

УДК 624.132

## Вибір розрахункового еквівалента опорних пристроїв П-подібних рам землерийно-транспортних машин

Євгеній Горбатюк<sup>1</sup>, Світлана Комоцька<sup>2</sup>,  
Дмитро Міщук<sup>3</sup>, Володимир Волянчук<sup>4</sup>

Київський національний університет будівництва і архітектури,  
Повітрофлотський просп. 31, Київ, Україна, 03037

<sup>1</sup>ek\_gor@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8148-5323>

<sup>2</sup>komotska.siu@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-8418-5302>

<sup>3</sup>mischuk.do@knuba.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8263-9400>

<sup>4</sup>volian535@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-6852-9037>

Received: 18.03.2021; Accepted: 28.05.2021

<https://doi.org/10.32347/gbdmm2021.97.0101>

**Анотація.** В статті дано опис вибору розрахункового еквіваленту опорних пристроїв П-подібних рам землерийно-транспортних машин. При розрахунках П-подібних рам землерийно-транспортних машин на дію сил, що розташовані у площині рами, опорні пристрої необхідно представляти та розраховувати або як шарнірно-нерухомі опори або як статично визначену систему.

Різниця у виборі розрахункового еквівалента опорних пристроїв призводить до істотної різниці у розрахунковій навантаженості всієї рами. Розглядаючи одну й ту саму раму з однаковим навантаженням, але з різними опорними пристроями, неважко переконатися, що значення найбільшого згинаючого моменту в поперечній частині рами може різнитися на 30-35%. Значна різниця у навантаженості існує й в повздовжніх частинах рами. У зв'язку з цим є необхідність сформулювати критерії за якими може бути зроблено висновок про те, якому розрахунковому еквіваленту відповідає опорний пристрій рами, яка проектується.

Правильний вибір розрахункового еквівалента опорних пристроїв рами землерийно-транспортної машини істотно впливає на отримані при розрахунках результати та допомагає значно їх спростити.

В даній роботі розглядається П-подібна рама землерийно-транспортної машини з шарнірною опорою. В залежності від величини зазору в шарнірному кріпленні опори, розглянуто розрахункові схеми для випадку жорсткого затискання шарніра в опорі та вільного зі значним зазором. Для заданого зовнішнього навантаження, в роботі запропонована методика визначено зусилля в опорних шарнірах і з ураху-

ванням характеру кріплення та досліджено зміну навантаження в найбільш напруженій частині рами.

Результати представленого дослідження будуть цікавими для виробничих заводів, які займаються виготовленням елементів металоконструкцій машин бульдозерного типу, а також ремонтних підприємств будівельної техніки для якісного аналізу існуючих конструкцій подібних машин для їх відновлення.

**Ключові слова:** землерийно-транспортна машина, рама, розрахунковий еквівалент, опорний пристрій, штовхаючий брус, зазор.

### ВСТУП

Машини для земляних робіт застосовують в промисловому та цивільному будівництві при плануванні майданчиків, розробці котлованів, траншей, в авто- і залізничному будівництві – при влаштуванні виюмок, насипів земляного полотна і т.п.

Машини для земляних робіт – головний засіб механізації земляних робіт в будівництві, видобутку корисних копалин, меліорації, військово-інженерній справі, бурінні свердловин, освоєнні надр Світового океану і космічних об'єктів [1].

Машини землерийно-транспортні – самхідні машини на пневматичному або гусеничному ході, призначені для профілювання земляних насипів, переміщення і розрівнювання ґрунтів, відділення гірської маси від масиву та її транспортування.

## МЕТА РОБОТИ

Проаналізувати та дослідити варіанти вибору розрахункового еквіваленту опорних пристроїв П-подібних рам землерийно-транспортних машин.

## АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ

Роль землерийних машин визначається не тільки зменшенням частки ручної праці, а і різким зростанням продуктивності при виконанні земляних робіт [1, 2].

Будь-яка вантажопідіймна, будівельна, дорожня або меліоративна машина містить у собі три основні елементи: механічну частину (механізми), привод і несучу металеву конструкцію (раму). Рама служить для кріплення на ній всіх вузлів, механізмів і агрегатів машини [3, 4].

При розрахунках П-подібних рам землерийно-транспортних машин на дію сил, які розташовані у площині рами, опорні пристрої, як правило, представляються у вигляді шарнірно-нерухомих опор [5 - 7].

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

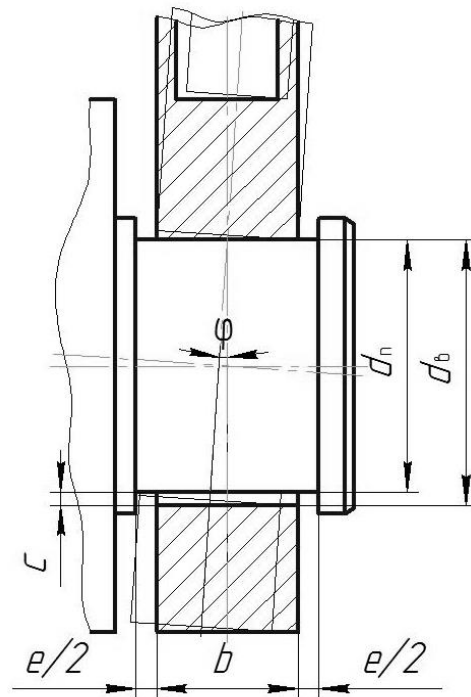
При проведенні земляних робіт використовуються спеціальні землерийно-транспортні і землерийні машини, до яких відносяться бульдозери, скрепери, грейдери, екскаватори та інші машини.

Землерийно-транспортні машини поділяють на ножові (бульдозери й автогрейдери), ківшеві (скрепери) і з додатковим транспортувальним органом (грейдер-елеватори і струги). Застосовують їх переважно в дорожньому, гідротехнічному й аеродромному будівництві для планувально-профільовальних робіт у рівнинній місцевості на ґрунтах без великих кам'янистих вкраплень.

Основним елементом металевих конструкцій багатьох землерийно-транспортних машин (бульдозерів, розпушувачів, скреперів) є рама П-подібної форми, яка закріплена на машині за допомогою циліндричних шарнірів. При розрахунку таких рам на дію сил, які розташовані у площині рами, опорні пристрої, як правило, представляються у

вигляді шарнірно-нерухомих опор [1]. Це допущення обґрунтовується наявністю в шарнірному з'єднанні радіального зазору  $c$  (Рис. 1), який допускає кутове переміщення повздовжньої частини рами (стіжки). Разом з цим наявність бічного зазору  $e$ , що допускає бічні переміщення повздовжньої балки, до уваги не береться [6, 8].

Різниця у виборі розрахункового еквівалента опорних пристроїв призводить до істотної різниці у розрахунковій завантаженості всієї рами (Рис. 2–3). Розглядаючи одну й ту саме раму з однаковим навантаженням, але з різними опорними пристроями, неважко переконатися, що значення найбільшого згинаючого моменту в поперечній частині рами (рігелі) може різнитися на 30-35%.



**Рис 1.** Схема кріплення повздовжньої частини (стіжки) рами до машини.

**Fig. 1.** Scheme of fastening the longitudinal part (wall) of the frame to the machine.

Значна різниця у завантаженості існує й в повздовжніх частинах рами. У зв'язку з цим є необхідність сформулювати критерії за якими може бути зроблено висновок про

те, якому розрахунковому еквіваленту відповідає опорний пристрій рами, що проектується [9, 10].

Припустимо спочатку, що рама має шарнірно-нерухомі закріплення обох повздовжніх частин (Рис. 2).

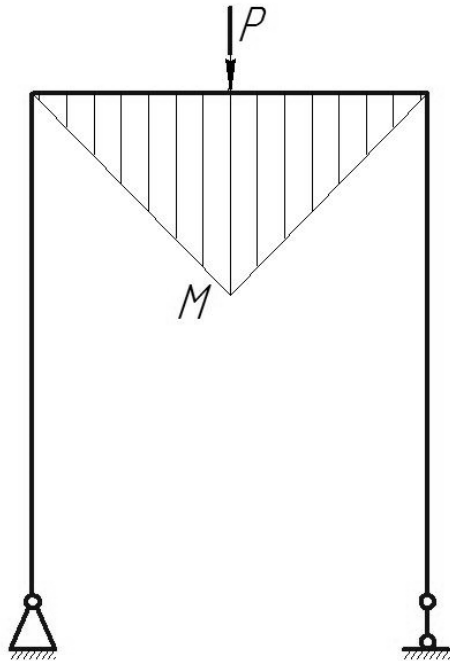


Рис 2. Рама П-подібної форми з шарнірно-нерухомим закріпленням

Fig. 2. U-shaped frame with hinged-fixed fastening

Для такої рами зусилля розпору дорівнюватиме:

$$X_1 = a(1-a) \frac{l^2}{2\frac{l}{h} + \frac{4}{3}\delta P}, \quad (1)$$

а кут повороту в опорному перерізі буде:

$$\varphi = \frac{a(1-a)}{6EI_2} \left[ \frac{\left(\frac{\delta}{3} - \frac{l}{h}\right)}{\left(2\frac{l}{h} + \frac{4}{3}\delta\right)} + a \right] Pl^2, \quad (2)$$

де  $l, h$  – розміри рами;  $a = \frac{al}{l}$  – параметр, що визначає положення точки прикладання сили  $P$ ;

$\delta = \frac{I_2}{I_1}$  – відношення моментів інерції перерізів поперечної та повздовжньої частин рами;  $E$  – модуль пружності матеріалу.

Якщо сила  $P$  прикладена посередині поперечної частини рами, тобто при  $a = 0,5$ , вирази спрощуються:

$$X_1 = \frac{P}{4} \cdot \frac{l^2}{2\frac{l}{h} + \frac{4}{3}\delta}; \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{Pl^2}{24EI_2} \left[ \frac{\left(\frac{\delta}{3} - \frac{l}{h}\right)}{\left(2\frac{l}{h} + \frac{4}{3}\delta\right)} + 0,5 \right]. \quad (4)$$

У реальній конструкції шарнірного з'єднання кут повороту обмежується величиною радіального зазору:

$$c = d_b - d_n, \quad (5)$$

де  $d_b$  і  $d_n$  – діаметри втулки і пальця.

При цьому граничний кут повороту (вважаючи його достатньо малим), буде:

$$\varphi_{гр} = \frac{c}{b}, \quad (6)$$

де  $b$  – ширина вушка.

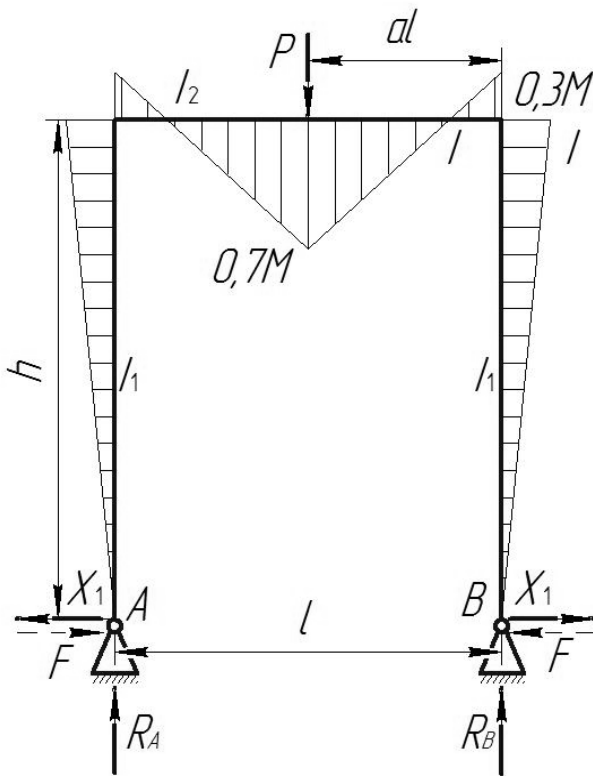
Прирівнюючи вирази (6) та (2), можна отримати значення граничного зусилля, при дії якого можливості кутового переміщення рами будуть вичерпані і в опорному пристрої виникне момент. В загальному випадку граничне зусилля:

$$P_{гр} = \frac{6EI_2c\left(2\frac{l}{h} + \frac{4}{3}\delta\right)}{abl^2(1-a)\left[\frac{l}{h}(2a-1) + \delta\left(\frac{1}{3} + \frac{4}{3}a\right)\right]} \cdot (7)$$

При  $a = 0,5$ :

$$P_{гр} = \frac{24EI_2c\left(2\frac{l}{h} + \frac{4}{3}\delta\right)}{bl^2\delta} \cdot (8)$$

Наявність в опорному пристрої осевого зазору дозволяє спростити схему та розглядати раму як статично визначену систему (Рис. 3). Проте боковому переміщенню протидіє сила тертя  $F$ , яка виникає від дії вертикальної реакції в опорі. Бокове переміщення буде неможливим, якщо



**Рис 3.** Рама П-подібної форми з шарнірно-нерухомим закріпленням, як статично визначена система

**Fig. 3.** U-shaped frame with hinged-fixed fastening as a statically defined system

$$F = R_B f \geq X_1, \quad (9)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя;  $R_B$  – вертикальна реакція в опорі.

Використовуючи вираз (1) та визначаючи  $R_B = P(1-a)$ , можна отримати значення граничного коефіцієнта тертя, при якому відсутнє бокове переміщення. В загальному випадку граничний коефіцієнт тертя:

$$f_{гр} = a \cdot \frac{\frac{l^2}{h^2}}{2\frac{l}{h} + \frac{4}{3}\delta} \cdot (10)$$

При  $a = 0,5$ :

$$f_{гр} = 0,5 \cdot \frac{\frac{l^2}{h^2}}{2\frac{l}{h} + \frac{4}{3}\delta} \cdot (11)$$

Таким чином, для розрахунку рами слід визначити  $P_{гр}$  і  $f_{гр}$  та в залежності від результатів співставлення їх значень із значеннями реально діючої на раму сили  $P$  і дійсним коефіцієнтом тертя  $f$  обрати розрахункову схему.

При  $P < P_{гр}$  і  $f > f_{гр}$  обираємо розрахункову схему за рис. 3.

Якщо  $P < P_{гр}$  і  $f < f_{гр}$  – обираємо розрахункову схему за рис. 2.

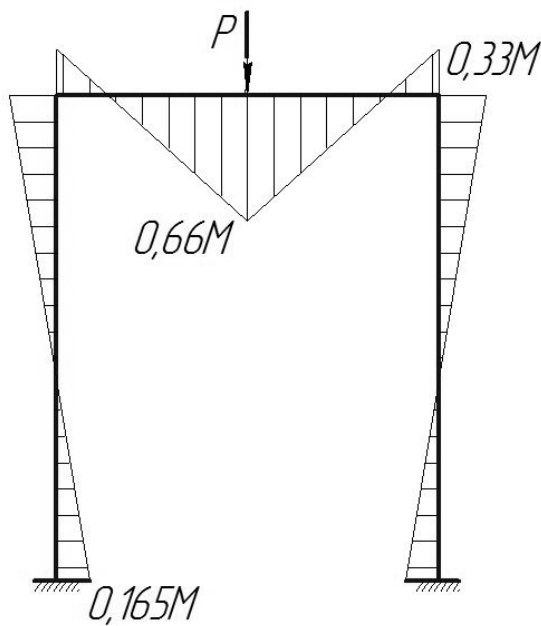
У випадку  $P > P_{гр}$  і  $f > f_{гр}$  ведемо розрахунок у два етапи: спочатку розраховуємо на силу  $P_1 = P_{гр}$  раму за схемою рис. 3, потім на силу  $P_2 = P - P_{гр}$  раму за схемою рис. 2, в та сумуємо отримані внутрішні силові фактори. Якщо  $P > P_{гр}$  і  $f < f_{гр}$ , то спочатку розраховуємо на силу  $P_1 = P_{гр}$  раму за схемою Рис. 2, потім на

силу  $P_2 = P - P_{гр}$  раму за схемою Рис. 4 і потім теж сумуємо внутрішні силові фактори.

Визначимо, як приклад, напруження в небезпечному перерізі штовхаючого бруса робочого обладнання бульдозера (див. Рис. 3, переріз I-I) при наступних вихідних даних:

$$I = h = 290 \text{ см}; \quad a = 0,5; \quad \delta = \frac{I_2}{I_1} = 5;$$

$d_n = 10 \text{ см}; \quad c = 0,013 \text{ см}; \quad e = 0,2 \dots 0,25 \text{ см};$   
 $b = 10 \text{ см}; \quad P = 120 \text{ кН};$  площа перерізу бруса  $S = 68,8 \text{ см}^2$ , момент опору  $W = 200 \text{ см}^3$ . Відповідно до запропонованих залежностей отримано  $f_{гр} = 0,058$  і  $P_{гр} = 100 \text{ кН}$ .



**Рис 4.** Рама П-подібної форми жорстко закріплена

**Fig. 4.** U-shaped frame is rigidly fixed

Враховуючи, що коефіцієнт тертя сталі по сталі в умовах обмеженого змащування можна прийняти рівним  $f = 0,12 \dots 0,15$ , отримаємо, що в нашому випадку  $P > P_{гр}$  і  $f > f_{гр}$ . Виконуючи розрахунок у відповідності з приведеними вище рекомендаці-

ями, отримаємо, що напруження в небезпечному перерізі бруса  $\sigma = 60115 \text{ кН/м}^2$ .

## ВИСНОВКИ

В результаті проведеного дослідження виведені залежності, які дозволяють при правильному виборі розрахункового еквівалента опорних пристроїв рами землерийно-транспортної машини спростити розрахункові результати та суттєво зменшити час розрахунків [3, 5].

В ході дослідження сформульовані критерії за якими можна зробити висновок про те, якому розрахунковому еквіваленту відповідає опорний пристрій рами, яка проектується.

## ЛІТЕРАТУРА

1. **Хмара Л. А.** Машини для земляних робіт: навч. посіб. / Л. А. Хмара, С. В. Кравець, В. В. Нічке, Л. В. Назаров, М. П. Скоблюк, В. Г. Нікітін; під заг. ред. проф. Л. А. Хмари та проф. С. В. Кравця. – Рівне – Дніпропетровськ – Харків. – 2010. – 557 с.
2. **Лівінський О. М.** Будівельна техніка: підручник / О. М. Лівінський, А. Д. Єсипенко, О. І. Курок і ін.; під заг. ред. О. М. Лівінського. – К.: КНУБА, Українська академія наук, "МП Леся", 2013. – 614 с.
3. **Pelevin L.** Developing a mathematical substantiation for the physical modelling of the soil-ripping equipment work process / L. Pelevin, Ie. Gorbatyuk, S. Zaichenko, V. Shalenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – vol. 6, no. 2 (90): Information technology. Industry control systems. – pp. 52–60. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118429>
4. **Сукач М. К.** Синтез землерийної і дорожньої техніки: підручник / Уклад.: М.К. Сукач, Є.В. Горбатюк, О.А. Марченко. - К.: Видавництво Ліра-К, 2013. – 376 с.
5. **Горбатюк Є. В.** Проектування металоконструкцій будівельних машин: підручник / Горбатюк Є. В., Волянук В. О., Терентьев О. О., Свідерський А. Т. Київ: ЦП Компрінт, – 2021. – 283 с.
6. **Gorbatyuk Ie.** Theoretical bases of construction of unclear model of evaluation of administrative decisions are at a management devel-

opment of the systems of engineering complexes. Modern Movement of Science: abstracts of the 10th International Scientific and Practical Internet Conference, April 2-3, – 2020. – Dnipro, 2020. – P.1. 300-303.

7. **Пелевін Л. Є.** Проведення ефективного прогнозування роботи машин для земляних робіт / Пелевін Леонід, Фомін Анатолій, Горбатюк Євгеній, Шаленко Вадим. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2019. – №93. – Київ: КНУБА. – С. 12–18.  
<https://doi.org/10.32347/gbdmm2019.93.0102>.
8. **Міщук Д., Горбатюк Є.** Визначення геометричних параметрів маніпулятора за характеристиками робочого середовища / Д. Міщук, Є. Горбатюк, В. Волянчук // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2019. – №94. – Київ: КНУБА. – С. 25–34.  
<https://doi.org/10.32347/gbdmm2019.94.0201>.
9. **Theoretical aspects of modern engineering: collective monograph** / Hnes L., etc. International Science Group. Boston: Primedia eLaunch, 2020. 356 p. Available at: DOI-  
<https://doi.org/10.46299/ISG.2020.MONO.TECH.III>.
10. **Тетерятник О.** Аналіз конструкцій та концепції розвитку компактного екскаваторного обладнання / О. Тетерятник, О. Костенюк, А. Фомін // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – К., 2018. – Вип. 92. – С. 56–62. DOI:  
<https://doi.org/10.31493/gbdmm1892.0401>.

## REFERENCES

1. **Khmara L. A., Kravets S. V., Nichke V. V., Nazarov L. V., Skobliuk M. P., Nikitin V. H.** (2010). Mashyny dlia zemlianykh robot: navchalnyi posibnyk. Rivne, Dnipropetrovsk-Kharkiv, 557.
2. **Livins'kij O. M., Esipenko A. D., Kurok O. I., Pelevin L. E., Smirnov V. M., Voljanjuk V. O.** (2013). Budivel'na tehnika [Building technique]. Kyiv, KNUBA, Ukraïns'ka akademiya nauk, "MP Lesja" Publ., 614.
3. **Pelevin L., Gorbatyuk Ie., Zaichenko S., Shalenko V.** (2017). Developing a mathematical substantiation for the physical modelling of the soil-ripping equipment work process. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 6, No. 2(90): Information technology. Industry control systems, 52–60.  
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118429>
4. **Sukach M., Gorbatyuk Ie., Marchenko O.** (2013). Synthesis of earthmoving and road machinery: textbook, Kyiv, Publishing house Lira, 376.
5. **Gorbatyuk Ie., Volianiuk V., Terentyev O., Sviderskyi A.** (2021). Desing of construction machines: textbook. Kyiv, CE Comprint Publ., 283.
6. **Gorbatyuk Ie.** (2020). Theoretical bases of construction of unclear model of evaluation of administrative decisions are at a management development of the systems of engineering complexes. Modern Movement of Science: abstracts of the 10th International Scientific and Practical Internet Conference, April 2-3, 2020. Dnipro, Vol.1. 300-303.
7. **Pelevin L., Fomin A., Gorbatyuk Ie., Zaichenko V.** (2019). Conduction effective forecasting of earthmoving machines. Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny [Mining, Constructional, Road and Melioration Machines], No.93, 12-18.  
<https://doi.org/10.32347/gbdmm2019.93.0102>.
8. **Mishchuk D., Gorbatyuk Ie., Volianiuk V.** (2019). Determination of geometrical parameters of the manipulator according to the characteristics of the working environment, Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny [Mining, Constructional, Road and Melioration Machines], No.94. 25-34.  
<https://doi.org/10.32347/gbdmm2019.94.0201>.
9. **Hnes L.** (2020). Theoretical aspects of modern engineering: collective monograph. International Science Group. Boston: Primedia eLaunch, 356.  
<https://doi.org/10.46299/ISG.2020.MONO.TECH.III>.
10. **Teteriatnyk O., Kosteniuk O., Fomin A.** (2018). Analiz konstrukcij ta koncepcii' rozvytku kompaktnogo ekskavacijnogo obladdannja. Girnychi, budivel'ni, dorozhni ta melioratyvni mashyny [Mining, Constructional, Road and Melioration Machines], No.92, 56–62. <https://doi.org/10.31493/gbdmm1892.0401>

### Selection of the calculated equivalent of the supporting devices of U-shaped frames of earthmoving vehicles

*Ievgenii Gorbatyuk<sup>1</sup>, Svitlana Komotska<sup>2</sup>  
Dmitry Mishchuk<sup>3</sup>, Vladimir Volianiuk<sup>4</sup>*

*Kyiv National University of  
Construction and Architecture*

**Abstract.** The article describes the choice of the design equivalent of the supporting devices of U-shaped frames of earthmoving vehicles. When calculating the U-shaped frames of earth-transport machines for the action of forces located in the plane of the frame, the supporting devices must be represented and calculated either as hinged-fixed supports or as a statically defined system.

The difference in the choice of the calculated equivalent of the supporting devices leads to an is-total difference in the estimated load of the entire frame. Considering the same frame with the same load, but with different resistance devices, it is easy to reconcile that the value of the largest bend-

ing moment in the transverse part of the raw can vary by 30-35%. A significant difference in load exists in the longitudinal parts of the frame. In this regard, there is a need to formulate the criteria by which it can be concluded that the supporting frame device that is designed corresponds to the calculated equivalent.

The correct choice of the calculated equivalent of the supporting devices of the ground-transport machine frame significantly affects the results obtained during calculations and helps to greatly simplify them.

**Keywords:** earthmoving vehicles, frame, design equivalent, supporting device, pushing bar, gap.