

**С. О. ГУБСЬКИЙ, М. В. ЦЕБРЕНКО, А. О. ОКУНЬ**

### ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНОГО ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЇ СТЕНДУ МЕХАНІЗМУ ПІДЙОМУ ВАНТАЖУ

У роботі проведено розрахунок напружено-деформованого стану металокопструкції стенду механізму підйому вантажу за граничним станом із застосуванням методу скінченних елементів. Показано, що у всіх розрахункових зонах діють напруження, що не приводять до накопичення ушкоджень і їх металокопструкції мають необмежену довговічність. Наведено результати експериментальних досліджень напружено-деформованого стану металокопструкції клітки за допомогою тензометричного методу неруйнівного контролю. Зроблено порівняльний аналіз аналітичних та експериментальних досліджень.

**Ключові слова:** механізм підйому, напружено деформований стан, металокопструкція, метод кінцевих елементів.

**С. А. ГУБСКИЙ, М. В. ЦЕБРЕНКО, А. А. ОКУНЬ**

### ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИИ СТЕНДА МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА ГРУЗА

В работе проведен расчет напряженного деформированного состояния металлокопструкции стенда механизма подъема груза по предельному состоянию с применением метода конечных элементов. Показано, что во всех расчётных зонах действуют напряжения, которые не приводят к накоплению повреждений и их металлокопструкции имеют неограниченную долговечность. Приведены результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния металлокопструкции клетки с помощью тензометрического метода неразрушающего контроля. Сделан сравнительный анализ аналитических и экспериментальных исследований.

**Ключевые слова:** механизм подъема, напряженно-деформированное состояние, металлокопструкция, метод конечных элементов.

**S. A. GUBSKIY, M. V. TSEBRENKO, A.O. OKUN**

### RESEARCH OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE METAL STRUCTURE OF THE LOAD LIFTING MECHANISM TEST BENCH

The paper deals with the stress-strain state of the metal structure of the load lifting mechanism test bench that is calculated on the basis of the limiting state using the finite element method. It is shown that stresses, that do not lead to accumulation of damages, occur in all design zones and the metal structure has unlimited durability. The results of the experimental attachments of the stressed-deformed mill of the metal cladding are added to the result of the use of the tensometric method of non-verbal control. The crippled pornographic analysis of analitic and experimental dosensis.

**Keywords:** lifting mechanism, stress-strain state, metal structure, finite element method.

**Вступ.** Динамічні навантаження в механізмах підйому вантажу суттєво впливають на напружено-деформований стан (НДС) металокопструкції.

Для дослідження НДС металокопструкції стенду механізму підйому вантажу можливо використовувати аналітичні, числові та інші методи розрахунку. Підтвердити ці розрахунки можливо експериментально, наприклад, магнітно-коерцитивним методом неруйнівного контролю (НК), тензометричним методом НК.

Аналітичний метод розрахунку НДС металокопструкції стенду механізму підйому вантажу використовується для попередніх та проектувальних розрахунків, які необхідні для вибору поперечного перерізу елементів металокопструкції та при аналізі впливу окремих елементів на отриманий результат (можливість знаходження оптимального рішення) [1, 2]. Цей метод базується на принципах будівельної механіки та опору матеріалів.

Розрахунок НДС металокопструкції стенду механізму підйому вантажу числовим методом можна виконати за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) (рис. 1). Це дозволяє проводити розрахунок металокопструкції стенду механізму підйому вантажу з різними видами навантаження. [3].

Для експериментального визначення НДС металокопструкції стенду механізму підйому вантажу можливо використовувати методи неруйнівного контролю (наприклад, тензометричний метод НК,

магнітно-коерцитивний метод НК). Це дозволяє порівнювати отримані результати з числовим методом. Також, експериментальний метод визначення НДС можливо використовувати для визначення реального стану металокопструкції крана з подальшим застосуванням в поєднанні з аналітичними або числовими методами.

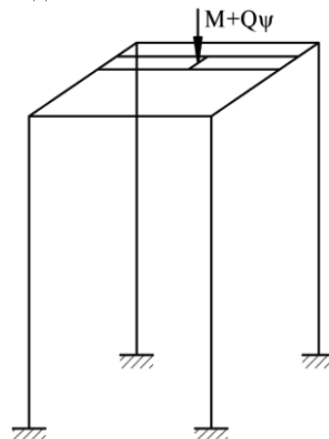


Рис. 1 – Схема для числового розрахунку НДС МСЕ металокопструкції стенду

Як показує практика частину навантажень на металокопструкцію можливо вирахувати за фізичними законами (наприклад, вагові характеристики, інерційні навантаження і т.д.). Ще частину за емпіричними формулам (наприклад, зусилля від взаємодії каната з

канавкою барабана) [4, 5]. Але в цьому випадку неможливо об'єктивно врахувати напруження, незадовільної роботи механізму підйому крана і т.д., що може призвести до значної похибки у визначенні діючих навантажень. Магнітно-коерцитивний НК та МСЕ є інструментом для оцінки дії цих напружень.

Виходячи із розглянутих методів визначення (розрахунку) НДС металокопструкції, ми використаємо числові методи.

**Мета дослідження.** Проведення дослідження НДС металокопструкції стенду механізму підйому вантажу шляхом застосування методу розрахунку граничного стану та кінцевих елементів.

Проводився розрахунок металокопструкції стенду механізму підйому вантажу, який був створений для експериментальних досліджень.

Для визначення впливу механізму підйому вантажу на НДС досліджуваної металокопструкції розрахунок проводився методом граничних станів для характерного технологічного циклу (ХТЦ) роботи механізму: початок підйому вантажу з землі та завершення підйому. Даний ХТЦ розділено на такі розрахункові випадки:

I розрахунковий випадок – від власної ваги металокопструкції;

II розрахунковий випадок – «відрив» вантажу від підлоги;

III розрахунковий випадок – завершення підйому.

Модель стенду механізму підйому вантажу створена в масштабі 1:1. Для моделювання використовувалися елементи оболонкового типу.

Модель спрощена в порівнянні з реальним об'єктом: відсутні механізм підйому, кронштейни для кріплення та інші допоміжні елементи металокопструкції.

Також при розрахунку стенду механізму підйому вантажу було використано наступні характеристики металу, що рекомендуються [1]:

- модуль Юнга  $E = 2,06 \cdot 10^5$  МПа;
- коефіцієнт Пуассона  $\mu = 0,3$ ;
- коефіцієнт лінійного розширення  $\alpha = 0,12 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;
- густина металу  $\rho = 7,85 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

При розрахунках металокопструкції кранів за I граничним станом не фіксуються концентрації напружень, а використовуються для подальших розрахунків (чи аналізу НДС металокопструкції) нормальні напруження [1–3].

#### Дослідження НДС металокопструкції стенду механізму підйому вантажу

В моделі стенду механізму підйому вантажу збережені основні конструктивні особливості: форма та розміри балок металокопструкції (Рис. 2).

Складові (навантаження, швидкості, прискорення, коефіцієнти і т.д.), що діють та враховуються в розрахункових випадках ХТЦ на металокопструкцію

стенду механізму підйому вантажу:

- власна вага копструкції  $G_K = 26500$  Н;
- вага вантажу  $G_Q = 6600$  Н;
- прискорення вільного падіння  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;
- при «відриві» вантажу від основи виникає додаткове динамічне навантаження, яке враховується динамічним коефіцієнтом  $\psi_I = 1,1$  [1];
- при завершенні підйому виникає зворотне коливання вантажу на канатах, яке враховується динамічним коефіцієнтом  $\psi' = 1/\psi_I = 1/1,1 = 0,9$  [1];

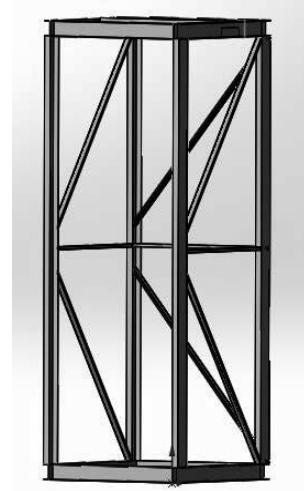


Рис. 2 – Загальний вигляд моделі стенду механізму підйому вантажу

Було проведено розрахунки НДС металокопструкції стенду механізму підйому вантажу МСЕ при різних розрахункових випадках (рис. 1). В результаті були встановлені наступні елементи металокопструкції (розрахункові зони (далі РЗ)) з підвищеним рівнем напружень та досить великим розмахом напружень ( $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$ ) – рис. 3а.

Напруження в найбільш навантажених елементах металокопструкції крана (розрахункових зонах, рис. 3а, б) при різних розрахункових випадках наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Напруження в найбільш навантажених елементах металокопструкції стенду механізму підйому вантажу (розрахункових зонах) при різних розрахункових випадках

Розрахунковий випадок навантаження	Напруження в розрахункових зонах, МПа				
	1	2	3	4	5
I	3,5	1,7	1,4	0,8	0,3
II	47	24	16	9	5
III	39	20	14	7	3

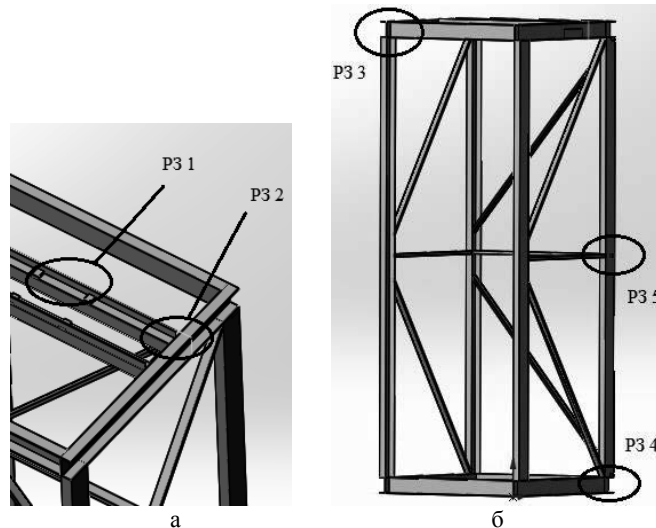


Рис. 3 – Елементи металокопструкції (розрахункові зони):  
а - з підвищеним рівнем напружень та б – досить великим розмахом напружень

Межа витривалості, МПа:

$$\sigma_{-1K} = k_t \cdot \sigma_{-1KB} \quad (1)$$

де  $\sigma_{-1KB}$  – базова межа витривалості – для сталі Ст3сп, МПа (ГОСТ 19281-89) табл. 5.3.1 [1];

$k_t$  – коефіцієнт впливу товщини розрахункового елемента металокопструкції

$$k_t = (t_0/t)^{0,2}, \quad (2)$$

де  $t$  – товщина того елемента вузла, за яким ведеться розрахунок, мм;  
 $t_0=20$  мм.

Межа витривалості (на базі  $N_0 = 2 \cdot 10^6$  циклів) для найбільш навантажених елементів металокопструкції крана (розрахункових зон, рис. 3 а, б) наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Межа витривалості  
(на базі  $N_0 = 2 \cdot 10^6$  циклів, МПа) для найбільш навантажених елементів металокопструкції крана (розрахункових зонах)

	Межа витривалості в розрахунковій зоні, МПа				
	1	2	3	4	5
Базова межа витривалості $\sigma_{-1KB}$ , МПа (табл. 5.3.1 [1])	63	63	63	63	63
Товщина елемента розрахункової зони, мм	5	5	5	5	5
Межа витривалості $\sigma_{-K}$ , МПа	83	83	83	83	83

Схематизація зміни напружень при різних розрахункових випадках навантаження металокопструкції стенду механізму підйому вантажу методом «потоків дощу» [7] зображена на рис. 4.

Приведення асиметричних циклів напруження до еквівалентних симетричних здійснювали відповідно до вимог [7]:

$$\sigma_{\text{пр.}J} = \begin{cases} \sigma_{aj} + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_m, & \sigma_m > 0 \\ \sigma_{aj} > 0 & \end{cases} \quad (3)$$

де  $\sigma_{\text{пр.}J}$  – амплітуда приведеного симетричного циклу напружень, МПа;

$\sigma_{aj}$  – амплітуда асиметричного циклу напружень, МПа;

$\sigma_m$  – середнє значення напружень циклу, МПа;

$\psi_{\sigma}$  – коефіцієнт чутливості сталі до асиметрії циклу. Відповідно для прокатного листа

$$\psi_{\sigma} = 0,02 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot \sigma_B = 0,02 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot 372 = 0,0944 \quad (4)$$

де  $\sigma_B=372$  МПа – тимчасова межа опору сталі Ст3сп.

Результати схематизації за методом «потоків дощу» [5] стенду механізму підйому вантажу представлені в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати схематизації по методу «потоків дощу» [7] для найбільш небезпечної розрахункової зони 1

№ шляху «потоків»	1-2	2-3
$\sigma_{\text{min}}$ , МПа	3,5	39
$\sigma_{\text{max}}$ , МПа	47	47
$\sigma_a$ , МПа	43,5	8
$\sigma_m$ , МПа	25,3	43
$\sigma_{\text{пр.}J}$ , МПа	45,9	12

Як видно з табл. 3 отримані амплітуди приведених симетричних циклів напружень для всіх розрахункових зон задовольняють умові

$$\sigma_{\text{пр.}J} < \sigma_{-1K}$$

тобто, у всіх розрахункових зонах діють напруження, що не приводять до накопичення ушкоджень і металокопструкція стенду механізму підйому вантажу при експлуатаційному навантаженні має необмежену довговічність [1].

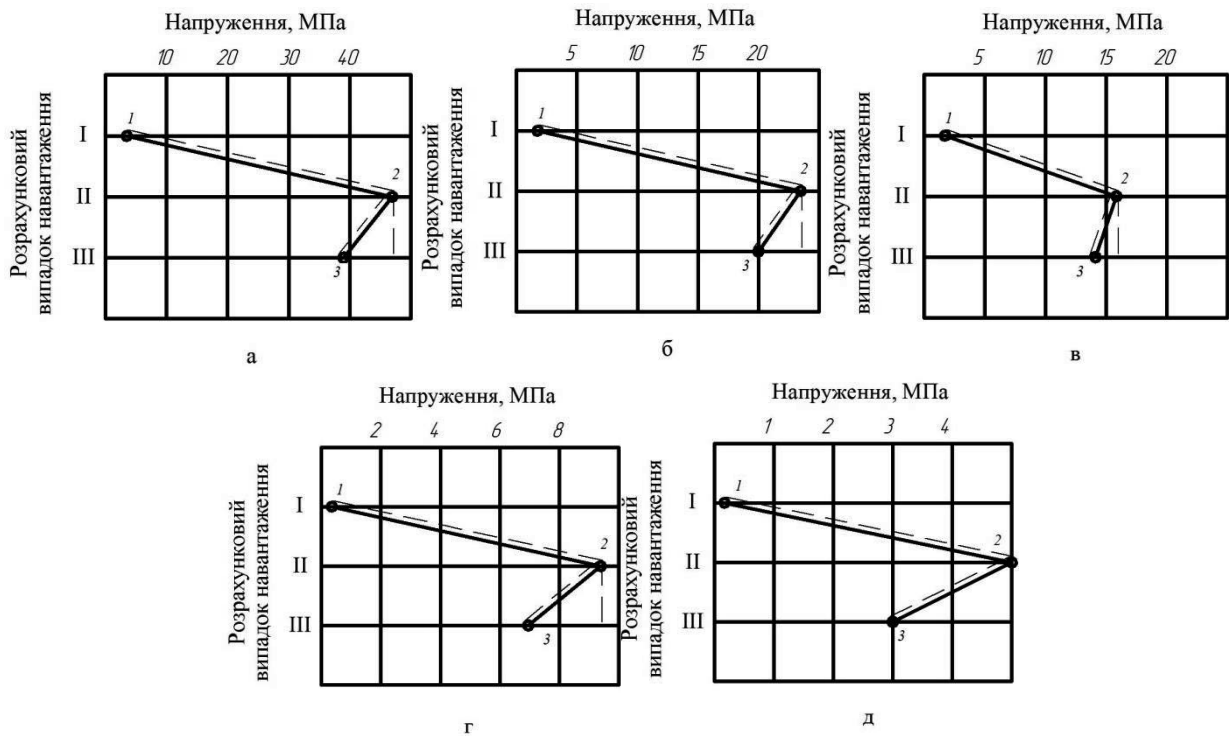


Рис. 4 – Схематизація зміни напружень при різних розрахункових випадках навантаження МК методом «погоків дощу» [7]:  
а – Р31, б – Р32, в – Р33, г – Р34, д – Р35.

**Стендові дослідження**

Проаналізувавши теоретичні та аналітичні розрахунки було прийняте рішення встановити тензо-датчики (рис. 5) для виміру напружень, що виникають у найбільш несприятливій зоні (РЗ 1).

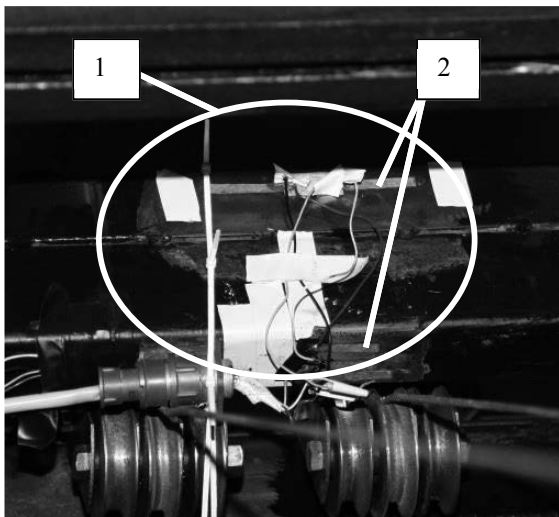


Рис. 5 – Розташування тензо-датчиків на експериментальному стенді:  
1 – розрахункова зона 1; 2 – тензо-датчики

В результаті було проведено навантаження стенду при лінійному законі керування гідроприводу та отриманий графік зміни навантаження в

металоконструкції стенду (рис. 6).

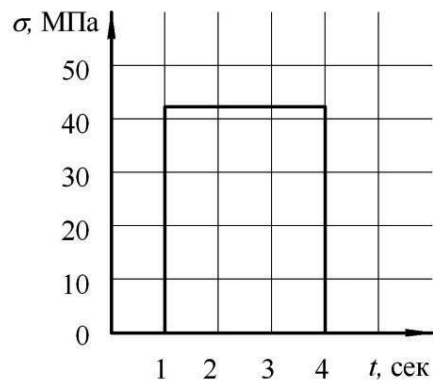


Рис. 6 – Зусилля отримані з тензо-датчиків

Як видно з рис.6 отримані напруження майже співпадають з розрахунковими.

**Висновки**

При числовому розрахунку металоконструкцій стенду механізму підйому вантажу та під час експлуатаційного навантаження за допомогою МСЕ встановлено: у всіх розрахункових зонах діють напруження, що не приводять до накопичення ушкоджень і їх металоконструкції мають необмежену довговічність.

## Список літератури

1. Соколов С. А. *Металлические конструкции подъемно-транспортных машин*. СПб.: Политехника, 2005. 423 с.
2. Губський С. О. Сучасні методи розрахунку кранових металоконструкцій на витривалість. *Подъемные сооружения. Специальная техника*. Одесса, 2016. №8. С. 4–6.
3. Губський С. О. Дослідження напружено-деформованого стану металоконструкцій мостових кранів з різними конструкціями механізму пересування. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Технології в машинобудуванні*. Харків: НТУ «ХПІ», 2014. №42 (1085). С. 65-74.
4. Брауде В. И., Гохберг М. М., Звягин И. Е. *Справочник по кранам: В 2 т. Т.1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций*. Москва: Машиностроение, 1988. 536 с.
5. Алямовский А. А. *Solid Works/COSMOSWorks 2006–2007. Инженерный анализ методом конечных элементов*. Москва: ДМК, 2007. 784 с.
6. Трошенко В. Г. *Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом разрушении*. Киев: Наукова думка, 1981. 344 с.
7. *ГОСТ 25.101–83. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статического представления результатов*. Москва: Изд-во стандартов, 1983. 21 с.
3. Gubskiy S. O. *Doslidzhennya napruzhenno-deformovanogo stanu metalokonstruktsiy mostovih kraniv z riznimi konstruktsiyami mehanizmu peresuvannya* [Research of the stress-strain state of overhead crane metal structures with various structures of the movement mechanism]. *Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI». Tehnologiyi v mashinobuduvanni*. Harkiv, NTU «HPI», 2014. no. 42 (1085). pp. 65-74.
4. Braude V. I., Gohberg M. M., Zvyagin I. E. *Mashinostroenie Spravochnik po kranam: V 2 t. T.1. Charakteristiki materialov i nagruzok. Osnovy rascheta kranov, ih privodov i metallicheskih konstruktsiy* [Cranes Handbook: Characteristics of materials and loads. Basics of calculation of cranes, their drives and metal structures]. Moskow, 1988. 536 p.
5. Alyamovskiy A. A. *Solid Works/COSMOSWorks 2006–2007. Inzhenerniy analiz metodom konechnyih elementov* [Solid Works / COSMOSWorks 2006-2007. Engineering analysis by the finite element method]. Moskow, DMK, 2007. 784 p.
6. Troschenko V. G. *Deformirovanie i razrushenie metallov pri mnogotsiklovom razrushenii* [Deformation and destruction of metals under multi-cyclic destruction]. Kiev: Naukova dumka, 1981. 344 p.
7. *GOST 25.101–83. Metodyi shematizatsii sluchaynyih protsessov nagruzheniya elementov mashin i konstruktsiy i staticheskogo predstavleniya rezultatov* [State Standart 25.101–83. Schematization methods of loading random processes of machines and constructions elements and static presentation of results]. Moskow, Standartinform Publ., 1983. 21 p.

## References (transliterated)

1. Sokolov S. A. *Metallicheskie konstruktсии pod'emno-transportnyih mashin* [Metal structures of lifting and transport machines]. Politehnika, 2005. 423 p.
2. Gubskiy S. O. *Suchasni metodi rozrahunku kranovih metalokonstruktsiy na vitrivalist* [Modern calculation methods of

Надійшла (received) 10.05.2018

## Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Губський Сергій Олександрович (Губский Сергей Александрович, Gubskiy Sergey Aleksandrovich)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Підйомно-транспортні машини і обладнання»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7797-9139>; тел.: (066) 219-20-50; e-mail: [Gubskiyso@gmail.com](mailto:Gubskiyso@gmail.com).

**Цебренько Максим В'ячеславович (Цебренько Максим Вячеславович, Tsebrenko Maksym Viacheslavovych)** – старший викладач, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри «Підйомно-транспортні машини і обладнання»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3541-4698> тел.: (098) 850-15-03; e-mail: [tsebrenko90@gmail.com](mailto:tsebrenko90@gmail.com).

**Окунь Антон Олександрович (Окунь Антон Александрович, Okun Anton Oleksandrovych)** – асистент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра «Підйомно-транспортні машини і обладнання»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6467-4229> тел.: (067) 578-63-17; e-mail: [okun@kpi.kharkov.ua](mailto:okun@kpi.kharkov.ua).