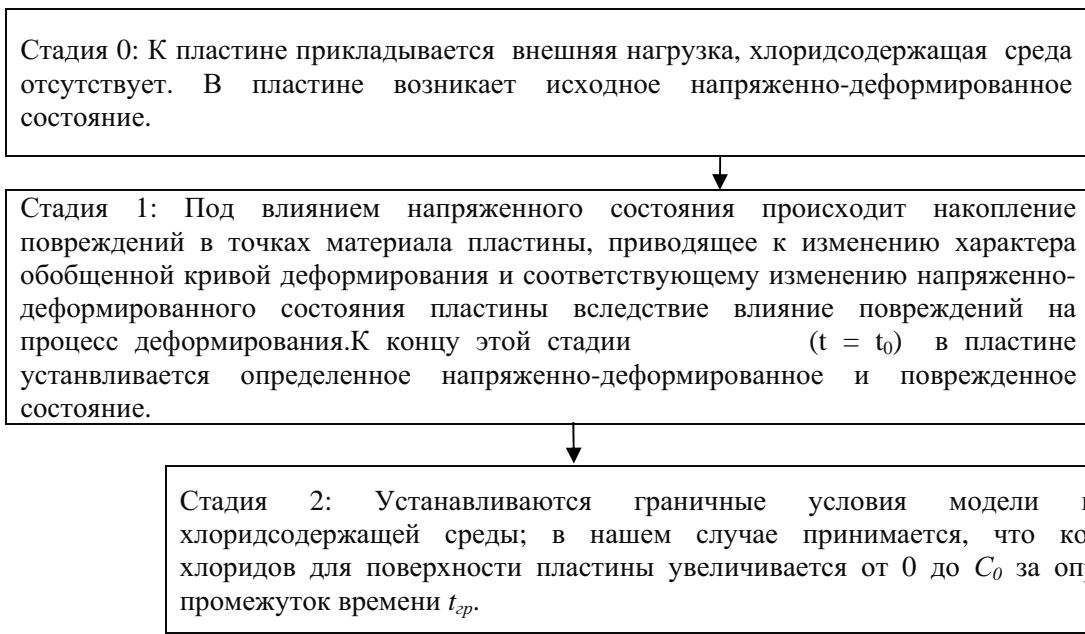
и вызывающая изменение механических характеристик бетона (изменение его диаграммы деформирования), продолжающееся накопление повреждений в бетоне в соответствии с кинетическими уравнениями (1), коэффициенты которых уже учитывают влияние хлоридсодержащей среды, коррозию арматуры по уравнению

$$\delta = \begin{cases} 0, & t < t_u, \\ (\delta_k \cdot t) / (t + T), & t \geq t_u \end{cases}, \tag{3}$$

и, как следствие, изменение напряженно-деформированного состояния;

3) при наступлении предельного состояния какого-либо вида: либо вследствие достижения предельного уровня поврежденности ( $\Pi = 1$ ) в любой точке бетонного массива, либо вследствие достижения предельного уровня напряжений в арматуре, считается, что пластина выходит из строя.

Рассмотрим характерные стадии процесса взаимодействия армированной пластины с хлоридсодержащей средой, которые представим в виде следующей схемы:



Стадия 3: Происходит проникание хлоридсодержащей среды в бетон и деградация бетона защитного слоя. При этом в пластине изменяется напряженно-деформированное и поврежденное состояние вследствие совместного действия нагрузки, агрессивной среды и происходящего процесса накопления повреждений. Стадия продолжается до момента, когда концентрация хлоридов в месте расположения арматурного стержня, наиболее близкого к поверхности пластины, достигает критического уровня  $C_{кр}$ .

Стадия 4: На этой стадии продолжается процесс деградации бетона, изменение его механических характеристик, накопление повреждений в нем, а также начинается и происходит коррозионный износ арматурных стержней, в месте расположения которых концентрация хлоридсодержащей среды превышает критическое значение  $C_{кр}$ . В результате этого изменение напряженно-деформированного состояния происходит вследствие деградации бетона, коррозии арматуры и накопления повреждений в бетоне.

Стадия 5: Наступление предельного состояния какого-либо вида: достижение предельного уровня поврежденности ( $\Pi = 1$ ) в любой точке бетонного сечения; достижение предельного уровня напряжений в арматуре.

Для решения дифференциального уравнения 4-го порядка в частных производных применяется метод конечных разностей, так как этот метод достаточно прост в применении, легко алгоритмируется и хорошо зарекомендовал себя при расчете пластинок переменной толщины, уравнение изгиба которых внешне сходно с уравнением (4).

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ D_{11} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right] + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ D_{12} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right] + 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left[ D_3 \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right] + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[ D_{21} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right] + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[ D_{22} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right] \right) - 2m \nabla^2 W + nW = p(x, y). \quad (4)$$

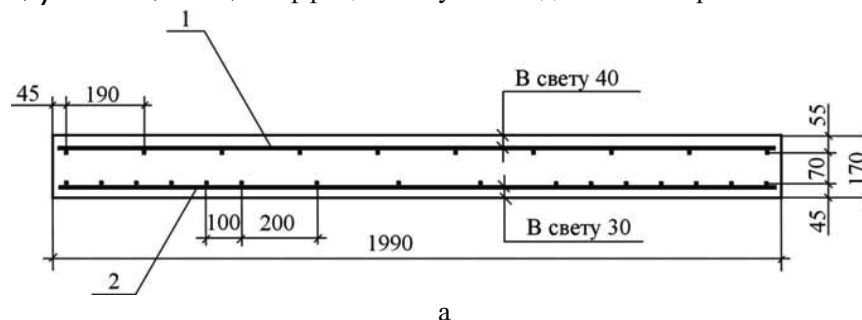
Проанализируем изменение напряженного состояния и поврежденности пластины с учетом воздействия хлоридсодержащей среды.

*Исходные данные для расчета пластины.* Геометрические размеры рассчитываемой железобетонной плиты (рис. 1) следующие: толщина  $h = 0,17$  м; длина  $a = 1,99$  м; ширина  $b = 1,49$  м; толщина защитного слоя  $h_{zn}$  (поверху = 0,03 м, понизу = 0,04 м); диаметр арматурных стержней  $d = 0,010$  м.; количество арматурных стержней: в верхнем поясе: по  $x = 11$  шт. через 0,14 м; по  $y = 11$  шт. через 0,19 м; в нижнем поясе: по  $x = 15$  шт. через 0,1 м; по  $y = 16$  шт. через 0,125 м.

В расчетах использовалась зависимость:

$$\sigma = \left( A_j \cdot \varepsilon_u - B_j \cdot \varepsilon_u^3 \right) \left( 1 - k C^\beta \right) \left( \frac{1}{1 + \lambda \Pi} \right),$$

в которой: при растяжении:  $A_1 = 30,8 \cdot 10^3$  МПа,  $B_1 = 130 \cdot 10^9$  МПа; при сжатии:  $A_2 = 45,2 \cdot 10^3$  МПа,  $B_2 = 4,32 \cdot 10^9$  МПа;  $k = 0,11$ ;  $\beta = 0,447$ ;  $\lambda = 1$ ; коэффициент Пуассона для бетона при



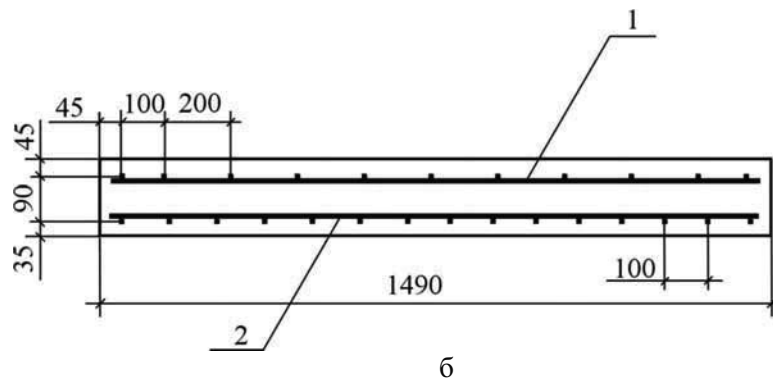


Рис. 1. Армирование плиты РД 20.15.-6:

а – в продольном направлении ;б– в поперечном направлении;

1– верхний пояс из арматуры класса АШФ-8;

2– нижний пояс из арматуры класса АШФ-8

растяжении и сжатии принят равным 0,2; модуль упругости арматуры  $E_a = 180000$  МПа, интенсивность равномерно распределенной нагрузки  $p = 0 - 0,35$  МПа, параметры уравнения коррозионного износа арматуры:  $\delta_0 = 3,06 \cdot 10^{-3}$  м,  $T = 2414$  сут. Шаг сетки  $16 \times 12 \times 72$  (рассматривалась четвертая часть пластинки; для полной пластинки сетка имеет вид:  $32 \times 24 \times 72$ )

С использованием специально разработанного программного комплекса был произведен расчет напряженно-деформированного состояния и поврежденности железобетонной пластинки при совместном действии нагрузки и хлоридсодержащей среды.

*Анализ напряженно-деформированного и поврежденного состояния пластинки, жестко защемленной по контуру при действии агрессивной среды на верхнюю поверхность пластинки*

На рис. 2 - 18 приведены результаты расчета пластинки при интенсивности нагрузки 0,2 МПа.

На рис. 2, 3 приведены эпюры прогибов по главным сечениям пластинки в моменты времени  $t=1500$  (штриховая линия),  $t=5000$  суток (пунктирная линия) и  $t=11270$  суток (сплошная линия). На рис. 4, 5 показаны эпюры соответствующих кривизн. Характер распределения поверхности  $z_0$ , отделяющей сжатую зону пластинки от растянутой приведены на рис. 6,7. На рис. 8 приведены эпюры  $\epsilon_i/\epsilon_{i,max}$  по толщине пластинки в середине ее длинной стороны, а на рис. 9 – в этом же сечении эпюры секущего модуля  $\psi$  для соответствующих моментов времени. Изменения характера эпюр напряжений в этой же точке с течением времени иллюстрируются рис. 11. На рис. 10 показаны эпюры поврежденности по толщине в центральной точке пластинки в указанные моменты времени, а на рис. 12 – эпюры поврежденности по толщине в середине длинной стороны пластинки для этих же моментов времени. Рис. 13 иллюстрирует кинетику изменения эпюр концентрации хлоридсодержащей среды по толщине в средней точке пластинки. Кинетика изменения максимального прогиба пластинки вследствие влияния и поврежденности и хлоридсодержащей среды на процесс деформирования пластинки иллюстрируется рис. 14. На рис. 15, 16 показана кинетика накопления повреждений в трех точках на верхней (рис. 15) и нижней (рис. 16) поверхностях пластины. Рис. 17 иллюстрирует кинетику уменьшения диаметра арматуры вследствие коррозионного износа. На рис. 18 приведена кривая долговечности пластинки при действии равномерной нагрузки и хлоридсодержащей среды на верхнюю поверхность пластинки. Анализ этой кривой показывает, что на ней наблюдаются два характерных участка, разрушение на первом наступает из-за того, что деформации в наиболее напряженной точке достигают предельного уровня, соответствующего максимуму диаграммы деформирования материала, а на втором участке долговечность определяется достижением параметром поврежденности  $\Pi$  предельного значения в нижней точке середины длинной стороны пластинки.

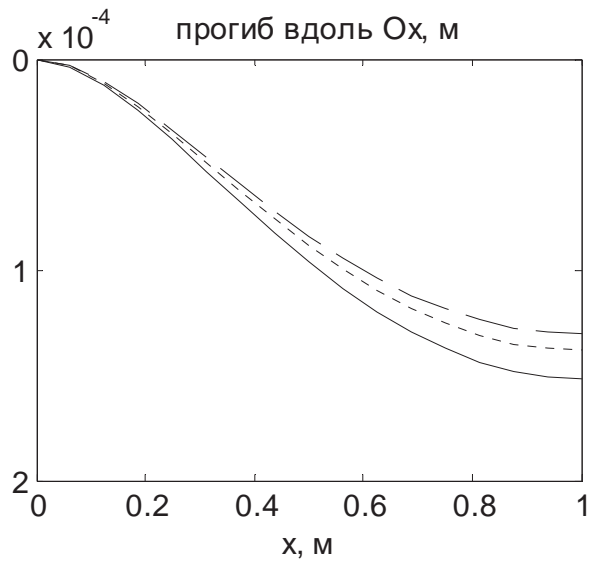


Рис. 2

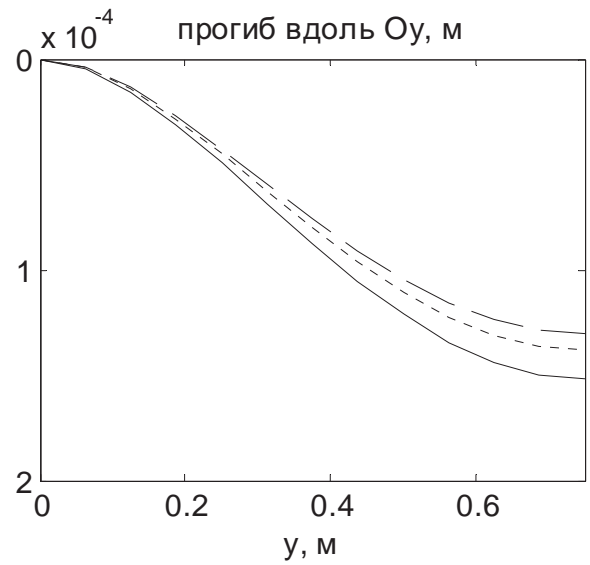


Рис. 3

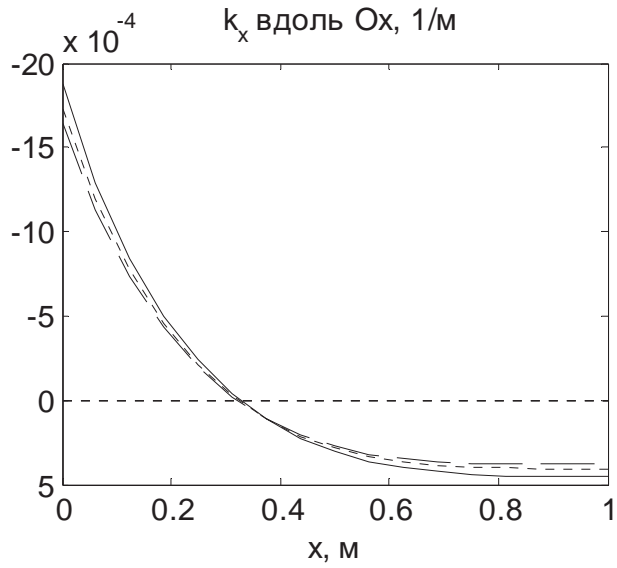


Рис. 4

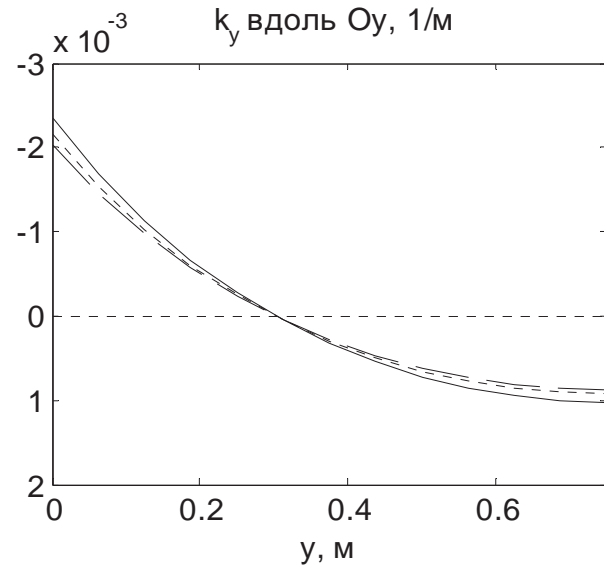


Рис. 5

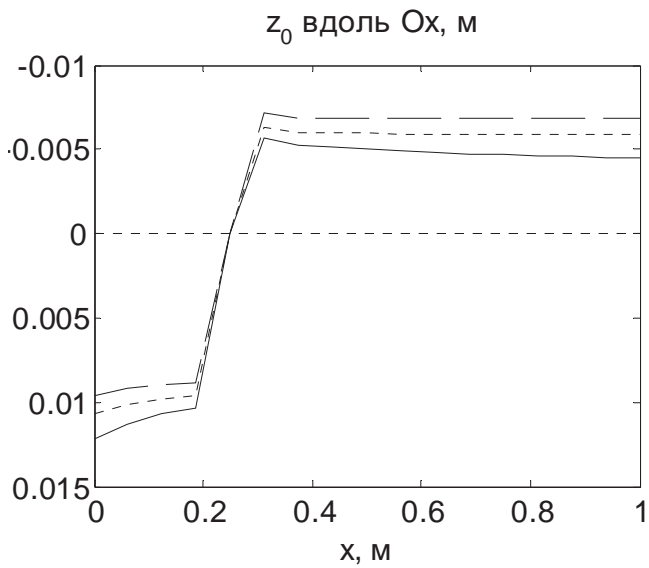


Рис. 6

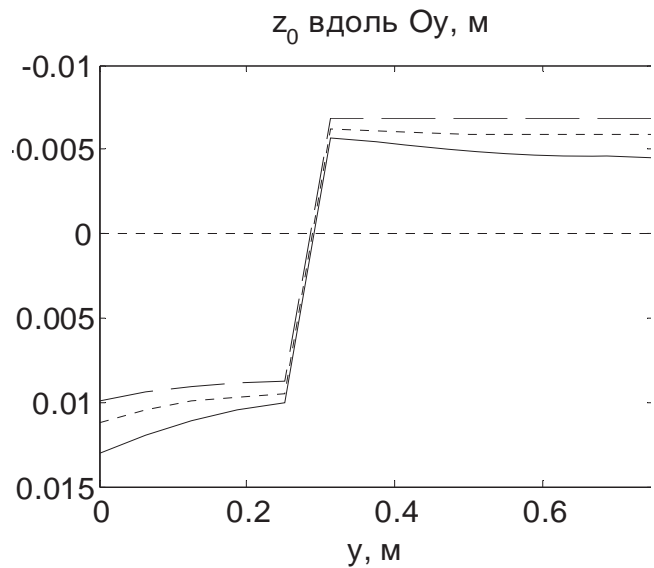


Рис. 7



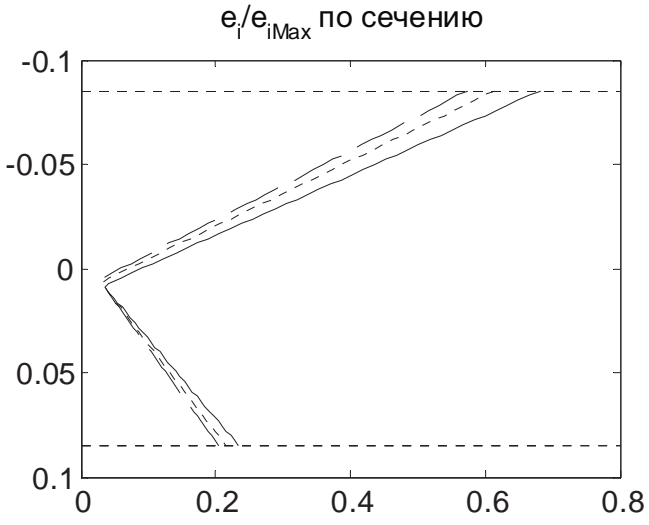


Рис. 8

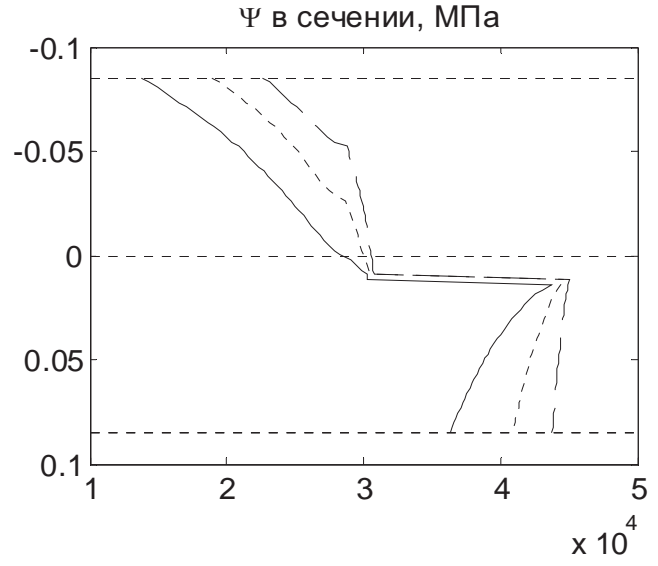


Рис. 9

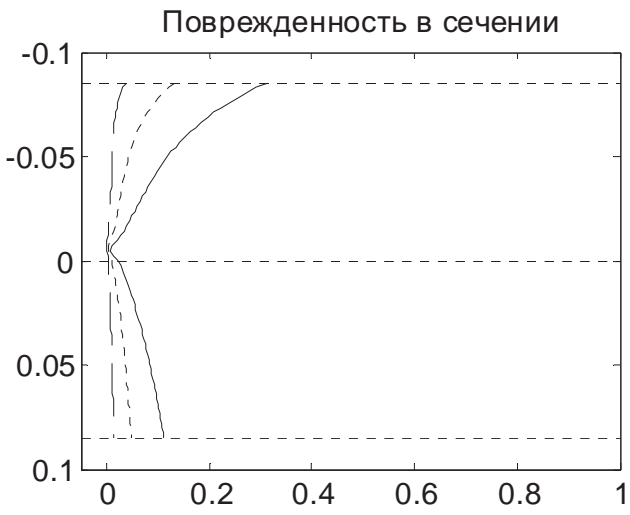


Рис. 10

Сечение – в середине пластинки

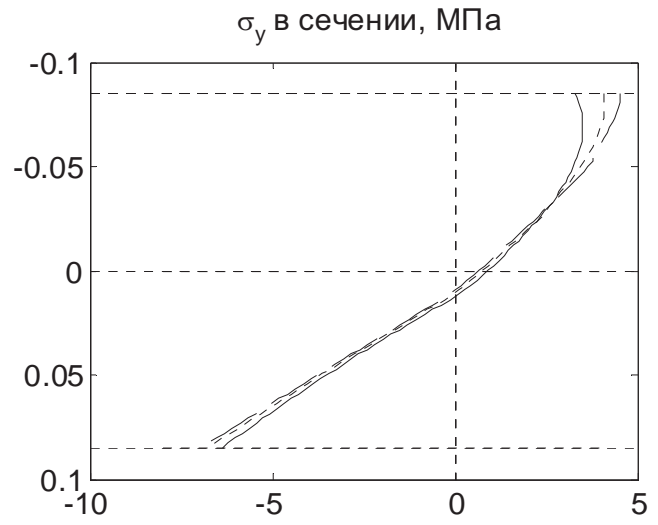


Рис. 11

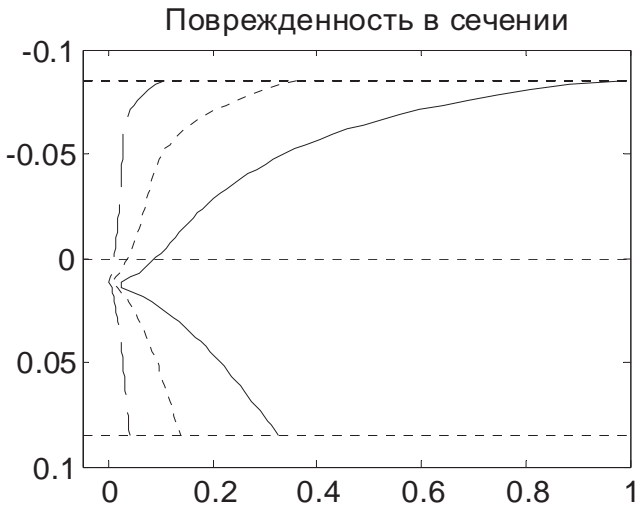


Рис. 12

Сечение – в середине длинной стороны

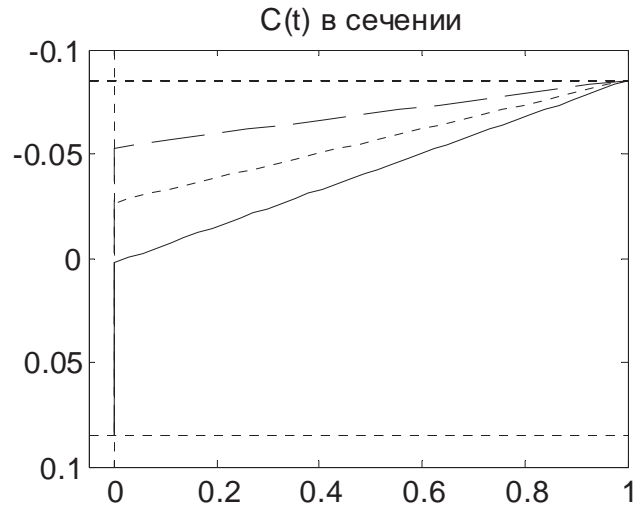


Рис. 13

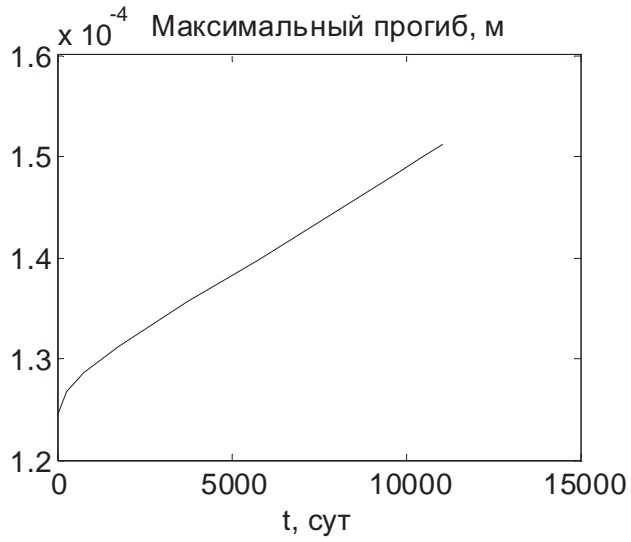


Рис. 14

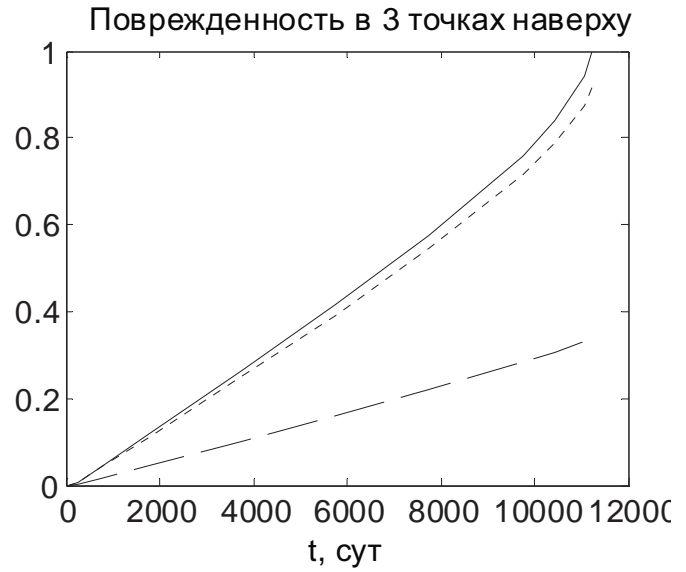


Рис. 15.

Центр (---), середина длинной стороны (—), середина короткой стороны (···)

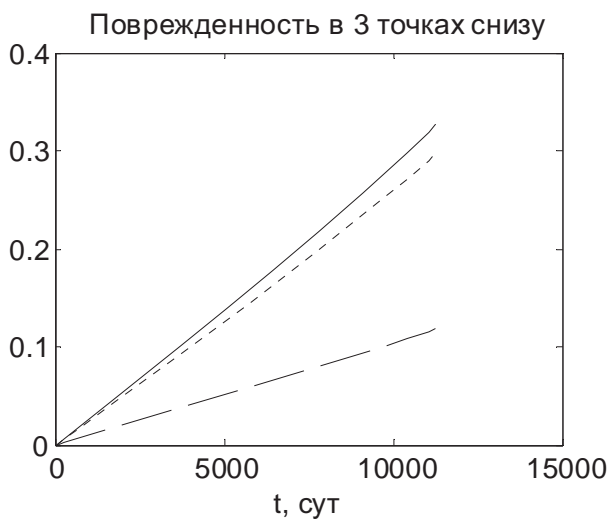


Рис. 16.

Центр (---), середина длинной стороны (—), середина короткой стороны (···)

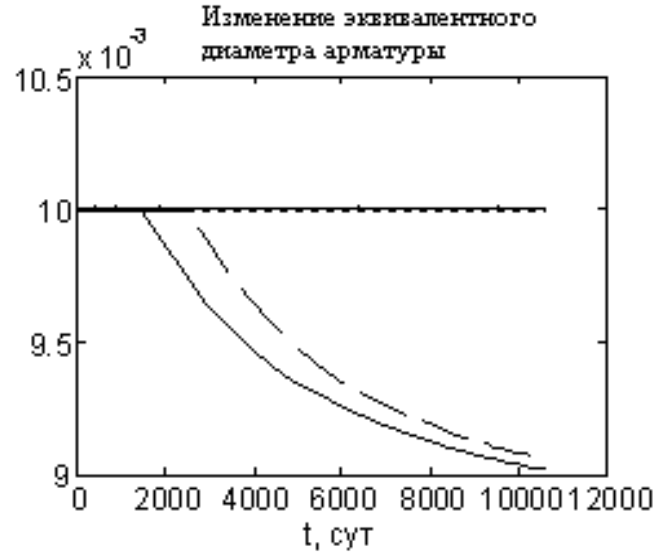


Рис. 17.

Слой сверху вниз: —, ---, ···, ·-·

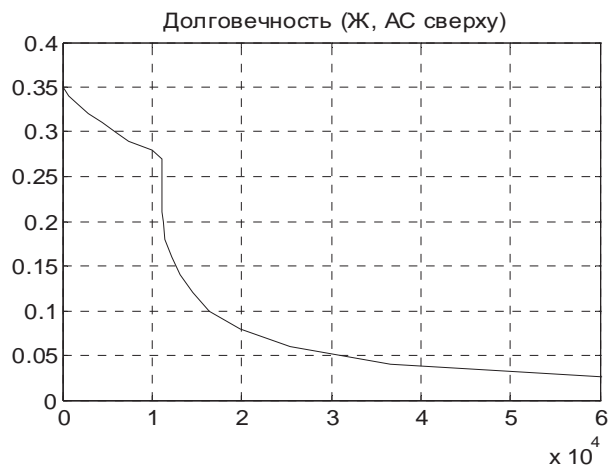


Рис. 18

