

УДК 624.01:51.001:624.131

I.M. МИРОНЕНКО, В.В. ЛИТВИНЕНКО
 Одеський національний морський університет
 В.К. ЄГУПОВ
 Інститут геофізики імені С.І. Субботіна НАН України

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БЕТОНІВ ПРИ ЇХ СКЛАДНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Складні навантаження, під якими розуміють сукупні явища, що виникають під час зіткненні тіл, що рухаються, дуже часто зустрічаються в інженерній практиці під час будівництва та експлуатації, як окремих конструкцій, так і цілих споруд. При цьому складні навантаження можуть бути враховані при проектуванні, наприклад конструкції фундаментів ковальських молотів і тиску вальцьових пресів, оголовки забивних паль тощо, а також можуть бути пов'язані з випадковістю, наприклад, випадкове зіткнення якого-небудь тіла (транспорту, льоду, каміння та ін.) з елементами конструкції або споруд.

Одночасно зі складною дією (запланованою або випадковою) матеріал конструкції сприймає навантаження, пов'язані зі зміною температурно-вологісних умов експлуатації. Багаторазові заморозжування та розморозжування, насичення вологою, експлуатація при підвищених температурах призводять до зміни структури матеріалу та викликають зменшення терміну експлуатації. Сумарна дія імпульсного, техногенного та екологічного впливів може призвести до передчасного руйнування конструкції. Імовірність цього ґрунтується на встановленому явищі, що в умовах складної дії матеріал руйнується за більш низьких напружень у порівнянні зі статичними навантаженнями.

На думку багатьох фахівців, бетон є грубогетерогеним матеріалом з поліструктурною будовою. Об'єктивними структурними параметрами таких матеріалів слід вважати технологічні тріщини та залишкові деформації, що виникають у період отримання самого матеріалу та його оформлення у конструктивні форми при подальшому твердінні. Основною причиною руйнування матеріалів під дією складного та екологічного впливу є незворотне зростання технологічних тріщин до тріщин руйнування або магістральних. У свою чергу, кінетика трансформації технологічних тріщин в експлуатаційні з їх подальшим розвитком значною мірою залежить від характеру розподілу початкових недосконалостей. Останні визначаються початковим складом та технологічними умовами отримання матеріалу та виробів з нього. Таким чином, виявлення механізмів утворення технологічних тріщин з метою регулювання характеру їх розподілу на різних структурних рівнях для підвищення стійкості бетонів в умовах складного навантаження при впливі навколишнього середовища є своєчасним та актуальним завданням. Особливо слід підкреслити значення досліджень впливу складних навантажень на руйнування конструкцій та споруд з огляду на значні катастрофи, спричинені землетрусами, вибухами технологічного та технічного обладнання тощо.

У зв'язку з цим вирішення проблеми підвищення стійкості бетонів від складних навантажень з урахуванням несприятливого впливу навколишнього середовища є виправданим та практично необхідним.

Ключові слова: механічні властивості, бетон, складне навантаження, нелінійне середовище, модель.

I.M. MYRONENKO, V.V. LYTUVYENKO
 Odessa National Maritime University
 V.K. IEGUPOV

S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine

MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE UNDER THEIR COMPLEX LOAD

Complex loads, understood as cumulative phenomena arising from the collision of moving bodies, are very often encountered in engineering practice during construction and operation of both individual structures and entire buildings. In this case, complex loads can be taken into account in the design, for example, the design of foundations of forging hammers and pressure of roll presses, heads of driven piles, etc., and can also be associated with chance, for example, the accidental collision of some body (transport, ice, stones, etc.) with elements of structures or buildings.

Simultaneously with the complex action (planned or accidental), the material of the structure perceives loads associated with changes in temperature and humidity conditions of operation. Repeated freezing and thawing, moisture saturation, operation at elevated temperatures lead to changes in material structure and cause reduction of service life. The combined effect of impulse, anthropogenic and environmental influences can lead to premature destruction of structures. The probability of this is based on the established phenomenon that under conditions of complex action the material fails at lower stresses compared to static loads.

According to many experts, concrete is a roughly heterogeneous material with a polystructural structure. The objective structural parameters of such materials should be considered as technological cracks and residual deformations, which

occur during the period of obtaining the material itself and its formation into structural forms during subsequent curing. The main cause of materials destruction under the action of complex and environmental impact is irreversible growth of technological cracks to fracture cracks or backbone cracks. In turn, the kinetics of transformation of technological cracks into operational cracks with their subsequent development depends to a large extent on the nature of the distribution of initial imperfections. The latter are determined by the initial composition and technological conditions of obtaining the material and products from it. Thus, revealing the mechanisms of formation of technological cracks in order to regulate the nature of their distribution at different structural levels to improve the durability of concrete under conditions of complex loading under the influence of the environment is a timely and relevant task. Especially it is necessary to emphasize the importance of studies of the influence of complex loads on the destruction of structures and facilities, taking into account significant disasters caused by earthquakes, explosions of technological and technical equipment, etc.

In this connection, the solution of the problem of increasing the resistance of concrete against complex loads, taking into account the unfavorable effects of the environment, is justified and practically necessary.

Key words: mechanical properties, concrete, complex load, nonlinear environment, model.

Постановка проблеми

Механічні характеристики властивостей будівельних матеріалів, які впливають на їх напружено-деформований стан, що виникає від дії зовнішніх навантажень є основними параметрами рівнянь стану. Вони зазвичай визначаються експериментальними дослідженнями макроскопічної поведінки матеріалів, тобто феноменологічно. Рівняння стану разом з кінематичними і динамічними співвідношеннями створюють повну систему рівнянь, необхідну для вирішення прикладних задач. В зв'язку з цим побудова найбільш повних нових і обґрунтування сучасних моделей для різних середовищ, що деформуються залежить від накопичення про них експериментальних даних. На підставі експериментальних даних розглядається взаємозв'язок основних механічних параметрів будівельних матеріалів, які виникають в умовах складного навантаження споруд, що експлуатуються.

В подальшому будемо використовувати інваріанти тензора напружень і тензора деформацій. Інваріанти тензора напружень [1, с. 58–60].

$$\sigma_0 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

$$\Psi = \arctg \left[\frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sqrt{3}(\sigma_1 - \sigma_3)} \right]; \quad -\frac{\pi}{6} < \Psi < \frac{\pi}{6};$$

Ψ – кут виду напруженого стану; зв'язаний з параметром Луде співвідношенням

$$\mu_6 = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \sqrt{3} \operatorname{tg} \Psi$$

$\sigma_i (i=1,2,3)$ – головні значення тензору напружень
Інваріанти тензора деформації

$$\gamma_0 = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3$$

$$\overline{\gamma} = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\gamma_1 - \gamma_2)^2 + (\gamma_2 - \gamma_3)^2 + (\gamma_3 - \gamma_1)^2}$$

$$\varphi = \frac{1}{3} \arcsin \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\gamma}{\overline{\gamma}^3} \right) = \operatorname{arcctg} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{2\gamma_2 - \gamma_1 - \gamma_3}{\gamma_1 - \gamma_3} \right]$$

$$-\frac{\pi}{6} < \varphi < \frac{\pi}{6}$$

$\gamma_i (i=1,2,3)$ – головні значення тензора деформації

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Бетон є складним багатофазним і нелінійним середовищем, властивості якого залежать від багатьох внутрішніх і зовнішніх факторів. При побудові моделей необхідно враховувати особливості їх механічних властивостей, до яких відноситься тріщинуватість, неоднорідність, анізотропія, усадка, пластичність і в'язкість. Для визначення властивостей бетону було виконано по різним методикам багато експериментів [2; 3; 4; 5]. Але експерименти, оброблені з використанням теорії кінцевих деформацій авторам невідомі, тому особливості деформування бетонів при складному напруженому стані будуть розглянуті тільки при малих деформаціях.

Мета дослідження

Метою дослідження є вивчення особливостей деформування бетонів при складному напруженому стані.

Виклад основного матеріалу дослідження

Основною особливістю бетонів є нелінійна залежність деформацій від напруженого стану. Але причина виникнення нелінійності пов'язана, в основному, з тріщиноутворенням. Розглянемо це явище більш детально з позицій другої групи граничного стану на підставі робіт [4; 6; 7, с. 160].

Структуру бетону формує великий заповнювач, розчина частина і порожнечі, які виникають після випаровування води. В процесі твердіння бетону між заповнювачем і цементним каменем, чи по цементному каменю виникають технологічні тріщини, які визивають внутрішні напруження [8, с. 64; 9; 10; 11].

При осьовому навантаженні циліндричного зразка, який виготовлено із бетону до деякого рівня напружень зазначеного через $f_{c_k}^o$ у ньому не спостерігається поява нових мікротріщин. При цьому відношення поперечних деформацій до продовжних, яке фіксується коефіцієнтом ν не збільшується, тобто здійснюється зменшення об'єму. З ростом навантаження поступово прискорюється розвиток мікротріщин, поперечні деформації починають рости швидше продовжних, тобто зменшення об'єму затримується, а потім починають зростати. Рівень напружень, якому відповідає мінімальний об'єм зразка зазначено як $f_{c_k}^v$. Величина $f_{c_k}^v$ характеризує границю порушення сплосності бетону за рахунок появи в ньому мікроруйнувань. В інтервалі між границями $f_{c_k}^o$ і $f_{c_k}^v$ в бетоні виникають пластичні деформації.

Остаткові деформації у бетоні, що виникають при напруженнях вище границі $f_{c_k}^v$, супроводжуються спочатку незворотними процесами мікроруйнування, потім переростають у макроскопічні руйнування з порушенням сплосності у бетоні. Тому остаткові деформації, які з'являються при напруженнях вище рівня $f_{c_k}^v$ називають пластичними деформаціями другого роду чи псевдо пластичними деформаціями.

В [6] показано, що границі рівнів напруження $f_{c_k}^o$ і $f_{c_k}^v$ залежать від багатьох факторів: від співвідношення w/c , від складу заповнювачем, від цементно-піщаного співвідношення, від зчеплення цементного каменю із заповнювачем. На рисунку 1 наведені залежності $f_{c_k}^o$ і $f_{c_k}^v$ від складу бетону [6].

Експериментальні дані свідчать, що підвищення складу крупного заповнювача знижує значення рівнів напружень $f_{c_k}^o$ і $f_{c_k}^v$. Також встановлено, що для крупнозернистих тяжких бетонів границі $f_{c_k}^o$ і $f_{c_k}^v$ підвищуються зі збільшенням призменної міцності.

Неоднорідна структура бетону сприяє виникненню тріщин і знижує його здатність опору зовнішнім впливам. При всебічному стиску гідростатичний тиск не тільки затримує появу тріщин, але і сприяє їх закриттю.

У бетоні до границі напруженого стану $f_{c_k}^o$ деформації вважаються еластичними. При подальшому активному навантаженні вони складають лише частину загальних деформацій. Пружні властивості бетону як ізотропного середовища характеризується початковим модулем пружності E_0 і коефіцієнтом Пуасона ν_0 .

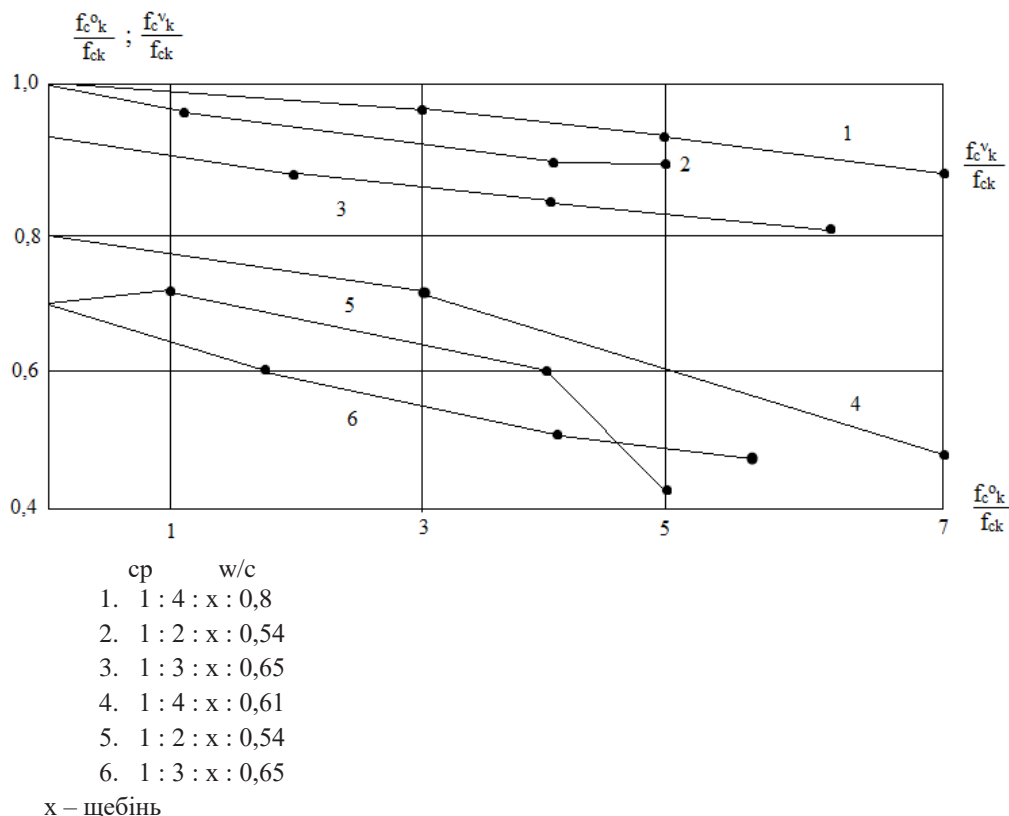


Рис. 1. Значення $f_{c_k}^o$ і $f_{c_k}^v$ при різному складі бетону

Модуль пружності, визначений при розтягу, наближається по значенню до модулю пружності визначеному при стиску. Він значно збільшується на початку виготовлення і не залежить від розмірів зразків. Найбільший вплив на нього мають умови його твердіння і дії підвищених та понижених температур.

При малоциклових повторних впливах, коли напруження не перевищує величини f_{ckj} , яка є метою появи мікротріщин, початковий модуль пружності не змінюється. Величина модуля пружності значним чином залежить від міцності бетону. Вплив цих і інших факторів на значення модуля пружності надані і узагальнені в [6].

Зв'язок між повздовжніми і поперечними деформаціями у суцільних середовищах визначається через коефіцієнт Пуасона. При пружних деформаціях для бетону він приймає початкове значення рівним $\nu_0=0,15\dots0,2$. При розтягу зі збільшенням рівня напружень він зменшується. При стиску він збільшується до 0,5 а іноді перевищує цю величину, що для суцільних середовищ теоретично неможливе. Практично це викликано тим, що при інтенсивному навантаженні зразків бетону виникає процес тріщиноутворення і порушення сплошності. Фактично об'єм зразка збільшується не за рахунок збільшення об'єму його матеріалу, а за рахунок утворених порожот. Тому процес мікроруйнувань в бетоні характеризується зміною ряду параметрів, одним з яких є коефіцієнт поперечної деформації ν . Коефіцієнт ν спочатку зі збільшенням навантаження був постійним, потім з рівня напружень 0,6 f_{ck} він почав зростати. Це пов'язано зі швидким розвитком тріщин і з інтенсивним збільшенням об'єму.

Найбільш вивченим для бетону є процес його руйнування при стиску. Після досягнення межі $f_{c_k}^v$, яка відповідає $\nu=0,5$, відбувається інтенсивне утворення повздовжніх тріщин, середнє значення міцності на розтяг в поперечному напрямку збільшується до f_{ctk} і здійснюється руйнування від подолання спротиву відриву.

В [4] позначено, що у механізмі руйнування бетону можна виділити два типи руйнування: відривний і зсувний. При складному напруженому стані механізми руйнування бетону мають змішаний відривно-зсувний характер. Утворення і розвиток магістральних тріщин руйнування можуть включати і об'єднувати різноманітні локальні тріщини відриву і зсуву.

Макроскопічна картина руйнування бетону від відриву і зсуву знаходить експериментальне підтвердження, але це представлення про механізм руйнування не є остаточно встановленим. Феноменологічні теорії міцності для випадків складного напруженого стану повинні задовольнити основним положенням механіки, задовольняти практичним вимогам і головне, їх результати повинні задовільно погоджуватися з експериментальними даними.

Висновки

Бетон відноситься до квазікрихких матеріалів і займає проміжне положення між пластичними та крихкими представниками. Тому при його складному напруженому стані навряд чи можливе руйнування тільки від нормальних напружень (відрив) і тільки від дотичних (зсув). Очевидно, починаючи з якогось рівня дотичні напруження здійснюють розрихлення бетону зі збільшенням його об'єму, а розповсюдження тріщин здійснюється під дією нормальних напружень.

Підмічені особливості дозволяють вважати, що деформування бетону як однорідного, і спочатку, ізотропного середовища буде найбільш повно враховуватися теорією пластичної течії і зміцненням. Вона дозволяє через функцію навантаження врахувати вплив на напружено-деформований стан бетону при складному навантаженні трьох інваріантів σ_0 , β і Ψ , необхідність яких підтверджується експериментальними даними.

Деформаційні теорії дають задовільні результати тільки при простому навантаженні, чи при окремому випадку складного навантаження, коли не виникає повороту головних осей тензора напружень.

Список використаної літератури

1. Гришин В. А., Дорофєєв В. С. Розрахунок протизсувних споруд. Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2009. 215 с.
2. Гришин В. А., Дорофєєв В. С. Нелінійні моделі конструкцій, що взаємодіють із ґрунтовим середовищем / монографія. Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2006. 242 с.
3. Гришин В. А., Дорофєєв В. С. Деякі нелінійні моделі ґрунтового середовища. Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2007. 309 с.
4. Кривенко П. В., Пушкарьова К. К., Кочевих М. О. Заповнювачі для бетону. К.: ФАДА ЛТД, 2001. 399 с.
5. Фиц С. Wpływ ilości cementu na wytrzymałość bromu na uderzenie. *Вісник*. №8. Одеса: ОДАБА, 2002. С. 202–208.
6. Владіміров В. А. Нелінійні хвильові структури в моделях середовищ, що релаксують. Автореф. дис. доктора фіз-мат. наук (10.04.01). Одеса, 2000. 35 с.
7. Дорофєєв В. С., Мишутин О. В. Підвищення довговічності бетону тонкостінних гідротехнічних споруд за рахунок застосування комплексних модифікаторів. *Вісник ОДАБА*. В. 27. Одеса: Зовнішрекламсервіс. 2007. С. 160-164.
8. Вировий В. М., Дорофєєв В. С., Суханов В. Г. Моделювання конструкцій як складних систем. *Вісник ОДАБА*. В.28. Одеса: Зовнішрекламсервіс: 2007. С. 64–70.
9. Вировий В. М., Дорофєєв В. С., Макарова С. С., Абакумов С. А. Спосіб виявлення тріщин у бетонних та залізобетонних конструкціях на неорганічному в'язучому. Позитивне рішення №5008907/93 (059304) от 03.07.91.
10. Гришин В. А., Дорофєєв В. С. Нелінійна динаміка конструкцій, що взаємодіють з деформованим середовищем. Одеса, Астропрінт, 2000.136 с.
11. Соломатов В. І., Вировий В. М., Дорофєєв В. С. Основи композиційних будівельних матеріалів. Харків: ХІНГХ, 1990. 52 с.

References

1. Hryshyn, V.A., & Dorofieiev, V.S. (2009). *Rozrakhunok protyvsuvnykh sporud [Calculation of anti-slide structures]*. Odesa: Zovnishreklamservis. 215 s. [in Ukrainian]
2. Hryshyn, V.A., & Dorofieiev, V.S. (2006). *Neliniini modeli konstruktсии, shcho vzaiemodiiut iz gruntovym seredovyschem [Nonlinear models of structures interacting with the soil environment]*. Odesa: Zovnishreklamservis. 242 s. [in Ukrainian]
3. Hryshyn, V.A., & Dorofieiev, V.S. (2007). *Deiaki neliniini modeli gruntovoho seredovyscha [Some nonlinear models of the soil environment]*. Odesa: Zovnishreklamservis, 309 s. [in Ukrainian]
4. Kryvenko, P.V., Pushkarova, K.K., & Kochevykh, M.O. (2001). *Zapovniuvachi dlia betonu [Aggregates for concrete]*. K.: FADA LTD. 399 s. [in Ukrainian]
5. Fyts, S. (2002). Wpływ ilości cementu na wytrzymałość bromu na uderzenie [The effect of the amount of cement on the strength of bromu on impact]. *Visnyk*. 8. Odesa: ODABA, S. 202–208 [in Polish]
6. Vladimirov, V.A. (2000). Neliniini khvylovi struktury v modeliakh seredovysch, shcho relaksuiut [Nonlinear wave structures in models of relaxing media]. *Extended abstract of doctor's thesis*. Odesa. 35 s. [in Ukrainian]
7. Dorofieiev, V.S., & Myshutyn, O.V. (2007). Pidvyshchennia dovhovichnosti betonu tonkostinnykh hidrotekhnichnykh sporud za rakhunok zastosuvannia kompleksnykh modyfikatoriv [Increasing the durability of concrete of thin-walled hydraulic structures due to the use of complex modifiers]. *Visnyk ODABA*. 27. Odesa: Zovnishreklamservis. S. 160–164 [in Ukrainian]
8. Vyrovyi, V.M., Dorofieiev, V.S., & Sukhanov, V.H. (2007). Modeliuvannia konstruktсии yak skladnykh system [Modeling of structures as complex systems]. *Visnyk ODABA*. V.28. Odesa: Zovnishreklamservis: S. 64–70 [in Ukrainian]
9. Vyrovyi, V.M., Dorofieiev, V.S., Makarova, S.S., & Abakumov, S.A. (1991). Sposib vyiavlennia trishchyn u betonnykh ta zalizobetonnykh konstruktсииakh na neorhanichnomu viazhuchomu. Pozytyvne rishennia № 5008907/93 (059304) ot 03.07.91 [The method of detecting cracks in concrete and reinforced concrete structures using an inorganic binder. Positive decision No. 5008907/93 (059304) dated 07.03.91] [in Ukrainian]
10. Hryshyn, V.A., & Dorofieiev, V.S. (2000). *Neliniina dynamika konstruktсии, shcho vzaiemodiiut z deformovanyim seredovyschem [Nonlinear dynamics of structures interacting with a deformed environment]*. Odesa, Astroprint. 136 s. [in Ukrainian]
11. Solomatov, V.I., Vyrovyi, V.M., & Dorofieiev, V.S. (1990). *Osnovy kompozytsiinykh budivelnykh materialiv [Basics of composite building materials]*. Kharkiv: KhINHKh. 52 s. [in Ukrainian]

Мироненко Ігор Миколайович – к.т.н., доцент кафедри цивільної інженерії та архітектури Одеського національного морського університету. E-mail: igmir1510@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5322-9859.

Литвиненко Вікторія Вікторівна – старший викладач кафедри морські та річкові порти, водні шляхи та їх технічна експлуатація Одеського національного морського університету. E-mail: litviktory0102@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0715-5190.

Єгупов Вячеслав Костянтинович – к.т.н., науковий співробітник Інституту геофізики імені С. І. Субботіна НАН України. E-mail: slava.yegupov@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5093-6948.

Myronenko Ihor Mykolayovych – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Civil Engineering and Architecture of the Odessa National Maritime University. E-mail: igmir1510@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5322-9859.

Lytvynenko Viktoriya Viktorivna – Assistant Professor at the Department of Sea and River Ports, Waterways and Their Technical Operation of Odessa National Maritime University. E-mail: litviktory0102@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0715-5190.

Iegupov Viacheslav Kostiantynovich – Candidate of Technical Sciences (PhD), Researcher at the S. I. Subbotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine. E-mail: slava.yegupov@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5093-6948.