

FTAMP 67.11.31

Ж.А. Үсенқұлов¹ – негізгі автор, ©
Д.Ж. Артықбаев², Ф.Х. Аубакирова³,
А.М. Будикова⁴, А.Б. Курбанбаев⁵



¹Техн. ғылым. канд., профессор, ²PhD, аға оқытушы,
^{3,4,5}Техн. ғылым. канд., доцент,

ORCID

¹<https://orcid.org/0000-0002-2609-1671> ²<https://orcid.org/0000-0003-4794-8707>
³<https://orcid.org/0000-0002-4687-1528> ⁴<https://orcid.org/0000-0003-4879-9467>
⁵<https://orcid.org/0009-0007-5402-8999>



^{1,2,3}М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан ғылыми зерттеу
университеті, Шымкент, Қазақстан

⁴Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда, Қазақстан

⁵И. Раззаков атындағы Қырғыз мемлекеттік техникалық университеті,
Бишкек, Қырғызстан



²artykbaev_d@mail.ru

<https://doi.org/10.55956/LDQA5409>

БЕТОНДЫҚ ҚҰРЫЛЫМДАРДАҒЫ ИІЛМЕЛІ ДЕФОРМАЦИЯЛАРДЫ ЕСЕПКЕ АЛУ МӘСЕЛЕСІ ТУРАЛЫ

Аңдатпа. Мақалада темірбетон құрылымдарын жобалау кезінде иілмелі деформацияларды ескерудің өзекті мәселесі қарастырылады. Бұл фактор ғимараттар мен құрылыстардың сенімді пайдаланылуына тікелей әсер етеді. Қолданыстағы есептеу әдістеріне, призмалық үлгілер бойынша жүргізілген тәжірибелік сынақтардың нәтижелеріне және ANSYS бағдарламасындағы сандық модельдеуге (ҚР ЕЖ EN 1992-1-1:2004/2011, Eurocode 2 және Бажант-Бавейдің В3 моделі талаптарын ескере отырып) талдау жүргізілді. Зерттеу нәтижелері бойынша бетонның толық деформациясы серпімді, сырғу, шөгу және қалдық құрамдас бөліктерден қалыптасатыны анықталды. Тәжірибелік деректер алғашқы бес жыл ішінде бетондағы сырғу деформациясының шамасы шамамен 700 мк, ал шөгу шамамен –300 мк болатынын көрсетті. В3 моделі бойынша есептеулер тәжірибелік нәтижелермен ең аз айырмашылық (<5%) көрсетсе, келтірілген модуль әдісі деформация шамасын 30-35%-ға төмен бағалайтыны анықталды. Зерттеу қорытындылары бойынша қазіргі заманғы есептеу модельдерін (Eurocode 2, В3 моделі) жобалау тәжірибесінде қолдану жөнінде ұсыныстар берілді. Бұл тәсіл деформациялар мен иілу қисықтығын анықтау дәлдігін арттырып, темірбетон құрылымдарының сенімділігі мен ұзақ мерзімді беріктігін қамтамасыз етеді.

Тірек сөздер: темірбетон құрылымдары, иілмелі деформациялар, бетонның сырғуы, шөгу, жарықтардың түзілуі, қаттылық, иілу, құрылымның ұзақмерзімділігі.



Үсенқұлов, Ж.А. Бетондық құрылымдардағы иілмелі деформацияларды есепке алу мәселесі туралы [Мәтін] / Ж.А. Үсенқұлов, Д.Ж. Артықбаев, Ф.Х. Аубакирова, А.М. Будикова, А.Б. Курбанбаев // Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – 2025. – №4(90). – Б.171-180. <https://doi.org/10.55956/LDQA5409>

Кіріспе. Темірбетон құрылымдарын жобалау кезінде материалдардың жүктеме әсерінен деформациялану үдерістерінің күрделілігін ескеру талап етіледі. Дәстүрлі есептеу тәсілдері көбінесе бетонның сызықты серпімді

қасиеттеріне негізделеді, мұнда кернеу мен деформация арасындағы байланыс Гук заңы арқылы сипатталады:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

мұндағы: σ – кернеу, МПа; E – бетонның серпімділік модулі, МПа; ε – салыстырмалы деформация [1].

Алайда көптеген тәжірибелік зерттеулер көрсеткендей, ұзақ мерзімді жүктемелер әсер еткен жағдайда темірбетон сырғу және шөгу құбылыстарын байқатады. Бұл процестер нәтижесінде иіlmелі деформациялар дамып, олардың шамасы бетондағы серпімді деформациялардан бірнеше есе артық болуы мүмкін [2,3].

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varphi(t, t_0) \cdot \varepsilon_0 \quad (2)$$

мұндағы: ε_0 – жедел серпімді деформация; $\varphi(t, t_0)$ – сырғу коэффициенті, ол уақытқа тәуелді функция болып табылады [4].

Айта кету керек, әртүрлі нормативтік құжаттарда темірбетондағы иіlmелі деформацияларды есепке алудың әртүрлі әдістері ұсынылған (1-кесте).

1 кесте

Бетон деформацияларын есепке алу әдістері

Әдістің атауы	Нормативтік құжат	Артықшылықтары	Кемшіліктері
Сызықты серпімді әдіс	ҚР ЕЖ EN 1992-1-1:2004/2011 [1]	Қарапайымдылығы	Сырғу ескерілмейді
Келтірілген модуль әдісі	ҚР ЕЖ EN 1992-1-1:2004/2011 [1]	Сырғуды ішінара ескереді	Жақындатылған сипатқа ие
Сызықты емес σ – ε диаграммасы әдісі	Eurocode 2 [5]	Жоғарырақ дәлдік қамтамасыз етеді	Қолдану күрделілігі бар
В3 моделі (Бажант-Бавей моделі)	Bazant, Baweja [6]	Барлық түрдегі деформациялар ескеріледі	Есептеу күрделілігі жоғары
Эксперименттік-сандық (FEM) әдіс	Rusch [7], Neville [4]	Күрделі құрылымдарды модельдеуге мүмкіндік береді	Есептеу ресурстарына жоғары талап қояды

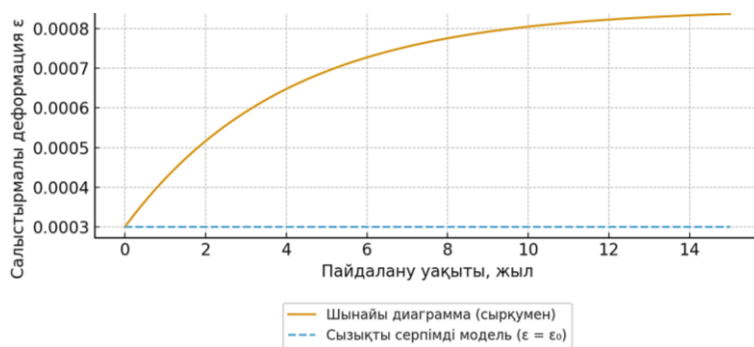
Қазақстан Республикасының қолданыстағы нормативтік құжатында (ҚР ЕЖ EN 1992-1-1:2004/2011) бетонның иіlmелі деформацияларын есепке алу үшін келтірілген серпімділік модуль әдісі қолданылады. Бұл әдісте тиімді серпімділік модуль келесі формула бойынша анықталады:

$$E_{ef} = \frac{E}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad (3)$$

Бұл тәсіл сырғу (ползучесть) құбылысын жеңілдетілген түрде ескеруге мүмкіндік береді [1]. Сонымен қатар, Eurocode 2 [5] және Бажант пен Бавейдің В3 моделі [6] деформациялардың уақыт бойынша даму заңдылықтарын сипаттайтын экспоненциалдық тәуелділіктерді қолданады.

Бұл әдістер ұзақ мерзімді пайдалану кезеңдерін модельдеу кезінде әлдеқайда жоғары дәлдікке қол жеткізуге мүмкіндік береді, бұл 1-суретте көрсетілген.

1-суретте екі қисық бейнеленген: бірі – сызықты серпімді модельге, ал екіншісі – нақты тәжірибелік нәтижелерге сәйкес келеді. Тұрақты жүктеме әсері кезінде классикалық теория бойынша деформация ε тұрақты болып қалады ($\varepsilon = \varepsilon_0$), ал нақты тәжірибелік деректер көрсеткендей, 10-15 жылдық пайдалану мерзімі ішінде бұл деформация шамамен 2-3 есеге дейін артады [4,6].



Сурет 1. Сырғуды ескерген және ескермеген жағдайда салыстырмалы деформацияның (ε) уақыт бойынша өзгерісі

Осылайша, темірбетон құрылымдарын жобалау кезінде иілмелі деформацияларды есепке алу мәселесін зерттеу қазіргі құрылыс ғылымындағы өзекті бағыттардың бірі болып табылады. Сырғу және шөгу процестерін дәл есепке алу келесі міндеттерді шешу үшін қажет:

- ғимараттар мен құрылыстардың сенімділігін қамтамасыз ету;
- апаттық жағдайлардың алдын алу;
- құрылымдардың қызмет ету мерзімін дұрыс болжау [2,5,7].

Зерттеу шарттары мен әдістері. Темірбетон құрылымдарының жұмыс істеуіне бетондағы иілмелі деформациялардың (сырғу мен шөгу) әсерін талдау мақсатында зерттеулерде келесі бастапқы шарттар қабылданды:

- бетон класы В30, есептік серпімділік модулі $E_b = 3.0 \cdot 10^4$ МПа [7];
- арматура класы А500С, ағымдылық шегі $f_y = 500$ МПа [8];
- жүктемелер: тұрақты (G) және ұзақ мерзімді пайдалану (Q), $\psi_1 = 0,7$ біріктіру коэффициентімен қабылданды [9].

Есептік кезеңнің ұзақтығы – 50 жыл, деформациялардың тіркелуі 1, 5, 10 және 20 жыл сайын жүргізілді.

Бетонның сырғу қасиеттерін сипаттау үшін халықаралық тәжірибеде ұсынылатын Бажант пен Бавейдің В3 моделі қолданылды [3,10]. Салыстыру мақсатында қосымша келесі әдістер пайдаланылды:

- ҚР ЕЖ EN 1992-1-1:2004/2011 бойынша келтірілген модуль әдісі [1];
- Eurocode 2 моделі [5].

Зерттеу әдістері: зерттеу барысында тәжірибелік сынақтар және сандық модельдеу (ANSYS бағдарламасында) қолданылды.

Тәжірибелік зерттеу: Бетонның ұзақ мерзімді деформацияларын анықтау үшін өлшемдері $10 \times 10 \times 40$ см болатын призмалық үлгілер дайындалды. Үлгілерге бетон беріктігінің шегінен 30% деңгейіндегі ұзақ мерзімді жүктеме түсірілді. Деформациялар тензодатчиктер арқылы тіркеліп отырды. Жедел деформация келесі формуламен анықталады:

$$\varepsilon_0 = \frac{\sigma}{E_b} \quad (4)$$

мұндағы, σ – үлгі ішіндегі кернеу.

Сырғуды ескергендегі бетонның толық деформациясын есептеу формуласы келесі түрде беріледі:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot (1 + \varphi(t, t_0)) \quad (5)$$

мұндағы, $\varphi(t, t_0)$ – уақытқа тәуелді сырғу коэффициенті.

Есептеулердің дәлдігін арттыру мақсатында ANSYS бағдарламасында ақырлы элементтер әдісі (FEM) қолданылды. Бұл модельде бетонның σ – ε сызықты емес диаграммасы Eurocode 2 нормативіне сәйкес енгізілді [11], ал шөгуде деформациялары Neville әдістемесі бойынша ескерілді [12].

Есептеу нәтижелері кестелік түрде (2-кесте) және графикалық түрде (2-сурет) ұсынылған.

2 кесте

Салыстырмалы модельдеу нәтижелері

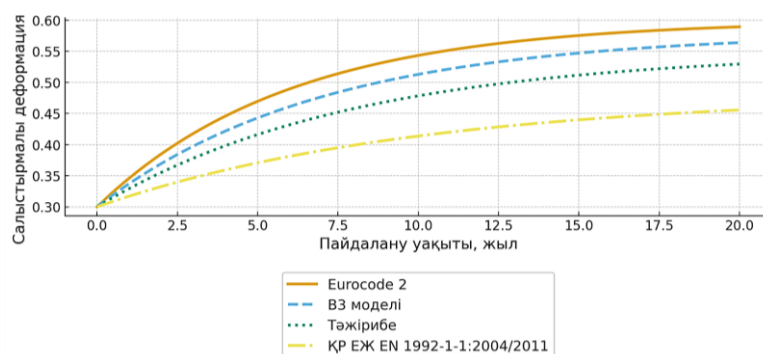
Есептеу әдісі	Деформация, ε , ‰	Тәжірибелік нәтижеден салыстырмалы ауытқу, %
ҚР ЕЖ EN 1992-1-1:2004/2011 [1]	0,42	–35
Eurocode 2 [11]	0,58	–10
Модель В3 [10]	0,63	–3
Тәжірибе	0,65	0

Бетон деформациясының уақыт бойынша дамуын талдау (2-сурет). Бетондағы деформацияның уақытқа тәуелді дамуын талдау нәтижелері келесіні көрсетеді:

– ҚР ЕЖ EN 1992-1-1:2004/2011 әдісі бойынша алынған деформациялар төмендетілген мәндерге ие, олардың шамасы 20 жыл өткеннің өзінде 0,45‰-тен аспайды;

– Eurocode 2 сызығы тәжірибелік деректермен жақсырақ сәйкестік көрсетеді, бұл әдістің есептік дәлдігін арттырады;

– В3 моделі тәжірибе нәтижелерімен іс жүзінде толық сәйкес келеді, оның есептік қателігі 5%-дан төмен.



Сурет 2. Бетон деформациясының уақыт бойынша дамуы
(B30 класы, жүктеме 30% Rb)

Зерттеу нәтижелері және оларды талқылау. Ұзақ мерзімді жүктеме әсері кезінде бетонның толық деформациясы бірнеше құрамдас бөліктерден тұрады: серпімді, сырғу, шөгу және қалдық (пластикалық) деформациялар.

Бұл қатынас келесі түрде өрнектеледі:

$$\varepsilon_{tot}(t) = \varepsilon_e + \varphi(t) \cdot \varepsilon_e + \varepsilon_{sh}(t) + \varepsilon_{pl} \quad (6)$$

мұндағы: $\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E_c}$ – бұл жедел серпімді деформация, яғни жүктеме әсер еткен сәтте пайда болатын бастапқы кернеу-деформация қатынасы; $\varphi(t)$ – уақытқа тәуелді сырғу коэффициенті; $\varepsilon_{sh}(t)$ – шөгу деформациясы, ε_{pl} – қалдық пластикалық құрамдас бөлік [13-16]. Тәжірибелік зерттеу нәтижелері 3-суретте келтірілген.

3-суретке сәйкес, бетонның ұзақ мерзімді жұмыс істеуі барысында:

- сырғу деформациясының шамасы шамамен 700 мк деңгейіне жетеді;
- шөгу деформациясы шамамен 300 мк құрайды;
- ал сирек кездесетін артық жүктемелер (18 МПа дейін) кезінде пайда болатын қалдық пластикалық деформациялар жалпы деформацияны қосымша 10-15%-ға арттырады.

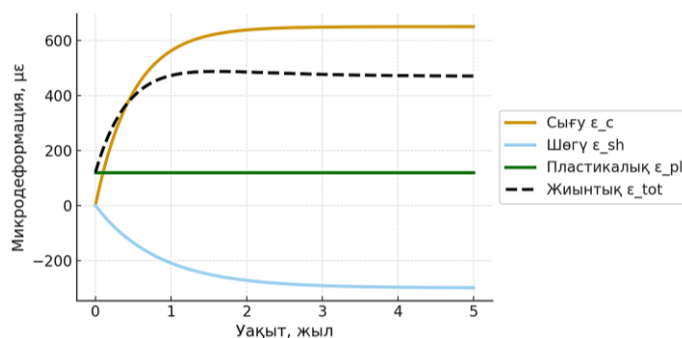
Аталған нәтижелер Eurocode 2 және ACI 318 нормативтік ережелерінде көрсетілген деректермен толық сәйкес келеді [12,16].

Іілгіш темірбетон элементтерін талдау үшін «момент–қисықтық» (М– χ) тәуелділік қисықтары тұрғызылды.

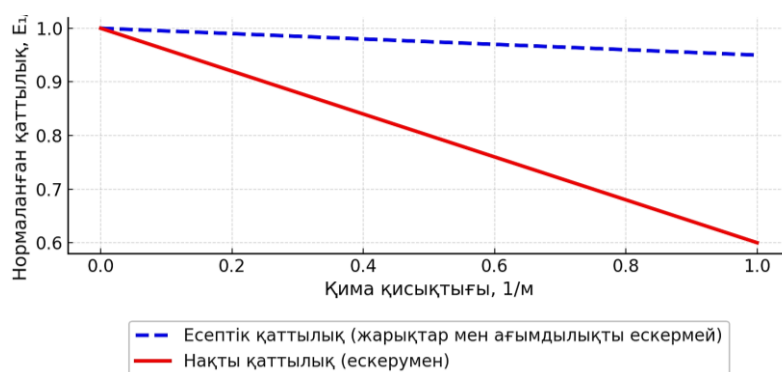
Серпімді модельде арматура ағымдылық шегіне жеткенге дейін ($\chi_u \approx 1,5-1,6 \cdot 10^{-3}$) моменттің сызықты өсуі байқалады. Алайда, жарықтардың түзілуін ескерген жағдайда элементтің қаттылығы шамамен екі есеге төмендейді, бұл $X_{cr} = 0,8 \cdot 10^{-3}$ мәнінен кейін анық көрінеді. Бетон элементінің тиімді қаттылығы келесі формула арқылы өрнектеледі:

$$(EI)_{eff}(t,x) = \frac{E_c I_c}{1 + \alpha \varphi(t)} \cdot \Psi_{cr}(x, \rho) \quad (7)$$

мұндағы: I_c – жарықсыз қиманың инерция моменті; α – жүктеменің әсер ету ұзақтығының коэффициенті; Ψ_{cr} – жарықтар түзілуінің коэффициенті [15,16].



Сурет 3. Ұзақ мерзімді жүктеме әсеріндегі бетонның толық деформациясы



Сурет 4. Құрылым қаттылығының жарықтар түзілуіне тәуелділігі

4-суреттегі график көрсеткендей, жарықтардың түзілуін және материалдың ағымдылығын (пластикалық ағу) елемей элементтің есептік қаттылығын артық бағалауға, ал қисықтықты (χ) төмендетіп бағалауға әкеледі. Бұл қателік әсіресе пайдалану кезеңінде конструкцияның нақты жұмыс қабілетін бағалауда маңызды әсер етеді.

Ұзақ мерзімді жүктеме кезінде ұзындығы 6 м болатын арқалықтың иілуін есептеу нәтижесінде 5 жыл ішінде сырғу әсерінен иілудің шамамен 40-50%-ға артқаны анықталды. Артық жүктемелер кезінде ($1,8 \sigma_s$ дейін) қалдық байқалып, ол бастапқы прогибтің шамамен 12%-ын құрады.

Осындай құбылыстар Бажант пен Жирасек [14], сондай-ақ Gilbert және Ranzi [15] жүргізген тәжірибелік зерттеулерде де тіркелген.

3-кестедегі деректерді талдау келесі қорытындыларды жасауға мүмкіндік береді:

- ұзақ мерзімді жүктеме үлесі 0,3-тен 0,5-ке артқан кезде сырғу коэффициенті ϕ шамамен 20-30% өседі;
- арматура пайыздылығы 0,8%-дан 2,0%-ға дейін артқанда, иілу шамасы 20-25%-ға азаяды;
- арматура аз, ал жүктеме жоғары болған жағдайда иілу нормативтік шектен ($L/250$) асып түседі, бұл құрылымның пайдалану сенімділігін төмендетеді.

3-кесте

Арматура пайыздылығы мен жүктеме деңгейінің қисықтыққа әсері

Арматура мөлшері, %	Жүктеме деңгейі, % R_b	Есептік қисықтық, 1/м	Нақты қисықтық (жарықтар мен ағымдылықты ескере отырып), 1/м	Айырмашылық, %
0,8	30	$0,75 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$	+46,7
1,0	30	$0,62 \cdot 10^{-3}$	$0,95 \cdot 10^{-3}$	+53,2
1,2	30	$0,55 \cdot 10^{-3}$	$0,85 \cdot 10^{-3}$	+54,5
0,8	50	$1,40 \cdot 10^{-3}$	$2,25 \cdot 10^{-3}$	+60,7
1,0	50	$1,10 \cdot 10^{-3}$	$1,90 \cdot 10^{-3}$	+72,7
1,2	50	$0,95 \cdot 10^{-3}$	$1,65 \cdot 10^{-3}$	+73,7
0,8	70	$2,20 \cdot 10^{-3}$	$3,80 \cdot 10^{-3}$	+72,7
1,0	70	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$3,10 \cdot 10^{-3}$	+67,6
1,2	70	$1,55 \cdot 10^{-3}$	$2,65 \cdot 10^{-3}$	+71,0

Жарықтардың түзілуі конструкциялардың ұзақмерзімділігіне елеулі ықпал ететінін атап өткен жөн. Жарықтардың ашылуы құрылымның қаттылығын төмендетіп қана қоймай, сонымен қатар оның қызмет ету мерзімін қысқартады:

$$\omega_{cr} = \frac{\sigma_s \cdot \varphi \cdot l_0}{E_s \cdot \rho} \quad (6)$$

мұндағы: σ_s – арматурадағы кернеу; E_s – болаттың серпімділік модулі; l_0 – жабыстыру ұзындығы; ρ – арматура пайыздылығы [2].

Neville [2] зерттеулері көрсеткендей, егер жарықтың ашылу ені 0,3 мм-ден асса, онда арматураның коррозия жылдамдығы шамамен екі есе артады, бұл өз кезегінде құрылымның ұзақмерзімді беріктігін айтарлықтай төмендетеді.

Тәжірибелік зерттеу нәтижелерін арқалықтардың табиғи сынақтарымен [15] және fib Model Code 2010 [13] әдістемелік ұсынымдарымен салыстыру төмендегідей қорытындыларды көрсетті:

- сырғу мен шөгуді есепке алған жағдайда, есептік және тәжірибелік иілулердің айырмашылығы 12-15% шамасында болды;
- қалдық (пластикалық) деформацияларды ескермеу кезінде айырмашылық 20-25%-ға дейін артты;
- арматура пайыздылығының артуы (есептік және тәжірибелік деректер бойынша) иілу шамамен 18%-ға азайтты.

Осылайша, ұсынылған есептік модель нақты физикалық процестерді дәл бейнелейді және темірбетон құрылымдарының нақтыланған (жетілдірілген) есептерінде сенімді қолдануға мүмкіндік береді.

Қорытынды. Жүргізілген зерттеулер бетонның иілмелі деформацияларын, яғни сырғу, шөгу және пластикалық құрамдас бөліктерін есепке алудың темірбетон құрылымдарының есептік дәлдігін қамтамасыз етуде маңызды рөл атқаратынын көрсетті.

Аталған факторларды ескермеу қаттылықтың артық бағалануына, ал қисықтықтың (χ) төмен бағалануына алып келеді. Бұл өз кезегінде нормативтік прогибтердің артуына және құрылымның қызмет ету мерзімінің қысқаруына себеп болуы мүмкін.

Әдістемелердің салыстырмалы талдауы көрсеткендей:

- ҚР ЕЖ EN 1992-1-1:2004/2011 бойынша қолданылатын келтірілген модуль әдісі едәуір қателіктерге әкеледі;
- ал Eurocode 2 және әсіресе В3 моделі (Бажант–Бавей) тәжірибелік нәтижелермен жақсы сәйкестік көрсетеді.

Сондықтан практикалық жобалау кезінде деформациялардың уақыт бойынша эволюциясын және жарықтардың ашылуын ескеретін модельдерді пайдалану ұсынылады. Мұндай тәсіл конструкциялардың ұзақмерзімділігін және пайдалану жарамдылығын дәлірек болжауға мүмкіндік береді.

Сонымен қатар, осы зерттеу нәтижелері ұлттық нормативтік құжаттарды жетілдіруде және құрылыс механикасы мен темірбетон құрылымдары пәндері бойынша білім беру тәжірибесінде қолдануға жарамды.

Әдебиеттер тізімі

1. ҚР ЕЖ EN 1992-1-1:2004/2011. Темірбетон конструкцияларды жобалау. 1-1 бөлімі. Жалпы ережелер және ғимараттарға арналған ережелер [Мәтін]. – 2025 ж. 25 тамыздың өзгертулерімен. – 258 б.
2. Neville, A.M. Properties of Concrete [Text]. – London: Pearson Education, 2015. – 846 p.
3. Герасимов, Н.Н. Деформации и трещинообразование в железобетонных элементах [Текст] / Н.Н. Герасимов, А.Б. Соколов // Строительные конструкции. – 2020. – № 4. – С. 21-30.
4. Shubaili M., Elawadi A., Orton S.L., Tian Y. Time-Dependent Behavior of RC Slab-Column Connections under High Sustained Loads // Structures. – 2024. – Vol. 61.
5. Eurocode 2. Design of Concrete Structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. – Brussels: CEN, 2019. – 225 p.
6. Bazant Z.P., Baweja S. Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures: Model B3 – short form // Adam Neville Symposium: ACISP-194. – Michigan, 2000. – P. 85-100.
7. Крылов, В.А. Методы расчета железобетонных конструкций с учетом ползучести бетона [Текст] / В.А. Крылов // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – № 3. – С. 44-55.
8. ГОСТ 34028-2016. Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия [Текст]. – Введ. 2018-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2017. – 52 с.
9. НТП РК 01-01-3.1 (4.1)-2017. Нагрузки и воздействия на здания [Текст]. – С изменениями от 30.12.2021.
10. Яковлев, С.К. Расчет железобетонных конструкций по Еврокоду EN 1992. В 2 ч. Ч. 1. Изгибаемые и сжатые железобетонные элементы без предварительного напряжения. Определение снеговых, ветровых и крановых нагрузок. Сочетание воздействий [Текст] / С.К. Яковлев, Я.И. Мысляева. – М.: МГСУ, 2015. – 204 с.
11. Технический регламент. Требования к безопасности железобетонных, бетонных конструкций [Текст]: принят постановлением Правительства РК № 1198 от 22.12.2008.
12. ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete. – Farmington Hills: American Concrete Institute, 2019. – 628 p.
13. fib Model Code for Concrete Structures 2010. – Lausanne: Fédération Internationale du Béton (fib), 2013. – 434 p.
14. Bazant Z.P., Jirásek M. Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures. – Dordrecht: Springer, 2018. – 980 p.
15. Gilbert R.I., Ranzi G. Time-Dependent Behaviour of Concrete Structures. – London: CRC Press, 2010. – 443 p.
16. Eurocode 2. Design of Concrete Structures. EN 1992-1-1:2004. – Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2004. – 227 p.

Материал редакцияға 16.10.25 түсті, 08.12.25 қабылданды.

Ж.А. Усенкулов¹, Д.Ж. Артыкбаев¹,
Ф.Х. Аубакирова¹, А.М. Будикова², А.Б. Курбанбаев³

¹Южно-Казахстанский исследовательский университет им. М. Ауэзова,
Шымкент, Казахстан

²Кызылординский университет им. Қорқыт Ата, Кызылорда, Казахстан

³Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,
Бишкек, Кыргызстан

К ВОПРОСУ УЧЕТА НЕУПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема учёта неупругих деформаций железобетонных конструкций при проектировании, которая влияет на надёжную эксплуатацию сооружений. Выполнен анализ существующих методов расчета, результатов экспериментальных испытаний призматических образцов и численного моделирования в программе ANSYS с учётом нормативных требований СП РК EN 1992-1-1:2004/2011, Eurocode 2, а также модели В3 Бажанта-Бавея. Установлено, что полная деформация бетона формируется за счёт упругой, ползучей, усадочной и остаточной составляющих. Экспериментальные данные показывают, что величина ползучих деформаций достигает ~700 мк в течение первых пяти лет, тогда как усадка составляет порядка -300 мк. Расчёты по модели В3 демонстрируют наименьшее расхождение с экспериментальными результатами (< 5%), а метод приведённого модуля существенно занижает величину деформаций на 30-35%. Сформулированы рекомендации по практическому применению современных расчётных моделей (Eurocode 2, В3) при проектировании, что позволит повысить точность определения прогибов и кривизны, а также обеспечит надёжность и долговечность конструкций.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, неупругие деформации, ползучесть бетона, усадка, трещинообразование, жёсткость, прогиб, долговечность конструкции.

Zh.A. Ussenkulov¹, D.Zh. Artykbaev¹,
F.Kh. Aubakirova¹, A.M. Budikova², A.B. Kurbanbaev³

¹M. Auezov South Kazakhstan Research University, Shymkent, Kazakhstan

²Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan

³Razzakov Kyrgyz State Technical University, Bishkek, Kyrgyzstan

ON THE ISSUE OF ACCOUNTING FOR INELASTIC DEFORMATIONS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Abstract. The article considers the actual problem of taking into account inelastic deformations of reinforced concrete structures during design, which affects the reliable operation of structures. The analysis of existing calculation methods, the results of experimental tests of prismatic samples and numerical modeling in the ANSYS program, taking into account the regulatory requirements of the Joint Venture of the Republic of Kazakhstan, is carried out. 5.03-34-2005, Eurocode 2, as well as the Bazhant-Bavea B3 models. It is established that the complete deformation of concrete is formed due to elastic, creeping, shrinkage and residual components. Experimental data show that creeping deformations reach ~700 μm during the first five years, while shrinkage is on the order of -300 μm. Calculations based on the B3 model show the smallest discrepancy with experimental results (< 5%), and the modulus method significantly underestimates the magnitude of deformations by 30-35%. Recommendations on the practical application of

modern calculation models (Eurocode 2, B3) in design are formulated, which will improve the accuracy of determining deflections and curvature, as well as ensure the reliability and durability of structures.

Keywords: reinforced concrete structures, inelastic deformations, creep of concrete, shrinkage, cracking, rigidity, durability of the structure.

References

1. QR Building Code EN 1992-1-1:2004/2011. Temirbeton konstruksiyalary zobalau. 1-1 bölimi. Jalpı erejeler jäne ğımarattarga arnalğan erejeler [Design of reinforced concrete structures. Part 1-1. General rules and rules for buildings]. – With amendments as of August 25, 2025. – 258 p. [in Kazakh].
2. Neville, A.M. Properties of Concrete [Text]. – London: Pearson Education, 2015. – 846 p.
3. Gerasimov, N.N., Sokolov A.B. Deformatsii i treshchinoobrazovanie v zhelezobetonnykh elementakh [Deformations and cracking in reinforced concrete elements] // Construction Structures. – 2020. – No. 4. – P. 21-30. [in Russian].
4. Shubaili M., Elawadi A., Orton S.L., Tian Y. Time-Dependent Behavior of RC Slab-Column Connections under High Sustained Loads // Structures. – 2024. – Vol. 61.
5. Eurocode 2. Design of Concrete Structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. – Brussels: CEN, 2019. – 225 p.
6. Bazant Z.P., Baweja S. Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures: Model B3 – short form // Adam Neville Symposium: ACISP-194. – Michigan, 2000. – P. 85-100.
7. Krylov, V.A. Metody rascheta zhelezobetonnykh konstruksiy s uchetom polzuchesti betona [Methods for Calculating Reinforced Concrete Structures Considering Concrete Creep] // Bulletin of MGSU. – 2021. – Vol. 16. – No. 3. – P. 44-55. [in Russian].
8. GOST 34028-2016. Prokat armaturnyi dlya zhelezobetonnykh konstruksiy. Tekhnicheskie usloviya [Reinforcing Steel for Reinforced Concrete Structures. Technical Specifications]. – Introduced 2018-01-01. – Moscow: Standartinform, 2017. – 52 p. [in Russian].
9. NTP RK 01-01-3.1 (4.1)-2017. Nagruzki i vozddeystviya na zdaniya [Loads and Actions on Buildings]. – With amendments as of 30.12.2021. [in Russian].
10. Yakovlev, S.K., Myslyaeva, Ya.I. Raschet zhelezobetonnykh konstruksiy po Evrokodu EN 1992. V 2 ch. Ch. 1. Izgibaemye i szhatye zhelezobetonnyye elementy bez predvaritel'nogo napryazheniya. Opredelenie snegovykh, vetrovykh i kranovykh nagruzok. Sochetanie vozddeystviy [Design of Reinforced Concrete Structures According to Eurocode EN 1992. In 2 Parts. Part 1. Bending and Compressed Reinforced Concrete Elements without Prestressing. Determination of Snow, Wind and Crane Loads. Combination of Actions]. – Moscow: MGSU, 2015. – 204 p. [in Russian].
11. Technical Regulation. Trebovaniya k bezopasnosti zhelezobetonnykh i betonnykh konstruksii [Safety Requirements for Reinforced Concrete and Concrete Structures]: adopted by the Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan No. 1198 dated 22.12.2008. [in Russian].
12. ACI 318-19. Building Code Requirements for Structural Concrete. – Farmington Hills: American Concrete Institute, 2019. – 628 p.
13. fib Model Code for Concrete Structures 2010. – Lausanne: Fédération Internationale du Béton (fib), 2013. – 434 p.
14. Bazant Z.P., Jirásek M. Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures. – Dordrecht: Springer, 2018. – 980 p.
15. Gilbert R.I., Ranzi G. Time-Dependent Behaviour of Concrete Structures. – London: CRC Press, 2010. – 443 p.
16. Eurocode 2. Design of Concrete Structures. EN 1992-1-1:2004. – Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2004. – 227 p.