

Паливода О. А.

ВРАХУВАННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ПОВЗУЧОСТІ ПРИ РОЗРАХУНКУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

***Анотація.** Представлено аналіз загальних методик та принципів розрахунку залізобетонних елементів в умовах фізичної нелінійності. Розглянуто особливості сучасної теорії повзучості бетону. Зосереджено увагу на проблемі врахування фактора часу в розрахунках залізобетонних конструкцій. Наведені результати експериментальних досліджень бетонів при різних рівнях стискаючих напружень, завантажених в молодому та середньому віці. Розглянуті питання доцільності врахування нелінійних відносних деформацій повзучості при практичних розрахунках. Проведено обробку дослідних даних, зроблено висновки.*

***Ключові слова:** розрахунок залізобетонних елементів; фізична нелінійність; теорія повзучості бетону; пружно-пластичні деформації.*

Вступ. Сучасна теорія розрахунків будівельних конструкцій, в тому числі нормативні моделі, в більшості своїй спираються на три розділи будівельної механіки: лінійна механіка, нелінійна механіка, теорія повзучості.

Принцип малості переміщень Навьє, який використовується разом з законом Гука, створили методи лінійної теорії. Заміна закону Гука нелінійними залежностями між напруженнями та деформаціями призводить до врахування фізичної нелінійності в теорії нелінійної пружності та теорії пластичності. Загальні методи розрахунку в умовах фізичної нелінійності розроблено недостатньо. Тривалі деформації бетону при нелінійній повзучості мало досліджені. А саме: слабо вивчені характер нелінійності деформацій повзучості бетону молодого віку та ступінь нелінійності цих деформацій в зоні низьких стискаючих напружень.

Внаслідок цього в нормах деяких країн зазначені лише декларативні міркування про можливість розрахунку з врахуванням фізичної нелінійності.

Аналіз останніх досліджень. Теорія повзучості бетону має істотний вплив на розрахунки довготривалого опору залізобетонних конструкцій. Повзучості бетону і залізобетонних конструкцій присвячені фундаментальні праці Работнова Ю.Н., Арутюняна Н.Х., Гвоздева А.А., Девиса Р.Е., Гленвіля В.Х., Васильєва П.І., Александровського С.В., Порокоповича І.Є., Уліцького С.Є., Качанова Л.М., Бондаренка В.М., Ржаніцина А.Р., Фройдентала А. та інших вчених.

В сучасній теорії повзучості бетону є декілька моделей, різних за рівнем розробки та використанням в реальних розрахунках.

Перш за все це нелінійна теорія повзучості Арутюняна Н.Х. [1] з миттєвими лінійними властивостями, яка застосовується в розрахунках залізобетонних конструкцій. До недоліків цієї теорії відноситься та обставина, що вона практично стирає ефект напружень, які діють безпосередньо перед моментом спостереження деформацій. Ця теорія не відображає швидкого натікання деформацій повзучості до моменту спостереження, близькому до моменту завантаження зразків, яке спостерігається в дослідах. Початкові ділянки кривих повзучості, які побудовані, ґрунтуючись на теорії Арутюняна Н.Х., не мають характерного зростаючого до гори обрису, який спостерігається при дослідах не тільки над молодим, а і над старим бетоном. При цьому існують твердження, що вона неприйнятна для вирішення задач з процесами, які швидко змінюються в часі.

Яшин А.В. запропонував міру повзучості бетону, яка поєднувала особливості теорії спадковості і теорії старіння бетону, і таким чином виправляла недоліки міри повзучості Арутюняна Н.Х. [1]. На жаль, модель Яшина А.В. не отримала достатнього розвитку внаслідок неоднозначного її оцінювання. До її недоліків віднесли складність, а також те, що побудовані на її основі інтегральні рівняння повзучості неможливо привести до відповідних диференціальних рівнянь.

Катін Н.І. ускладнив модель Яшина А.В., доповнивши її сингулярною функцією, аналогічною функції Фройдентала А.М.

Прокопович І.Є. та Уліцький І.І. спростили модель повзучості бетону Яшина А.В. Цю спрощену модель з успіхом використовував у інтегральній формі Яценко С.А. для вирішення деяких практичних задач.

Александровський С.В. та його учні в рамках миттєво пружного матеріалу та гіпотез Арутюняна Н.Х. побудували інтегральні рівняння нелінійної повзучості, які враховують явища швидко напливаючої повзучості.

Євростандарти враховують тільки граничну характеристику повзучості бетону; в розрахунках вона додатково множить на відношення рівнів короточасного і додаткового навантаження. В цій моделі повзучості бетон вважається пружним, таким, що необмежено працює на розтягання-стискання. Чисельні характеристики цієї моделі, отримані для випадку центрального стискання бетонного стрижня, розповсюджуються на інші випадки роботи стиснуто-зігнутих залізобетонних елементів. Наближеність цього підходу, реалізованого при довготривалому навантаженні, істотно відрізняється від строгої деформаційної моделі, покладеної в основу розрахунків короточасного навантаження залізобетону. Разом з цим слід вказати на те, що результати розрахунків довготривалого навантаження колон в Єврокодах дають запас міцності несучої здатності, величина якого ніяк не оцінюється [2].

Потрібно звернути увагу на проблему врахування фактора часу в розрахунках залізобетонних конструкцій. Для її вирішення повинні сумісно використовуватись рівняння пластичності та повзучості. Багато сучасних

теорій повзучості цій вимозі не задовольняють, оскільки використовують для миттєвих деформацій закон Гука, а не криволінійну залежність, яка є аналітичним записом криволінійної діаграми $\sigma - \varepsilon$ для бетону з низхідною гілкою [3]:

$$\sigma = (a\varepsilon) \cdot \left(\frac{b + c\varepsilon}{d + c\varepsilon} \right), \quad (1)$$

де a, b, c, d – емпіричні коефіцієнти.

Для описування повзучості тіл, які не старіють, та тіл, навантажених в старому віці, застосовують теорію пружної спадковості, яка отримала розвиток в працях Работнова Ю.Н., Ржаніцина А.Р., Малмейстера А.К., Скудрі А.М. та інших вчених. В цій теорії повзучості приймаються додаткові припущення про сталість величини для функції старіння, а також сталість модуля пружності:

$$E(\tau) = E_0 = const, \quad (2)$$

Слід відмітити, що теорія пружно-повзучого тіла описує часткову оберненість деформації повзучості.

Теорія ж пружної спадковості ігнорує процес старіння бетону, в наслідок чого вся деформація повзучості виявляється оберненою.

В лінійній теорії повзучості, створеній спеціально для розрахунків бетонних та залізобетонних конструкцій, яку назвали теорією старіння, використовується додаткова гіпотеза про паралельність кривих повзучості. Остання дозволяє отримати криву повзучості бетону, навантаженого у віці τ , з кривої повзучості бетону, навантаженого в початковому віці:

$$C(t, \tau) = C(t) - C(\tau), \quad \text{або} \quad (3)$$

$$C(t, \tau) = C(t) - C(\tau), \frac{1}{E(0)} \cdot [\varphi(t) - \varphi(\tau)],$$

де $\varphi(t), \varphi(\tau)$ – характеристика повзучості, що апроксимується певною кривою.

Теоретично формула (3) означає, що криві повзучості різних бетонних зразків, навантажених одним и тим же напруженням σ , але в різні моменти часу, співпадають всіма точками при їх поступовому переміщенні по вертикалі (вздовж вісі деформацій). Ця властивість паралельності вносить спрощення в розрахунки залізобетонних конструкцій на повзучість. Також слід звернути увагу, що гіпотеза паралельності кривих повзучості призводить до повної незворотності деформацій повзучості.

В нелінійній теорії повзучості [4] використовується додаткова гіпотеза про існування афінної подібності кривих деформацій простої повзучості, які відповідають напруженням різних рівнів:

$$\varepsilon_{II}(\sigma, t, \tau_i) = f(\sigma) \cdot C(t, \tau_i), \quad (4)$$

де $\varepsilon_{II}(\sigma, t, \tau_i)$ – деформація повзучості волокна, навантаженого напруженням σ ;

$f(\sigma)$ – деяка нелінійна функція, яка носить назву функції напруження;

$C(t, \tau_i)$ – величина деформації повзучості при одиничному навантаженні у волокні (міра повзучості).

Гіпотеза (4) означає, що криву деформацій повзучості, спричинену напруженням σ , можна отримати множенням ординат кривої деформацій повзучості, спричинену одиничним напруженням, на певну функцію напружень.

Аналіз наведеного вище дозволяє дійти висновку, що нелінійна повзучість бетону вивчена недостатньо як експериментально, так і теоретично. Існуючі теорії при детальнішому розгляді виявляються дуже суперечливими та малопристосованими для практичних розрахунків.

Постановка мети і задач дослідження. Метою поставлених досліджень було наступне: провести аналіз даних, отриманих під час дослідження бетонних елементів, завантажених в молодому та середньому віці, на дію тривалих навантажень; з'ясувати особливості нелінійних деформацій повзучості, які виникають при низькому рівні напружень та для всіх його рівнів.

Методика досліджень. З огляду на означену мету, було проаналізовано експериментальні дані отримані дослідниками [5...7], які в різний час займалися питаннями вивчення нелінійності деформацій повзучості при тривалій дії навантаження. Експериментальні дані були узагальнено та проведено їх обробку.

Результати досліджень. На підставі дослідних даних було побудовано криві питомих, тобто віднесених до одиниці напружень, деформацій повзучості при різних рівнях відносних напружень в зразках (рис. 1).

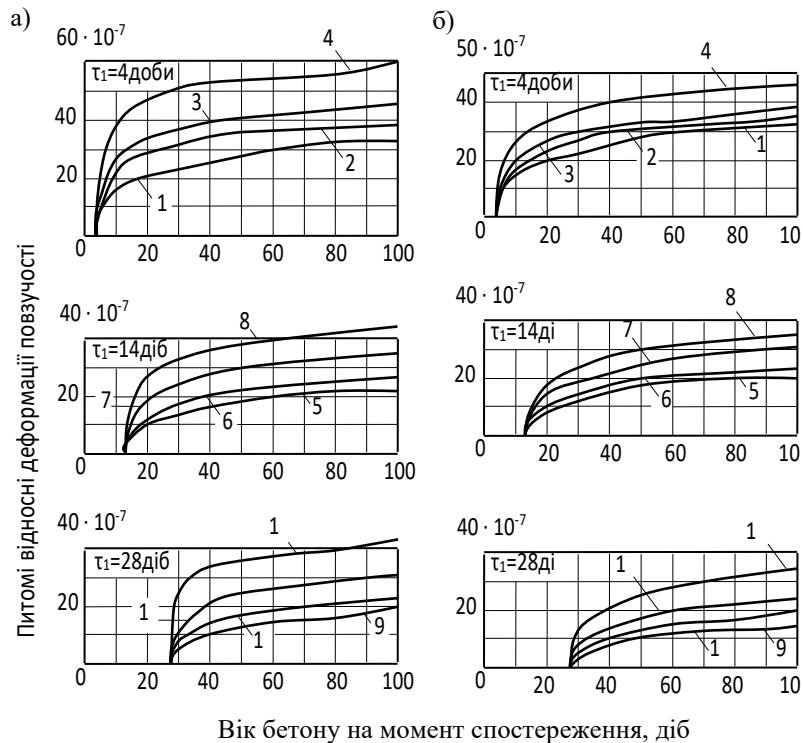


Рис. 1. Експериментальні криві питомих деформацій повзучості при різних рівнях сталих напружень стискання з врахуванням (а) та без врахування (б) деформацій, що натікають за час витримки при навантаженні:

$$\tau_1 = 4 \text{ доби: } 1 - \sigma = 0.09R_{\text{пр}}; 2 - \sigma = 0.29R_{\text{пр}}; 3 - \sigma = 0.49R_{\text{пр}}; 4 - \sigma = 0.77R_{\text{пр}};$$

$$\tau_1 = 14 \text{ діб: } 5 - \sigma = 0.10R_{\text{пр}}; 6 - \sigma = 0.29R_{\text{пр}}; 7 - \sigma = 0.48R_{\text{пр}}; 8 - \sigma = 0.72R_{\text{пр}};$$

$$\tau_1 = 28 \text{ діб: } 9 - \sigma = 0.10R_{\text{пр}}; 10 - \sigma = 0.31R_{\text{пр}}; 11 - \sigma = 0.52R_{\text{пр}}; 12 - \sigma = 0.73R_{\text{пр}}.$$

На рисунку 1 чітко спостерігається нелінійна залежність деформацій повзучості від діючих сталих напружень починаючи з самого малого їх рівня $\sigma = 0,09 R_{\text{пр}}$; при цьому нелінійність спостерігається для бетонів різного віку на момент навантаження. Чіткої межі лінійної повзучості бетону провести не можливо; ймовірно, навіть при низьких рівнях напружень стискання в мікроструктурі бетону мають місце певні порушення або пластичні зсуви, які спричиняють нелінійність його деформацій повзучості. Тому більш доцільно казати лише про умовну межу лінійної повзучості бетону, за якою йде зона високого ступеня нелінійності.

Аналіз рисунку 1, а дозволяє стверджувати, що криві питомих деформацій повзучості істотно відрізняються за величиною ординат, починаючи з самого низького рівня напружень. Також слід відмітити, що ступінь нелінійності деформацій повзучості особливо великий в моменти часу, близькі до початку завантаження зразків. Через деякий час криві питомих деформацій стають майже паралельними, тобто приріст деформацій повзучості починає лінійно залежати від діючих напружень. Але все одно початкова нелінійність деформацій продовжує істотно впливати на величини ординат кривих повзучості на всьому періоді спостережень.

Про те, що нелінійність деформацій повзучості насамперед пов'язана з процесами, які відбуваються в бетонному зразку безпосередньо після його завантаження, говорить і значна різниця у величинах деформацій, що натікають за час витримки при навантаженні зразка до заданого рівня напружень (рис. 2, а). Якщо ці деформації не включати у величину деформацій повзучості, то ступінь нелінійності останніх значно знизиться (рис. 2, б). Криві питомих деформацій повзучості на рисунку 2, б для кожного віку бетону до моменту завантаження по величині ординат відрізняються менше, ніж на рисунку 2, а.

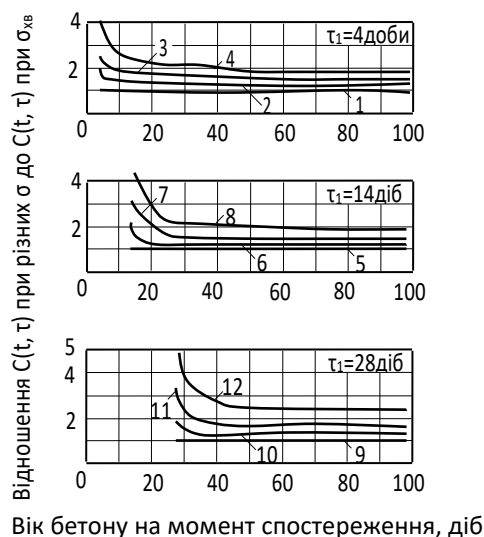


Рис. 2. Криві зміни відношення питомих деформацій повзучості при різних рівнях сталих напружень до кривої повзучості, отриманої при $\sigma / R_{пр} \approx 0.1$. Позначення ті ж, що і на рис. 1.

повзучості дозволяє зробити висновок, що швидко напливаючі деформації можуть складати значну долю (до 20...26%) деформацій повзучості. Не враховувати їх неприпустимо, оскільки це може призвести до суттєвих неточностей при розрахунку конструкцій на тривалі впливи, наприклад при визначенні втрат попереднього напруження в арматурі.

Також можна говорити про те, що відносні деформації повзучості бетонів, завантажених в молодому та середньому віці при різних рівнях стискаючих напружень, не являються мірою повзучості. Таким чином в найбільш розповсюджених випадках лінійної повзучості практично не існує. Прийняття лінійного зв'язку між напруженнями та деформаціями повзучості при низьких рівнях напружень дуже умовне і доволі часто не є доцільним.

Література

1. Арутюнян Н.Х. Некоторые вопросы теории ползучести. М., 1952. – 323 с.
Arutyunyan N.Kh. Nekotorye voprosy teorii polzuchesti [Some questions of the theory of creep]. Moscow, 1952. – 323 p.
2. Беглов А.Д., Санжаровский Р.С., Бондаренко В.М. Ползучесть бетона и модели Евростандартов. – Бетон и железобетон. № 2, 2005. – с. 29 – 30.
Beglov A.D., Sanzharovskiy P.S., Bondarenko V.M. Polzuchest betona i modeli Evrostandartov [Creep concrete and European standard models]. – Beton i zhelezobeton (Science Magazine). № 2, 2005. – pp. 29 – 30.
3. Sargin M. Stress-strain relations hips for concrete and the analysis of structural concrete sections.-SM Study, № 4, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Ontario, Canada, 1971. – pp. 114 – 119.
4. Васильев П.И. Связь между напряжениями и деформациями в бетоне при сжатии с учётом времени. – Известия ВНИИГ. 1951, Т. 45, с. 78 – 92.
Vasiljev P.I. Svyaz mezhdru napryazhenijami i deformatsiyami v betone pri szhatiji s uchetom vremeni [The relationship between stresses and deformations in concrete in compression with time]. – Izvestija VNIIN (Science Magazine), 1951, issue 45, pp. 78 – 92.
5. Мамуров М.М. Нелинейная ползучесть железобетонных стержневых конструкций. Дисс. канд. техн. наук. ЛИСИ, 1983. – 179 с.
Mamurov M.M. Nelinejnaya polzuchest zhelezobetonnyh sterzhnevyyh konstruksiy [Nonlinear creep of reinforced concrete core structures. Diss. Ph.D.], 1983. – 179 p.
6. Мельник Р.А. Экспериментальные исследования нелинейной ползучести бетона. Сборник научных трудов КИСИ, вып. 16, 1961. – с. 38 – 43.
Melnik R.A. Eksperimentalnyje issledovaniya nelinejnoy polzuchesti betona [Experimental studies of nonlinear creep concrete]. – sbornik nauchn. trudov KISI (Science Magazine), 1961, issue 16, pp. 38 – 43.
7. Мухамедиев Т.А. Методы расчёта статически неопределимых железобетонных стержневых и плоскостных конструкций с учётом нелинейных диаграмм деформирования материалов и режимов нагружения. Дисс. докт. техн. наук. М., 1990. – 343 с.
Mukhamediev T.A. Metody rascheta statichrski neopredelimykh zhelezobetonnykh sterzhnevyykh i ploskikh konstruksiy s uchetom nelinejnykh diagram deformirovaniya materialov i rezhimov nagruzheniya [Methods for calculating statically indeterminate reinforced concrete bar and plane structures with regard to non-linear material deformation diagrams and loading modes. Diss. Doct. Techn. Sc.]. Moscow, 1990, 343 p.

Ймовірно, неврахування швидко напливаючих деформацій – одна з причин того, що нелінійністю деформацій повзучості при низьких рівнях напружень стискання раніше нехтували. Слід також прийняти до уваги, що деформації, які напливають за час витримки при завантаженні, не були штучно віджаті пробними навантаженнями, як це за звичай буває при центруванні призм за фізичним центром.

Уявлення про ступінь та характер нелінійності повзучості дає рис. 2. Вигляд цих кривих, як і в роботах інших дослідників, свідчить про те, що ступінь нелінійності деформацій повзучості істотно залежить від тривалості спостереження ($t - \tau$), і, відповідно криві питомих деформацій повзучості не мають афінної подібності.

Про це свідчать і паралельність кривих зображених на рис. 1, а, оскільки паралельні криві повзучості не можуть бути афіноподібними, тобто їх неможливо отримати одну з іншої шляхом множення на сталий множник, якщо ординати не досягли граничних величин. Останнє спостереження вводить обмеження щодо застосування цієї гіпотези та її аналітичного запису (4) при вирішенні певного кола задач нелінійної теорії повзучості бетону.

Висновки.

Аналіз числових значень деформацій

References

1. Arutyunyan N.H. Nekotoryie voprosy teorii polzuchesti. M., 1952. – 323 s.
Arutyunyan N.Kh. Nekotoryje voprosy teorii polzuchesti [Some questions of the theory of creep]. Moscow, 1952. – 323 p.
2. Beglov A.D., Sanzharovskiy R.S., Bondarenko V.M. Polzuchest betona i modeli Evrostandartov. – Beton i zhelezobeton. # 2, 2005. – s. 29 – 30.
Beglov A.D., Sanzharovskiy P.S., Bondarenko V.M. Polzuchest betona I modeli Evrostandartov [Creep concrete and European standard models]. – Beton i zhelezobeton (Science Magazine). # 2, 2005. – pp. 29 – 30.
3. Sargin M. Stress-strain relations hips for concrete and the analysis of structural concrete sections.-SM Study, # 4, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Ontario, Canada, 1971. – pp. 114 – 119.
4. Vasilev P.I. Svyaz mezhdru napryazheniyami i deformatsiyami v betone pri szhatii s uchYotom vremeni. – Izvestiya VNIIG. 1951, T. 45, s. 78 – 92.
Vasiljev P.I. Svyaz mezhdru napryazhenijami i deformatsiyami v betone pri szhatiyi s uchedom vremeni [The relationship between stresses and deformations in concrete in compression with time]. – Izvestija VNIIG (Science Magazine), 1951, issue 45, pp. 78 – 92.
5. Mamurov M.M. Nelineynaya polzuchest zhelezobetonnyih sterzhnevnyih konstruksiy. Diss. kand. tehn. nauk. LISI, 1983. – 179 s.
Mamurov M.M. Nelinejnaya polzuchest zhelezobetonnyih sterzhnevnyih konstruksiy [Nonlinear creep of reinforced concrete core structures. Diss. Ph.D.], 1983. – 179 p.
6. Melnik R.A. Eksperimentalnye issledovaniya nelineynoy polzuchesti betona. Sbornik nauchnyih trudov KISI, vyip. 16, 1961. – s. 38 – 43.
Melnik R.A. Eksperimentalnye issledovaniya nelineynoy polzuchesti betona [Experimental studies of nonlinear creep concrete]. – sbornik nauchn. trudov KISI (Science Magazine), 1961, issue 16, pp. 38 – 43.
7. Muhamediev T.A. Metody raschYota staticheski neopredelimiyy zhelezobetonnyih sterzhnevnyih i ploskostnyih konstruksiy s uchYotom nelineynnyih diagramm deformirovaniya materialov i rezhimov nagruzheniya. Diss. dokt. tehn. nauk. M., 1990. – 343 s.
Mukhamediev T.A. Metody rascheta statichrski neopredelimiyykh zhelezobetonnykh sterzhnevnykh i ploskikh konstruksiy s uchedom nelineynnykh diagram deformirovaniya materialov i rezhimov nagruzheniya [Methods for calculating statically indeterminate reinforced concrete bar and plane structures with regard to non-linear material deformation diagrams and loading modes. Diss. Doct. Techn. Sc.]. Moscow, 1990, 343 p.

Представлен анализ общих методик и принципов расчета железобетонных элементов в условиях физической нелинейности. Рассмотрены особенности современной теории ползучести бетона. Сосредоточено внимание на проблеме учета фактора времени в расчетах железобетонных конструкций. Приведены результаты экспериментальных исследований бетонов при различных уровнях сжимающих напряжений, нагруженных в молодом и среднем возрасте. Рассмотрены вопросы целесообразности учета нелинейных относительных деформаций ползучести при практических расчетах. Проведена обработка опытных данных, сделаны выводы.

Ключевые слова: расчет железобетонных элементов; физическая нелинейность; теория ползучести бетона; упруго-пластические деформации.

The analysis of general methods and principles of calculation of reinforced concrete elements in conditions of physical nonlinearity is presented. The features of the modern theory of creep of concrete are considered. The attention is focused on the problem of taking into account the time factor in calculations of reinforced concrete structures. The results of concrete experimental tests at different levels of compressive stress at young and middle concrete age are shown. Accounting expedience of creep nonlinear strain at practical calculations is examined. Experimental data processing is carried out, conclusions are drawn.

Keywords: calculation of reinforced concrete elements; physical nonlinearity; theory of concrete creep; elastic-plastic deformations.

Відомості про авторів:

Паливода Олександр Анатолійович – к.т.н., доцент кафедри промислового, цивільного та міського будівництва ДВНЗ «Криворізький національний університет». Тел.: (056) 409-06-06; +38 097 852 82 00; E-mail: palyvoda87@ukr.net.

Palyvoda Oleksandr – Ph.D., Associate Professor, Department of Industrial, Civil and Urban Construction; SIHE «Kryvyi Rih National University».

Tel.: (056) 409-06-06; +38 097 852 82 00. E-mail palyvoda87@ukr.net.