

УДК 624.014

ВУЗЛОВА ЖОРСТКІСТЬ БОЛТОВИХ З'ЄДНАНЬ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

NODAL RIGIDITY OF BOLT CONNECTIONS OF ELEMENTS OF METAL CONSTRUCTIONS

Романюк В.В., к.т.н., доцент; Супрунюк В.В., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна)

Romaniuk V.V., candidate of engineering sciences, associate professor; Supruniuk V.V., candidate of engineering sciences, associate professor, (National University of Water Management and Nature Resources Application, Rivne, Ukraine)

Для реалізації мети досліджень, якою є теоретичне визначення дійсної жорсткості гребеневого вузла сталеві попередньо напруженої перфорованої арки, використано метод початкових параметрів, що у підсумку дозволило визначити теоретичні напруження у опорному перерізі верхнього поясу конструкції. Застосування запропонованої методики розрахунку дозволяє визначити жорсткість болтового фланцевого з'єднання з урахуванням його дійсної роботи, а також змінювати її за рахунок зміни діаметра болтів або товщини фланців.

It is marked that in the calculation of building constructions an important value has exact determination of regional terms of connection of nodal elements, that substantially influences on the redistribution of efforts in the separate elements of constructions on their length and rigidity of nodes. Especially it touches of flange bolted joints. Current design rules use idealized schemes of nodal joints, which, according to numerical researches, do not fully correspond to the actual operating conditions of nodal joints and constructions on the whole.

For realization of aim of researches, that is theoretical determination of actual rigidity of comb knot of the steel preliminary tense perforated arch, the method of initial parameters is used, that in a result allowed to define theoretical tensions in the supporting cut of fastening overhead belt to the comb knot of arch.

Divergence in the values of actual tensions in the cuts of beam and theoretical, calculated according to the current design rules, is explained by the flexibility of the flanged bolted joints, that according to the actions in the knot of bending moment opens up, although in theoretical calculations this joint is accepted by absolutely rigid. Rigidity depends on the thickness of flanges,

diameter of bolts, the distances between them, the values of the previous tension of the bolts and external loading.

The conclusion is set forth, that the application of the offered methodology of calculation allows to define the rigidity of the bolted flanged joint taking into account its actual work, that according to experimental researches and theoretical calculations, differs from the idealized calculation schemes. In addition the methodology allows to change the rigidity of the bolted joint, changing the diameter of the bolts or the thickness of the flanges, and also to use the additional resource of material due to some reduction of the maximum tensions in weak cuts of elements.

Ключові слова: болт, з'єднання, фланець, несуча здатність, опір, жорсткість, закріплення, арка, гребеневий вузол
bolt, joint, flange, bearing capacity, resistance, rigidity, fastening, arch, comb knot.

Вступ. В розрахунку будівельних конструкцій важливе значення має точне визначення крайових умов з'єднання вузлових елементів, яке суттєво впливає не тільки на перерозподіл зусиль в окремих елементах конструкцій по їх довжині та на жорсткість вузлів і конструкцій в цілому, а і на складність розрахунку конструкцій. Особливо це стосується болтових з'єднань і, зокрема, фланцевих болтових з'єднань, які є одними з найбільш ефективних видів заводських, а особливо монтажних стиків, і які дуже широко застосовуються у світовій практиці проектування і зведення металевих конструкцій.

Аналіз останніх досліджень. На даному етапі для визначення крайових умов з'єднання окремих елементів конструкцій застосовують вітчизняні та європейські норми проектування [1, 2], за якими вузлові з'єднання приймаються шарнірними, жорсткими, у вигляді рухомого защемлення тощо. Всі ці умови закріплення є ідеалізованими, що не у повному обсязі відповідає дійсним умовам роботи вузлових з'єднань і конструкцій в цілому і це підтверджено як експериментальними дослідженнями [3, 4], так і в процесі експлуатації існуючих конструкцій.

Постановка мети і задач досліджень. Метою досліджень є теоретичне визначення дійсної жорсткості гребеневого вузла сталевій попередньо напруженої перфорованої арки. Задачами є: визначення теоретичних деформацій балки у місці кріплення її до абсолютно жорсткої опори методом початкових параметрів; визначення фактичної жорсткості вузлового з'єднання; порівняння обчислених теоретичних напружень з експериментальними.

Методика досліджень. Використано метод початкових параметрів, що у підсумку дозволило визначити теоретичні напруження у опорному перерізі кріплення верхнього поясу до гребеневого вузла арки, а також результати

експериментальних досліджень напружено-деформованого стану елементів арки, виконаної у натуральну величину. Зокрема були проведенні експериментальні дослідження сталеві попередньо напруженої перфорованої арки [3, 4] прольотом $L = 9$ м зі стрілою підйому $f = 2,25$ м (рис. 1, а) та з жорстким фланцевим гребеневим вузлом (рис. 1, б).

Результати досліджень. Аналіз напруженого стану перфорованого стиснуто-згинального поясу арки здійснювався шляхом порівняння теоретичних і експериментальних напружень у 28-ми його перерізах (14 на кожен напіварку) (рис. 1, в). Теоретичні напруження були обчислені за методикою [1], яка використовує теорію згину і передбачає, що напруження визначаються як у звичайній балці, послабленій отвором, а експериментальні – виміряні за допомогою тензорезисторів, які були наклеєні по висоті перерізів. Експериментальні напруження у характерних перерізах 13-13 і 14-14, які знаходились поблизу гребеневого вузла, значно відрізнялись від теоретичних значень на 18-33% залежно від конструктивних особливостей конструкції та схем її навантаження, чого не спостерігалось в інших перерізах, де розбіжність складала лише до 7%.

Таку розбіжність у результатах можна пояснити податливістю фланцевого болтового з'єднання, яке за дії у вузлі згинаючого моменту розкривалося, а в теоретичних розрахунках це з'єднання приймалося абсолютно жорстким.

Якщо жорсткість ідеального фланцевого з'єднання прийняти за одиницю, то із вище наведеного можна зробити висновок, що шляхом експериментальних досліджень встановлено дійсну жорсткість реального гребеневого вузла і вона складала $k=0,82-0,67$ залежно від схеми навантаження конструкції та її конструктивних особливостей.

Одним із найбільш суперечливих питань в теорії розрахунку фланцевих з'єднань є визначення їх жорсткості, яка залежить від товщини фланців, діаметра болтів, відстаней між ними, величин попереднього натягу болтів і зовнішнього навантаження.

Як приклад розглянуто визначення жорсткості фланцевого болтового з'єднання консольної балки з абсолютно жорсткою опорою (рис. 2).

Згинаючий момент, який виникає в защемленні балки і який сприймається двома парами болтів, розміщеними симетрично відносно стінки перерізу балки,

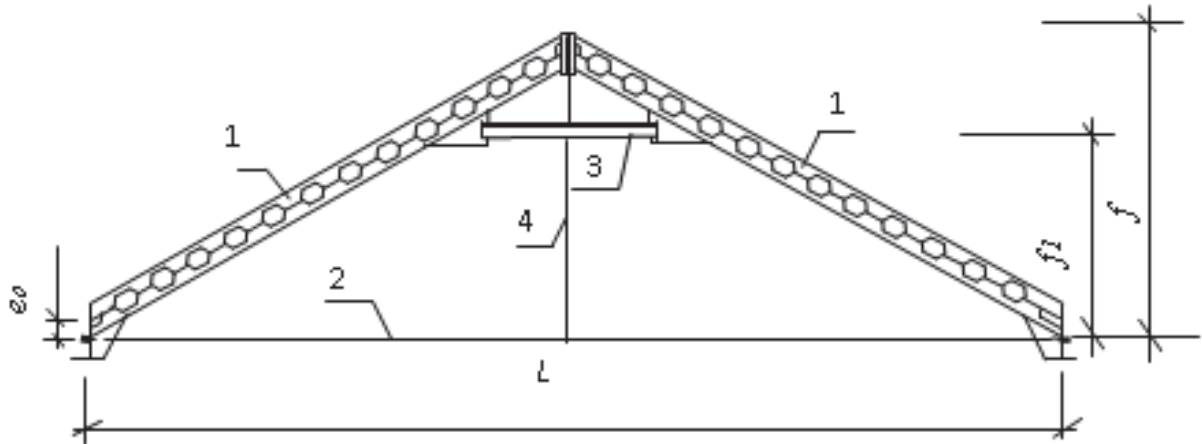
$$M = F L, \quad (1)$$

де F – величина зосередженої сили на кінці консолі; L – проліт балки (довжина консолі).

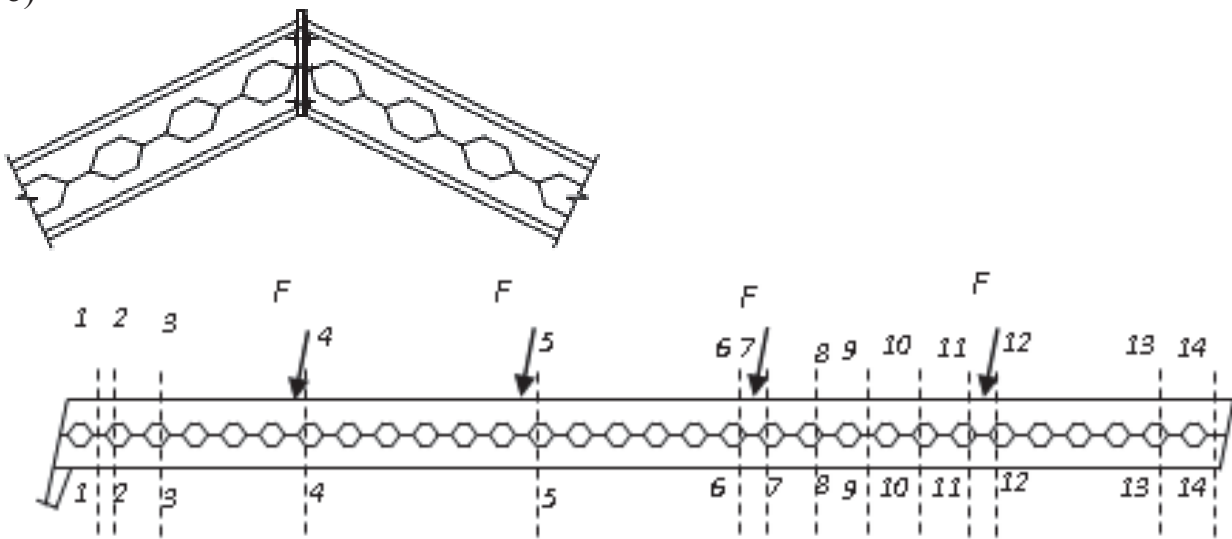
Напруження, що виникають у поперечному перерізі балки біля защемлення за пружної роботи матеріалу

$$\sigma = \frac{M}{W} \leq R_y \gamma_c / \gamma_n, \quad (2)$$

а)



б)



в)

Рис.1. Сталева попередньо напружена перфорована арка
 а – загальний вигляд; б – фланцевий гребеневий вузол;
 в – напіварка з характерними перерізами
 1 – перфоровані пояси; 2 – зтяжка; 3 – розпірка; 4 – підвіска

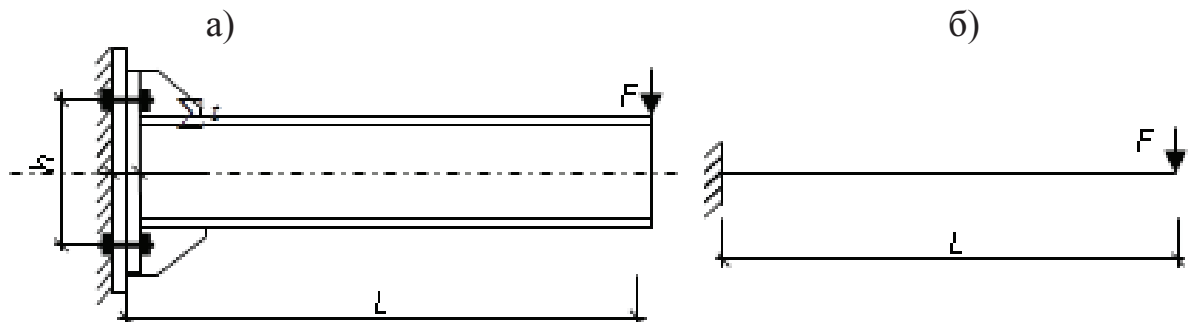


Рис.2. Консольна балка з жорстким фланцевим з'єднанням
 а – загальний вигляд; б – розрахункова схема

де M – величина згинаючого моменту у защемленні, визначеного за консольною схемою; W – момент опору перерізу балки; R_y – розрахунковий

опір сталі згідно з табл. Г.2 [1]; γ_c – коефіцієнт умов роботи згідно з табл. 5.1 [1]; $\gamma_n = 0,9$ – коефіцієнт відповідальності будівлі згідно з табл. 5 [5] залежно від класу відповідальності будівлі, категорії відповідальності конструкції та типу розрахункової ситуації.

За дії згинаючого моменту M жорсткий фланцевий вузол розкривається за рахунок центрального розтягу болтів верхнього ряду, а, отже, і дійсні напруження в перерізах балки відрізняться від значень, обчислених за формулою (2). Тому необхідно визначити різницю в напруженнях і, таким чином, жорсткість фланцевого з'єднання, прийнявши при цьому величину жорсткості абсолютно жорсткого вузла рівною одиниці.

Для цього розглянуто схему деформування консольної балки з жорстким фланцевим з'єднанням (рис. 3).

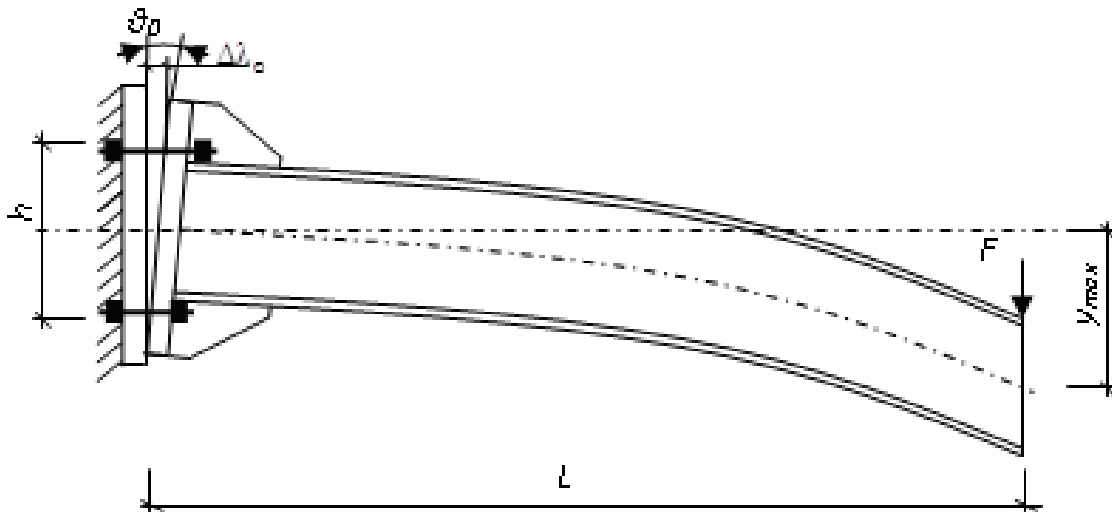


Рис. 3. Схема деформування консольної балки з жорстким фланцевим з'єднанням

Для визначення деформацій балки використано формули загальновідомого методу початкових параметрів

$$\left. \begin{aligned} EI\theta_{xi} &= EI\theta_0 + \sum M_{xi}(x_i - a_1) + \sum F_{xi} \frac{(x_i - a_2)^2}{2} + \sum q_{xi} \frac{(x_i - a_3)^3}{6} \\ EIy_{xi} &= EIy_0 + EI\theta_0 x_i + \sum M_{xi} \frac{(x_i - a_1)^2}{2} + \sum F_{xi} \frac{(x_i - a_2)^3}{6} + \sum q_{xi} \frac{(x_i - a_3)^4}{24} \end{aligned} \right\}, (3)$$

де θ_{xi} , y_{xi} – кут повороту та прогин в перерізі, що розглядається; θ_0 , y_0 – кут повороту та прогин елемента на початку системи (початкові параметри); M_{xi} , F_{xi} , q_{xi} – відповідно зосереджені моменти, зосереджені сили та величина рівномірно розподіленого навантаження, які прикладені до конструкції; x_i – відстань від початку системи до перерізу, в якому обчислюється деформація; a_1 , a_2 , a_3 – відстані від початку системи

до точок прикладання відповідно зосереджених моментів, зосереджених сил та до початку ділянок прикладання розподіленого навантаження; I – момент інерції перерізу; E – модуль пружності сталі.

Суть методу полягає у визначенні деформацій у будь-якому перерізі конструкції послідовно, враховуючи всі силові фактори, які мають вплив на цей переріз та параметри його жорсткості, встановивши при цьому деякі початкові загальновідомі передумови (початкові параметри). Так для розрахункової схеми консольної балки (див. рис. 1, б) очевидним є те, що кут повороту θ_0 і прогин балки y_0 на початку системи координат, тобто в защемленні, дорівнюють нулю. Підставивши дані умови у систему формул (3), можна обчислити деформації балки у будь-якій точці по її довжині.

Враховуючи, що за дії згинаючого моменту у защемленні фланцевий вузол розкривається (див. рис. 3), а, отже початковий кут повороту $\theta_0 \neq 0$, то його величина визначається із умови видовження розтягнутих болтів $\Delta l_{\text{б}}$ за дії зусилля

$$P = F L/h. \quad (4)$$

Використовуючи математичні перетворення, видовження верхнього поясу двотаврової балки становитиме:

– для абсолютно жорсткого вузла

$$\Delta L_1 = \frac{F^2 L^5}{15 E^2 I^2}; \quad (5)$$

– для вузла, що розкривається

$$\Delta L_2 = \frac{F^2 L^5}{15 E^2 I^2} + \frac{F \theta_0 L^3}{3 E I} + \frac{L \theta_0^2}{2}. \quad (6)$$

Подальші розрахунки засвідчили, що з достатнім ступенем точності другим і третім доданками у формулі (6) можна знехтувати і визначати видовження конструкції за виразом (5).

Видовження болта становить

$$\Delta l_{\text{б}} = \frac{P \sum t}{E A}, \quad (7)$$

де $\sum t$ – сума товщин елементів, що з'єднуються (фланців) (див. рис. 2, а);

A – площа поперечного перерізу болта (болтів).

Таким чином, дійсне видовження верхнього поясу балки з урахуванням реальної роботи болтового з'єднання

$$\Delta L = \Delta L_1 - \Delta l_{\text{б}}. \quad (8)$$

Видовження волокон верхньої розтягнутої полиці верхнього поясу арки є прямопропорційним розтягуючим напруженням, які виникають в його

перерізах в межах пружної роботи сталі. Отже, дійсне видовження волокон верхнього поясу відрізняється від теоретичного з урахуванням коефіцієнту

$$k = \frac{\Delta L}{\Delta L_1} = 1 - \frac{\Delta l_{\sigma}}{\Delta L_1}. \quad (9)$$

Дійсні напруження в опорному поперечному перерізі балки необхідно обчислювати з урахуванням дійсної роботи фланцевого вузлового з'єднання

$$\sigma = \frac{k M}{W}. \quad (10)$$

Для прикладу розглянуто розрахунок балки з такими вихідними даними: ІІ2/ГОСТ 8239–89; $L = 3 \text{ м}$; $W = 58,4 \text{ см}^3$; $I_x = 350 \text{ см}^4$; $F = 4 \text{ кН}$; $h = 14 \text{ см}$; діаметр болтів $d = 16 \text{ мм}$; площа поперечного перерізу одного болта $A = 2,01 \text{ см}^2$; сума товщин елементів, що з'єднуються $\sum t = 4 \text{ см}$.

Теоретичні напруження у поперечному перерізі балки поблизу защемлення за формулою (2)

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{F L}{W} = \frac{4 \cdot 3 \cdot 10^3}{58,4} = 205,5 \text{ МПа.}$$

Видовження верхнього поясу двотаврової балки за формулою (5)

$$\Delta L_1 = \frac{F^2 L^5}{15 E^2 I^2} = \frac{4^2 \cdot 3^5 \cdot 10^2}{15 \cdot 2,06^2 \cdot 350^2} = 0,0499 \text{ см.}$$

Зусилля, що сприймається двома розтягнутими болтами за формулою (4)

$$P = \frac{F L}{h} = \frac{4 \cdot 3}{0,14} = 85,71 \text{ кН.}$$

Видовження болта за формулою (7)

$$\Delta l_{\sigma} = \frac{P \sum t}{E A} = \frac{85,71 \cdot 0,04 \cdot 10^{-2}}{2,06 \cdot 2 \cdot 2,01} = 0,00414 \text{ см.}$$

Дійсне видовження верхнього поясу балки з урахуванням реальної роботи болтового з'єднання

$$\Delta L = \Delta L_1 - \Delta l_{\sigma} = 0,0499 - 0,00414 = 0,04576 \text{ см.}$$

За формулами (9) і (10) обчислено жорсткість фланцевого з'єднання з урахуванням дійсної роботи та дійсні напруження в защемленні балки:

$$k = \frac{\Delta L}{\Delta L_1} = 1 - \frac{\Delta l_{\sigma}}{\Delta L_1} = 1 - \frac{0,00414}{0,0499} = 0,917;$$

$$\sigma = \frac{k M}{W} = \frac{0,917 \cdot 12 \cdot 10^3}{58,4} = 188,4 \text{ МПа.}$$

Висновки. Застосування запропонованої методики дозволяє визначити жорсткість болтового фланцевого з'єднання з урахуванням його дійсної роботи, яка, як видно з експериментальних досліджень і теоретичних розрахунків, відрізняється від ідеалізованих розрахункових схем. Окрім того, ця методика дозволяє змінювати жорсткість болтового з'єднання, наприклад, змінюючи діаметр болтів або товщину фланців, а також використовувати додатковий ресурс матеріалу за рахунок деякого зменшення максимальних напружень в послаблених перерізах елементів, зокрема, як у розглянутому прикладі на 8,3%.

1. Сталеві конструкції [Текст] : ДБН В.2.6 – 198:2014. – [офіц. вид.]. – К. : ДП «Укрархбудінформ», 2014. – 199 с. – (Нормативний документ Мінрегіонбуду України. Норми проектування).

2 Eurocode 3: Design of steel structures. EN 1993-1-8:2005.

3. Романюк В.В, Супрунюк В.В. Результати експериментальних досліджень сталевий кроквяної арки з перфорованим верхнім поясом // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Зб. наук. праць. – Рівне, 2008. – Вип. 16. частина 2. – с. 319-324.

4. Романюк В.В. Міцність та деформативність перфорованих елементів сталевий арки [Текст]: монографія / В.В. Романюк, В.В. Супрунюк. – Рівне: НУВГП, 2013. – 106 с.

5. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст] : ДБН В.1.2-14-2009. – [офіц. вид.]. – К. : Мінрегіонбуд України, 2009. – 37 с. – (Нормативний документ Мінрегіонбуду України. Норми проектування).

1. Stalevi konstruktsiyi [Tekst] : DBN V.2.6 – 198:2014. – [ofits. vyd.]. – K. : DP «Ukrarkhbudinform», 2014. – 199 s. – (Normatyvnyy dokument Minrehionbudu Ukrayiny. Normy proektuvannya).

2 Eurocode 3: Design of steel structures. EN 1993-1-8:2005.

3. Romanyuk V.V, Suprunyuk V.V. Rezul'taty eksperymental'nykh doslidzhen' stalevoyi krokvyanoiy arky z perforovanyim verkhnim poyasom // Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy: Zb. nauk. prats'. – Rivne, 2008. – Vyp. 16. chastyna 2. – s. 319-324.

4. Romanyuk V.V. Mitsnist' ta deformatyvnist' perforovanykh elementiv stalevoyi arky [Tekst]: monohrafiya / V.V. Romanyuk, V.V. Suprunyuk. – Rivne: NUVHP, 2013. – 106 s.

5. Zahal'ni pryntsypy zabezpechennya nadiynosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel', sporud, budivel'nykh konstruktsiy ta osnov [Tekst] : DBN V.1.2-14-2009. – [ofits. vyd.]. – K. : Minrehionbud Ukrayiny, 2009. – 37 s. – (Normatyvnyy dokument Minrehionbudu Ukrayiny. Normy proektuvannya).