

ავტორიზირებული

ენერგოეფექტურობის ამაღლება საცალო-სატარო ტვირთების
დატვირთვა-განტვირთვის პროცესში

ალექსანდრე ლომიძე

aleksandre.lomidze@atsu.edu.ge

ვლადიმერ გვეტაძე

vladimer.gvetadze@atsu.edu.ge

აკაკი წერეთლის სახელმწიფო უნივერსიტეტი

ქუთაისი, საქართველო

DOI:<https://doi.org/10.52340/atsu.2025.2.26.13>

შემუშავებულია ამჟამინათ ტვირთის დატვირთვა-განტვირთვის პროცესის ცალკეულ ოპერაციებზე მოხმარებული ენერჯის რაოდენობის გამოთვლის მეთოდიკა. აგებულია მოხმარებული ენერჯის რაოდენობის ცვლილების გრაფიკები აწეული ტვირთის მასაზე დამოკიდებულებით, აწევის სხვადასხვა სიმაღლის შემთხვევაში. ტვირთების დატვირთვა-განტვირთვის პროცესში ენერგოეფექტურობის შეფასებისათვის შემოტანილია სიდიდე - ენერგოეფექტურობის ფარდობითი მაჩვენებელი - დატვირთვა-განტვირთვის პროცესში. აგებულია ტვირთამწეობის მიხედვით ამწის გამოყენების კოეფიციენტზე მისი დამოკიდებულების გრაფიკები აწევის სიმაღლის სხვადასხვა მნიშვნელობებისათვის. კვლევის შედეგების ანალიზის საფუძველზე შემოთავაზებულია ენერგოეფექტურობის ამაღლების გზა საცალო-სატარო ტვირთების დატვირთვა-განტვირთვის პროცესში.

საკვანძო სიტყვები: დატვირთვა-განტვირთვა, მოხმარებული ენერჯის რაოდენობა, ენერგოეფექტურობა, ენერგოეფექტურობის ფარდობითი მაჩვენებელი

შესავალი. ტვირთის ტრანსპორტირების პროცესში გაწეული ხარჯების საკმაოდ დიდი წილი მოდის დატვირთვა-განტვირთვის ოპერაციებზე (Морозова 2010, 39). ამიტომ ამ ოპერაციებზე ტექნიკური საშუალებების გამოყენებისას ენერგოეფექტურობის ამაღლება წარმოადგენს ტრანსპორტის სფეროში ერთ-ერთ მნიშვნელოვან ამოცანას (Голубков 1981: 3).

ლიტერატურული წყაროების მიმოხილვა. ტრანსპორტის სფეროში ენერჯის დაზოგვისა და ენერგოეფექტურობის ამაღლების პრობლემებს ეძღვნება რიგი სამეცნიერო ნაშრომები (ვარშანიძე 2023, Purtskhvanidze, Khintibidze 2024; Purtskhvanidze, Lejava 2024; Клубничкин 2025, Куньгина 2024 და სხვ.), თუმცა არც ერთი მათგანი არ ეხება უშუალოდ დატვირთვა-განტვირთვის პროცესებს. შესაბამისად, ჯერ კიდევ არაა გამოკვლეუ-

ლი სატრანსპორტო საშუალებების დატვირთვა-განტვირთვის პროცესში ამწე მანქანის გამოყენებისას მოხმარებული ენერჯის რაოდენობრივად განსაზღვრის მეთოდოლოგია და მისი დაზოგვის შესაძლებლობები.

ენერგოეფექტურობა გულისხმობს ენერჯის გონივრულად გამოყენებას და მისი დანაკარგების შემცირებას, რაც, სხვა დადებით შედეგებთან ერთად, არის ფინანსური სახსრების დაზოგვის და დამატებითი სამუშაო ადგილების შექმნის ერთერთი ყველაზე შედეგიანი გზა. ტვირთის დატვირთვა-განტვირთვისას ამწე მანქანის გამოყენების პროცესში ენერგოეფექტურობა შეიძლება შეფასდეს ერთეული მასის ტვირთის გადატვირთვაზე მოხმარებული ენერჯის რაოდენობით.

ტვირთის აწევაზე მოხმარებული ხვედრითი ენერჯია ზოგადად დამოკიდებულია როგორც ამწე მანქანის მახასიათებლებზე და მის სრულყოფილებაზე, ასევე ექსპლუატაციის პირობებზეც - დატვირთვა-განტვირთვის პროცესის სწორად დაგეგმვასა და ორგანიზებაზე. ამწე მანქანის ტექნიკური მახასიათებლები განსაზღვრულია მისი დამამზადებელი ქარხნის მიერ და მათი შეცვლა შეუძლებელია. ამიტომ ამწე მანქანის ექსპლუატაციის პროცესში ტვირთის აწევაზე დახარჯული ხვედრითი ენერჯის შესამცირებლად რჩება მეორე გზა.

სამუშაოს მიზანია ტვირთამწე მანქანის საშუალებით ტვირთის დატვირთვა-განტვირთვის პროცესში მოხმარებული ენერჯის რაოდენობრივად განსაზღვრის მეთოდოლოგიის შემუშავება და ენერგოეფექტურობის ამაღლების შესაძლო გზების ძიება.

კვლევის მეთოდი. ამწე მანქანის საშუალებით ტვირთის გადამუშავების ტიპური ტექნოლოგიური ციკლი შეიძლება მოიცავდეს ტვირთზე საკიდი (ამღები) მოწყობილობის ჩაბმას, მის H_1 სიმაღლეზე აწევას, ურიკის ან/და ამწის L მანძილზე გადაადგილებას (ან ამწის φ კუთხეზე შემობრუნებას), ტვირთის დასადებად მის H_2 სიმაღლეზე დაწევას და მისგან საკიდი მოწყობილობის ჩახსნას (Третьяков 2013, 17; Голубков 1981, 184-197). ამის შემდეგ უნდა მოხდეს ცარიელი საკიდის საპირისპირო მიმართულებით მოძრაობა, პირვანდელ მდგომარეობაში დასაბრუნებლად და მორიგი ტვირთის ასაღებად. ენერჯის საკმაოდ მნიშვნელოვანი რაოდენობა მოხმარება ყველა ჩამოთვლილ ოპერაციაზე (გარდა ტვირთზე საკიდის ჩაბმისა და მისი ჩახსნისა). შესაძლებელია ამ ოპერაციებზე მოხმარებული ენერჯიების რაოდენობის ცალ-ცალკე გამოთვლა.

ა. ლომიძე, ვ. გვეტაძე

ტვირთის H სიმაღლეზე აწევისას გვაქვს ამწევი მექანიზმის გაშვების, დამყარებული s_c სიჩქარით მოძრაობის და ბოლოს დამუხრუჭების პროცესები. ენერგია იხარჯება მექანიზმის გაშვებისა და დამყარებული მოძრაობის დროს. ტვირთის აწევისას ენერგია იხარჯება არა მხოლოდ მისი პოტენციური ენერგიის შეცვლისთვის აუცილებელი სტატიკური წინააღმდეგობის გადალახვაზე, არამედ ტვირთისა და ამწევი მექანიზმის მოძრაობის ნაწილებისათვის გარკვეული კინეტიკური ენერგიის მინიჭებაზეც, რის გამოც ტვირთის სიჩქარე იზრდება 0-დან s_c -მდე. აქედან გამომდინარე, მექანიზმის გაშვების პროცესში (აჩქარების დროს) გარკვეული რაოდენობის ენერგია გარდაიქმნება ტვირთისა და ამწევი მექანიზმის კინეტიკურ ენერგებად, რომელთა საერთო რაოდენობა (ჯოულებში) იქნება (Александров 2000, 318-330):

$$E_{k.l.m} = E_{k.r.m} + E_{k.r.p} = \frac{(Q+G_h)v_c^2}{2} + \sum_{i=1}^n \frac{J_i \omega_i^2}{2}, \quad (1)$$

სადაც $E_{k.r.m}$ არის სწორხაზოვნად მოძრაობის მასების კინეტიკური ენერგია, ხოლო $E_{k.r.p}$ მექანიზმის მბრუნავი ნაწილების კინეტიკური ენერგია დამყარებული მოძრაობის დროს;

Q და G_h – შესაბამისად, ტვირთის და საკიდის მასები, (კგ);

n – ამწევი მექანიზმის სხვადასხვა სიჩქარით მბრუნავი ლილვების რაოდენობა;

J_i და ω_i – შესაბამისად მექანიზმის i -ური ლილვის ინერციის მომენტი (კგ·მ²) და ბრუნვის კუთხური სიჩქარე (წმ⁻¹).

დამყარებული მოძრაობის დროს ძრავას უხდება მხოლოდ სტატიკური წინააღმდეგობის (ტვირთის სიმძიმის ძალის) გადალახვა. ტვირთის H სიმაღლეზე აწევისას შესრულებული მუშაობა ჯოულებში ტოლი იქნება:

$$A_{l.m} = \frac{(Q+G_h)gH}{\eta_{l.m}}. \quad (2)$$

აქ g არის გრავიტაციის აჩქარება (9,81 მ/წმ²);

$\eta_{l.m}$ – ამწევი მექანიზმის მარგი ქმედების კოეფიციენტი.

ტვირთის H სიმაღლეზე აწევისას ელექტროძრავას შემთხვევაში ამწევი მექანიზმის მიერ მოხმარებული ჯამური ენერგია კილოვატ-საათებში იქნება

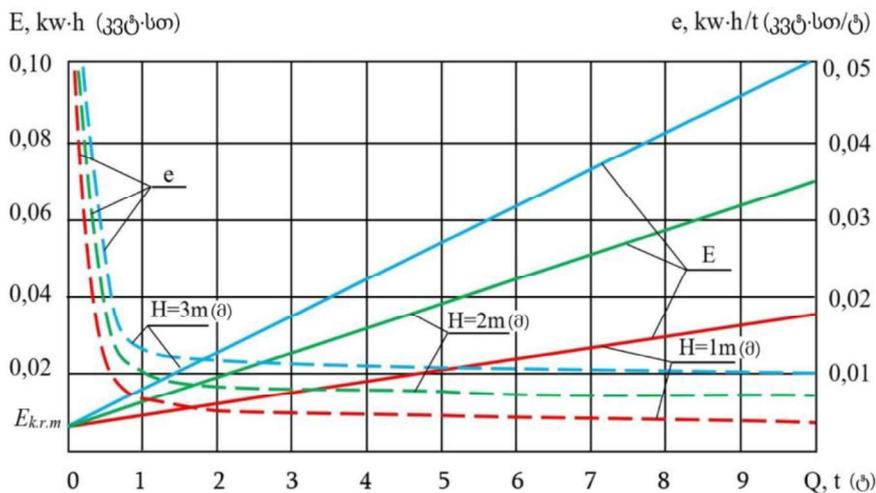
$$E_H = \frac{E_{k.l.m} + A_{l.m}}{3,6 \cdot 10^6 \cdot \eta_{e.m.e}}.$$

აქ $\eta_{e.m.e}$ არის ელექტროძრავას მარგი ქმედების კოეფიციენტი.

თუ გავითვალისწინებთ, რომ $G_h \approx 0,025Q$, მაშინ მთლიანი მოხმარებული ენერგია იქნება:

$$E_{H,t} = \left[E_{k.r.m} + 1,025Q \left(\frac{v_{\Sigma}^2}{2} + \frac{gH}{\eta_{l,m}} \right) \right] / 3,6 \cdot 10^6. \quad (3)$$

აწევის პროცესის კვლევის შედეგები და მისი ანალიზი. ქვემოთ, 1-ელ სურათზე, წარმოდგენილია ჩვენს მიერ შემოთავაზებული მეთოდის გამოყენებით აგებული გრაფიკები, რომლებიც ასახავს ამწევი მექანიზმის მიერ მოხმარებული ჯამური ენერჯის დამოკიდებულებას ასაწევი ტვირთის მასაზე, აწევის სიმაღლის სხვადასხვა მნიშვნელობისათვის. წარმოდგენილი გრაფიკები შეესაბამება ამწევი მექანიზმს, რომლის ძრავას სიმძლავრე $N_{dr} = 22$ კვტ; ბრუნვის სიჩქარე $n_{dr} = 715$ ბრ/წთ ($\omega_1 = 75$ წმ⁻¹); მექანიზმის ω_1 კუთხური სიჩქარით მბრუნავ ლილვებზე მოთავსებული მასების ინერჯის მომენტი $J_1 = 3,95$ კგ·მ²; ტვირთის აწევის დამყარებული სიჩქარე $u_c = 20$ მ/წთ = 0,33 მ/წმ. თითოეული ამ შემთხვევისათვის განისაზღვრა ასევე მოხმარებული ხვედრითი ენერჯიები (e), ანუ მოხმარებული ენერჯიები ტვირთის მასის ერთეულზე (1 ტ) გადაანგარიშებით.



სურ. 1. მოხმარებული ენერჯის (E) და ხვედრითი ენერჯიების (e) დამოკიდებულება ასაწევი ტვირთის მასაზე.

Fig. 1. Dependence of consumed energy (E) and specific energy (e) on the weight of the load to be lifted.

როგორც ჩანს, H სიმაღლეზე ტვირთის აწევისათვის ამწევი მექანიზმის მიერ მოხმარებული ჯამური ენერჯია წარმოადგენს აწეული ტვირთის მასის წრფივ, ზრდად ფუნქციას. ეს ფუნქცია ასევე შეიცავს მუდმივ მდგენელსაც - სახელდობრ მექანიზმის გაშვებისას მბრუნავი ნაწილების ასაჩქარებლად საჭირო კინეტიკური ენერჯიას, რომელიც არ არის დამო-

ა. ლომიძე, ვ. გვეტაძე

კიდებული აწეული ტვირთის მასაზე. ეს ნიშნავს, რომ უტვირთოდ ამოძრავების დროსაც კი მექანიზმი მოიხმარს ენერგიას, რომლის მნიშვნელობაა $E_{k.r.p.}$ და >0 . სწორედ ამის გამო ხდება, რომ, როდესაც ასაწევი ტვირთის მასა მცირდება ($Q \rightarrow 0$), მაშინ მოხმარებული ხვედრითი ენერგია მატულობს ($e \rightarrow \infty$). ასეთი ცვლილება განსაკუთრებით იგრძნობა ასაწევი ტვირთის შედარებით მცირე მასის შემთხვევაში, როდესაც $Q < (0,1 \div 0,2) Q_{max}$. იმ შემთხვევაში, როდესაც ასაწევი ტვირთის მასა იზრდება, მაშინ იმატებს სტატიკური წინააღმდეგობა, და შესაბამისად იზრდება მოხმარებული ენერგიის რაოდენობაც, თუმცა, ტვირთის მასის ერთეულზე მოსული მოხმარებული ხვედრითი ენერგია e ოდნავ, მაგრამ მცირდება. ეს მიუთითებს იმაზე, რომ ენერგიის მნიშვნელოვანი დაზოგვა შეიძლება მოხდეს ერთდროულად აწეული ტვირთის მასის გაზრდით (მისი მიახლოებით ამწის მაქსიმალურ Q_{max} ტვირთამწეობასთან). მაგალითად, დიაგრამიდან ჩანს, რომ მოცემული მახასიათებლების მქონე ამწის საშუალებით 10 ტ მასის ტვირთის 3 მ სიმაღლეზე ასაწევად იხარჯება 0,102 კვტ·სთ ენერგია. იგივე ჯამური მასის მქონე 1 ტონიანი 10 ერთეული ტვირთის იგივე სიმაღლეზე ცალ-ცალკე აწევაზე კი - სულ ჯამში მოიხმარება 0,134 კვტ·სთ ენერგია, რაც დაახლოებით 30-32%-ით მეტია, ვიდრე მათი ერთად ასაწევად საჭირო ენერგია. ამასთან, აღნიშნული ტვირთის ცალ-ცალკე აწევის შემთხვევაში, ასევე გასათვალისწინებელია ცარიელი ამწის საწყის მდგომარეობაში (უკან) დაბრუნებისათვის ენერგიის დახარჯვა არა 1-ჯერ, არამედ 10-ჯერ.

ამგვარად, ენერგოეფექტურობის ამაღლების ერთერთი გზა დაკავშირებულია ტვირთების (სატვირთო ერთეულების) გამსხვილებასთან და დატვირთვა-განტვირთვის მოწყობილობების ტვირთამწეობის მაქსიმალურ გამოყენებასთან, რაც შეამცირებს მოწყობილობების ზედმეტი მოძრაობების (უქმი სვლების) რიცხვს. და ხელს შეუწყობს ენერგიის დაზოგვას.

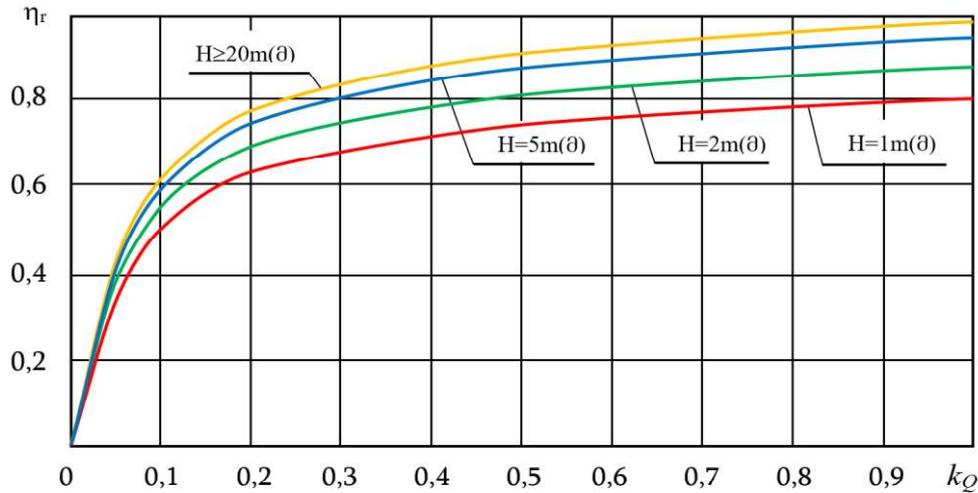
არსებული მეთოდებისაგან განსხვავებით, უფრო თვალსაჩინოებისა და პრაქტიკაში გამოყენების გამარტივების მიზნით, ავტორების მიერ ექსპლუატაციის პროცესისათვის შემოტანილი იქნა მარგი ქმედების კოეფიციენტის მსგავსი სიდიდის - **ენერგოეფექტურობის ფარდობითი მაჩვენებლის** ($0 \leq \eta_r \leq 1$) ცნება. იგი არის უგანზომილებო სიდიდე და წარმოადგენს საუკეთესო საექსპლუატაციო პირობებში ტვირთის აწევაზე დახარჯული ხვედრითი ენერგიის შეფარდებას მოცემულ საექსპლუატაციო პირობებში

ტვირთის აწევაზე დახარჯულ ხვედრით ენერგიასთან. მაგალითად, თუ საუკეთესო საექსპლუატაციო პირობებში ხდება ამწის ტვირთამწეობის სრულად გამოყენება, ხოლო მოცემულ პირობებში ტვირთის აწევა გვიხდება ნაკლები მასური პორციობით, მაშინ სხვა თანაბარ პირობებში ტვირთის აწევაზე დახარჯული ხვედრითი ენერგია მატულობს, ენერგოეფექტურობის ფარდობითი მაჩვენებელი η_r კი - მცირდება. პრაქტიკული გამოყენების თვალსაზრისით მიზანშეწონილია აწეული ტვირთის პორციის მასა გამოვსახოთ არა აბსოლუტური მნიშვნელობით, არამედ ტვირთამწეობის მიხედვით ამწის გამოყენების კოეფიციენტისა და ამწის მაქსიმალური ტვირთამწეობის საშუალებით $Q = k_Q Q_{max}$ (Александров 2000, 82).

რადგან ამწის მაქსიმალური ტვირთამწეობა არის მუდმივი (ისრიანი ამწეების გარდა), ამიტომ ენერგოეფექტურობის ფარდობითი მაჩვენებლის გრაფიკი შეიძლება ავსავთ ტვირთამწეობის მიხედვით ამწის გამოყენების k_Q კოეფიციენტზე დამოკიდებულებით და განვაზოგადოთ იგი მსგავსი ტიპის ამწებისათვის.

ჩვენ მიერ აგებული ასეთი დამოკიდებულების გრაფიკი აწევის სხვადასხვა სიმაღლის შემთხვევაში მოყვანილია სურ. 2-ზე.

წარმოდგენილი გრაფიკიდან ჩანს, რომ რაც უფრო მეტია ტვირთამწეობის მიხედვით ამწის გამოყენების კოეფიციენტი (k_Q), მით მეტია დატვირთვა-განტვირთვის პროცესში ამწევი მექანიზმის ენერგოეფექტურობის ფარდობითი მაჩვენებელი. ეს მაჩვენებელი განსაკუთრებით დაბალია მაშინ, როდესაც $k_Q < 0,1 \neq 0,2$. ამიტომ დატვირთვა-განტვირთვის პროცესში ასეთი შემთხვევები მაქსიმალურად უნდა იქნას გამორიცხული. ენერგოეფექტურობის ფარდობითი მაჩვენებელზე ასევე გავლენას ახდენს ტვირთის აწევის სიმაღლეც (იგივე ასაწევი მექანიზმის ჩართვის ხანგრძლივობა). მათი მცირე მნიშვნელობის შემთხვევაში აწევის ოპერაციის შესრულებისას პროცენტულად საგრძნობ წილს იკავებს მექანიზმის ასაჩქარებლად საჭირო ენერგია, რის გამოც ენერგოეფექტურობის ფარდობითი მაჩვენებელი არის შედარებით ნაკლები.



სურ. 2. ენერგოეფექტურობის ფარდობითი მაჩვენებლის დამოკიდებულება ტვირთამწეობის მიხედვით ამწის გამოყენების კოეფიციენტზე, აწევის სხვადასხვა სიმაღლის შემთხვევაში.

Fig. 2. Dependence of energy efficiency on the crane utilization coefficient by load capacity, for different lifting heights.

ტვირთის ჰორიზონტალურად გადაადგილების და მობრუნების შემთხვევა. ამწის ან ურიკის L მანძილზე გადაადგილებისას და ამწის φ კუთხით მობრუნებისას დახარჯული ენერგია კილოვატ-საათებში შესაბამისად იქნება:

$$E_L = \frac{E_{k.m.m} + A_{m.m.}}{3,6 \cdot 10^6 \cdot \eta_{dr}}, \quad E_\varphi = \frac{E_{k.t.m} + A_{t.m.}}{3,6 \cdot 10^6 \cdot \eta_{dr}} \quad (4)$$

სადაც, ურიკის ასაჩქარებლად საჭირო ენერგია (ჯოულებში) უდრის

$$E_{k.m.m} = \frac{(Q + G_h + G_{tr})v_{tr}^2}{2} + \sum_{i=1}^n \frac{J_i \omega_i^2}{2}, \quad (5)$$

ხოლო ამწის გადაადგილებისა და მობრუნების მექანიზმების ასაჩქარებლად საჭირო ენერგიები (ჯოულებში) შეიძლება გამოითვალოს შესაბამისად, შემდეგი ფორმულების გამოყენებით:

$$E_{k.m.m} = \frac{(Q + G_h + G_{tr} + G_{cr})v_{cr}^2}{2} + \sum_{i=1}^n \frac{J_i \omega_i^2}{2}. \quad (6)$$

და

$$E_{k.t.m} = \frac{[J_t + (Q + G_h)R^2] \cdot \omega_{cr}^2}{2} + \sum_{i=1}^n \frac{J_i \omega_i^2}{2}. \quad (7)$$

აქ G_{cr} და G_{tr} არის ამწის და ურიკის მასები, ხოლო v_{cr} და v_{tr} - მათი მოძრაობის სიჩქარეები დამყარებული მოძრაობის დროს (მ/წმ);

J_i და ω_i - შესაბამისი მექანიზმის i -ური ლილვის ინერციის მომენტი (კგ·მ²) და ბრუნვის კუთხური სიჩქარე (წმ⁻¹);

J_c და ω_{cr} – ამწის შესაბამისი მექანიზმის მბრუნავი ნაწილის ინერციის მომენტი (კგ·მ²) და ბრუნვის კუთხური სიჩქარე (წმ⁻¹); R - ამწის გადაწვდომა (რადიუსი), (მ).

აქტიური წინააღმდეგობის დასაძლევად შესრულებული სამუშაო, როდესაც ამწე ან ურიკა გადაადგილდება L მანძილზე და ამწე შემობრუნდება ϕ კუთხით, უდრის:

$$A_{m.m} = \frac{W_r \cdot L}{\eta_{m.m}} \text{ და } A_{t.m} = \frac{M_r \cdot \phi}{\eta_{t.m}}. \quad (8)$$

W_r არის ურიკის ან ამწის გადაადგილების წინააღმდეგობის ძალა (ნ), ხოლო M_r - ამწის მობრუნების წინააღმდეგობის მომენტი (ნ·მ) დამყარებული მოძრაობის დროს, რომელიც ამწის კონკრეტული კონსტრუქციის და ტვირთის მასის გათვალისწინებით განისაზღვრება ცნობილი ფორმულებით (Александров 2000, 259-264, 303-312); $\eta_{m.m}$ და $\eta_{t.m}$ - შესაბამისად არის გადაადგილების და მობრუნების მექანიზმების მარგი ქმედების კოეფიციენტები.

ენერგოეფექტურობის ფარდობითი მაჩვენებლის თვალსაზრისით ანალოგიური სურათი გვაქვს ამწის მობრუნების და გადაადგილების მექანიზმების შემთხვევაშიც. განსხვავება მდგომარეობს იმაში, რომ ამწის საშუალებით ტვირთის ჰორიზონტალურად მოძრაობას (მათ შორის მობრუნებას) თან ახლავს გაცილებით მეტი მასების მქონე ამწის შესაბამისი ნაწილების ჰორიზონტალური მოძრაობაც. ამიტომ მათთვის კინეტიკური ენერჯის მინიჭება მოითხოვს გაცილებით მეტ ენერჯიას, ვიდრე ეს გვქონდა ამწევი მექანიზმის შემთხვევაში. ამიტომ, წვრილი სატვირთო ერთეულების ცალცალკე ჰორიზონტალურად გადაადგილების შემთხვევაში მოხმარებული ხვედრითი ენერჯია პროცენტულად კიდევ უფრო მეტია, ვიდრე ამწევი მექანიზმის შემთხვევაში. და პირიქით, სატვირთო ერთეულების დამსხვილებისას, მათ ჰორიზონტალურად გადაადგილებაზე მოხმარებული ხვედრითი ენერჯია პროცენტულად მცირდება კიდევ უფრო საგრძნობლად, ვიდრე აწევის მექანიზმის შემთხვევაში.

დასკვნა. ნაშრომში შემუშავებულია ამწე მანქანით ტვირთის დატვირთვა-განტვირთვის პროცესის ცალკეულ ოპერაციებზე მოხმარებული ენერჯიის რაოდენობის გამოთვლის მეთოდიკა. აგებულია ტვირთის აწევაზე მოხმარებული სრული და ხვედრითი ენერჯიების რაოდენობის ასაწევი ტვირთის მასაზე (და ტვირთამწეობის მიხედვით ამწის გამოყენების კოეფიციენტზე) დამოკიდებულების გრაფიკები აწევის სხვადასხვა სიმაღლის შემთხვევაში.

დატვირთვა-განტვირთვის პროცესში ამწე მანქანის გამოყენების ენერგოეფექტურობის შეფასებისათვის შემოტანილია უგანზომილებო სიდიდე - ენერგოეფექტურობის ფარდობითი მაჩვენებელი. კვლევის შედეგად დადგინდა, რომ ეს მაჩვენებელი მაქსიმალურია ამწის ტვირთამწეობის მაქსიმალურად გამოყენებისას, ე.ი. მაქსიმალური ტვირთამწეობის ტოლი ან მასთან მიახლოებული მასის მქონე ტვირთების დატვირთვა-განტვირთვის შემთხვევაში (როდესაც ტვირთამწეობის მიხედვით ამწის გამოყენების კოეფიციენტი უახლოვდება ან უდრის 1-ს).

ენერგოეფექტურობის ფარდობითი მაჩვენებელი იკლებს ინტენსიურად (20÷30%-ით და მეტად) მაშინ, როდესაც ტვირთამწეობის მიხედვით ამწის გამოყენების კოეფიციენტი არ აჭარბებს 0,2-ს. ეს მაჩვენებელი მცირდება ასევე აწევის ძალიან მცირე სიმაღლეების შემთხვევაში (როდესაც ამწევი მექანიზმის უწყვეტად ჩართვის ხანგრძლივობა არის ამ მექანიზმის გაშვების დროის თანაზომადი). აქედან გამომდინარე, მიზანშეწონილია დატვირთვა-განტვირთვის დროს ვერიდოთ ასეთ შემთხვევებს.

ზემოთ მოყვანილი პუნქტები სამართლიანია ასევე ამწე მანქანის გადაადგილებისა და მოსაბრუნებელი მექანიზმებისთვისაც.

საცალო-სატარო ტვირთების დატვირთვა-განტვირთვის პროცესში მოხმარებული ენერჯის დაზოგვისა და ენერგოეფექტურობის ამაღლების მიზნით აუცილებელია ასაწევი სატვირთო ერთეულების დამსხვილება ამწის მაქსიმალური ტვირთამწეობის გათვალისწინებით.

ლიტერატურა

ვარშანიძე, ა. 2023. *საკონტინერო გადაზიდვების ეფექტურობის ამაღლება საზღვაო ტრანსპორტზე*. ავტორეფერატი ტრანსპორტის ინჟინერიის დოქტორის (0716.1.1) აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად. ქუთაისი.

Purtskhvanidze, Giorgi., Khintibidze, Kakhaber., Topuria, Romanoz., Nemsadze, Vladimer. 2024. „SELECTION OF THE TYPE OF SHIPMENT AND GEORGIA'S PERSPECTIVES IN THE MARITIME SHIPPING PROCESS.“ *Innovations in shipbuilding and ocean technology: XV International scientific and technical conference: materials.* – Ukraine. Nikolayev.

- Purtskhvanidze, Giorgi., Mikheil, Lejava., Zaza, Shubladze., Jemal, Sharadze., Irakli, Khajomia. 2024. „Analytical review of the problems of improving the energy efficiency of diesel engines and reducing atmospheric air pollution.“ *World Science* 2(84), 2024.
DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30062024/8171
- Александров, М.П. 2000. *Грузоподъемные машины: Учебник для вузов*. Москва: МГТУ. მოძიების თარიღი: 12.11.2024. https://oilgasec.ru/wp-content/uploads/2021/04/Alexandrov_M_P_Gruzopodemnye_mashiny_2000.pdf
- Голубков В. В., Киреев В.С. 1981. *Механизация погрузочно-разгрузочных работ и грузовые устройства*. Москва: Транспорт.
- Клубничкин, Е.Е. 2025. „Метод повышения энергоэффективности погрузочно-транспортных машин для сортиментной заготовки древесины“. *Лесной вестник / Forestry Bulletin*, Т. 29, №1, 2025: 112–125. DOI: 10.18698/2542-1468-2025-1-112-125. მოძიების თარიღი: 20.03.2025. <https://les-vest.mf.bmstu.ru/contents/2025/1/pdf/112-125.pdf>
- Морозова, В.С. 2010. *Транспортные и погрузочно-разгрузочные средства: учебное пособие*, сост.: В.С. Морозова, В.Л.Поляцко. Челябинск: ЮУрГУ. მოძიების თარიღი: 12.01.2025. https://lib.susu.ru/ftd?base=SUSU_METHOD&key=000450162&dtype=F&etype=.pdf
- Третьяков, Г.М., Москвичева, Е.Е., Прусов, М.В., Пацев, Ю.П. 2013. *Транспортно-грузовые системы*. Самара: СамГУПС. მოძიების თარიღი: 12.01.2025. https://www.samgups.ru/about/struktura_universiteta/filialy/vpo/nnov/elektronnaya-informatsionnaya-obrazovatel'naya-sreda-filiala-samgups-v-g-nizhnem-novgorode/metodicheskie-rekomendatsii-studentam/ekspluatatsiya-zheleznykh-dorog-ezhd/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5%20%D1%83%D0%BA%D0%B0%D0%B7%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%BA%20%D0%BB%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BD%D1%8B%D0%BC%20%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B0%D0%BC.pdf
- Куныгина, Л.В. 2024. „Совершенствование технологии перевозки мелких отправок в мультимодальном сообщении“. *Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики*

России / Труды научно-практической конференции. Воронеж, 2024:
138-142. მოძიების თარიღი: 20.03.2025.
https://vfrgups.ru/sveden_docs/konferenc/sbornik_19-11-2024.pdf

Automotive Engineering

Some opportunities for increasing energy efficiency in the process of cargo loading and unloading

Aleksandre Lomidze

aleksandre.lomidze@atsu.edu.ge

Vladimer Gvetadze

vladimer.gvetadze@atsu.edu.ge

Akaki Tsereteli State University

Kutaisi, Georgia

DOI:<https://doi.org/10.52340/atsu.2025.2.26.13>

A methodology has been developed for calculating the amount of energy consumed during individual operations of the loading-unloading process. The graphs of the change in the amount of consumed energy have been built based on the mass of the lifted load at different lifting heights. For assessing energy efficiency, a parameter has been introduced – the useful work performed by the crane as a result of consuming 1 kWh of energy. A graph of its dependency on the load capacity is created based on the crane's usage coefficient. Based on the analysis of the graphs, some possible ways to improve the energy efficiency of the loading-unloading process are proposed.

Keywords: *load-unload, energy, saving, productivity*

A considerable share of the cost of cargo transportation comes from loading and unloading operations. Therefore, increasing the efficiency of the use of technical means for these operations is one of the important issues in the field of transport.

The efficiency of loading and unloading machines under the same operating conditions can be assessed by the amount of energy spent on reloading a unit mass of cargo, the productivity of the reloading process, etc.

Energy efficiency does not mean the introduction of restrictions on energy usage. It refers to the rational use of energy and the reduction of its losses, while effectively using energy is one of the most efficient ways to save financial resources and create additional jobs. Due to the growing demand for energy, it

is desirable to perform the same amount of loading and unloading operations with lower energy consumption.

A number of scientific publications are devoted to energy saving and improving energy efficiency in the transport sector, including works (Varshandze 2023, Purtskhvanidze, Khintibidze 2024, Purtskhvanidze, Lezhava 2024, Klubnichkin 2025, Kunygina 2024).

Despite existing works, the possibilities of energy saving in the loading-unloading process of vehicles, specifically in the case of lifting cargo units in groups with a crane (and consequently increasing the coefficient of usage based on the crane's lifting capacity), have not yet been explored. The aim of this work is to find possible ways to increase energy efficiency in the loading-unloading process.

A typical technological cycle of cargo handling by means of a crane may generally include the operations of hitching a hanger to the cargo, raising it to a height of H_1 , moving the cart and/or crane a distance L (or turning the crane through an angle φ), lowering the cargo to a height of H_2 , and removing it. After that, in the opposite direction, the empty hanger should be returned to its original position. All of the above operations, except for hooking and unhooking the load, consume a significant amount of energy. These energies can be calculated separately.

When lifting the cargo to a height H , we have the processes of launch, steady motion and finally braking. Energy is consumed during the processes of launch and steady motion of the lifting mechanism. When lifting a load, the energy is not only spent on overcoming the static resistance necessary for the change of its potential energy, but it is also spent on giving certain kinetic energies to the cargo and moving parts of the lifting mechanism, due to which the speed of the cargo increases from 0 to v_c . Hence, in the process of launching (during acceleration), a certain amount of energy is converted into the kinetic energy of the cargo and lifting mechanism, the total amount of which (in joules) will be (Form. (1)):

where $E_{k.r.m}$ is the kinetic energy of rectilinearly moving masses, and $E_{k.r.p}$ - the kinetic energy of the rotating parts of the mechanism during steady motion;

Q and G_h – masses of cargo and suspension (crane hook), respectively (kg);

n – the number of shafts rotating at different speeds;

J_i and ω_i – the moment of inertia of the i -th shaft of the mechanism ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$) and the angular speed of rotation (sec^{-1}), respectively.

During steady motion, the engine only has to overcome static resistance (the gravitational force of the load). The work done in joules to lift the load to a height H will be equal to (Form. (2)):

Here g is the acceleration of gravity ($9,81 \text{ m/sec}^2$);

$\eta_{l.m}$ – efficiency of the lifting mechanism.

If we consider that $G_h \approx 0,025 Q$, then In the case of an electric drive, the total energy consumed by the lifting mechanism when lifting the cargo to a height H , in kilowatt-hours, will be (Form. (3)). Here $\eta_{e.m.e}$ is electric motor efficiency.

As can be seen from formula (3), the total energy spent on lifting a load to a height H is proportional to the mass (weight) of the load being lifted. However, it is also supplemented by the kinetic energy necessary to accelerate the rotating parts during launch, which does not depend on the weight of the load being lifted. This additional energy during one lift is consumed as many times as the number of times the crane's lifting mechanism will be turned on.

Using the above formulas, the amount of energy required to lift cargoes with masses of 0, 1, 2, ... 10 tons at various heights was calculated. For each of these cases, the specific energies (e) were also determined, that is, the energy consumed per 1 ton of cargo.

A diagram illustrating the relationship between these quantities for a lifting mechanism, with indicators ($\omega_l=75 \text{ sec}^{-1}$ ($n_{dr}= 715 \text{ rot/min}$, $N_{dr} = 22 \text{ kw}$); $J_l = 3,95 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$; $v_c=20 \text{ m/min}= 0,33 \text{ m/sec}$), is shown in Figure 1.

As can be seen from the diagram above, even when the mechanism is turned on without a cargo, it consumes quite a lot of energy, the amount of which, when the mechanism is turned on once, is equal to $El.m$. If it is necessary to accurately place the cargo during unloading, then we may have to start the mechanisms several times, as a result of which, accordingly, the amount of energy consumed will increase even more.

When the mass of the lifted load (cargo) increases, then, naturally, the static resistance increases and, accordingly, the amount of energy consumed increases. However, the specific energy e per unit mass of cargo is significantly reduced. This indicates that significant energy savings can be achieved by increasing the total weight of the load being lifted (bringing it closer to the crane's rated lifting capacity) each time the gear is engaged. For example, the diagram shows that lifting a load weighing 10 tons to a height of 3 m using a crane with given characteristics requires 0,102 kW·h of energy. Lifting 10 units of 1 ton cargo with the same total mass to the same height separately consumes 0,134 kWh of energy, which is about 30-32% more than the energy required to lift them together. In addition, in the case of separate lifting of the specified load, it is necessary to take into account the energy costs of returning the empty crane to its original position not 1 time, but 10 times.

The specific energy spent on lifting the cargo gives a certain idea about the energy efficiency of the loading-unloading process. However, for better visibility and convenience, we have introduced a dimensionless quantity (η),

which represents the useful work (ton·m) performed by the crane when consuming 1 kWh of electricity under the given operating conditions. It is a proportional quantity of the crane mechanism's efficiency and shows what portion of the consumed electrical energy is used for performing useful work. As the calculations showed, η depends not only on the characteristics of the crane but also on the operating conditions, such as how the cargo is lifted in mass portions and at what heights the cargo is being transferred.

Furthermore, in order to simplify the practical application of the research results, the energy efficiency indicator (the useful work performed by the crane when consuming 1 kWh of electricity) introduced by us is recommended to be determined not based on the absolute mass of the cargo, but rather in relation to the crane's utilization coefficient based on its lifting capacity ($kQ = Q/Q_{nom}$) (Александров 2000, 82). A graph of this relationship is presented in Figure 2.

The graph shows that the higher the crane's utilization coefficient (kQ) based on lifting capacity, the greater the energy efficiency in crane usage. A similar pattern exists for other crane mechanisms.

The energy expended when moving a crane or trolley (cart) a distance L and turning the crane through an angle φ , in kilowatt-hours, is calculated accordingly using the formulas (Form. (4)):

And the energies (in joules) required to accelerate the crane movement and rotation mechanisms can be calculated accordingly using the following formulas (Form. (6 and 7)):

where, the energy required to accelerate the trolley (in Joules) is (Form. (5))

Here G_{cr} and G_{tr} are the masses of the crane and trolley (kg); v_{cr} and v_{tr} are the speeds of their movement during steady motion (m/sec);

J_i and ω_i – moment of inertia ($kg \cdot m^2$) and angular speed of rotation (sec^{-1}) of the i -th shaft of the corresponding mechanism;

J_t and ω_{cr} – moment of inertia of the rotating part of the crane ($kg \cdot m^2$) and angular speed of rotation (sec^{-1}); R - Crane reach (radius), (m).

The work done to overcome active resistance when moving a crane or trolley a distance L , and when turning the crane through an angle φ , is equal to (Form. (8)):

W_r is the force of resistance to the movement of a trolley or crane (N), and M_r is the moment of resistance to rotation of the crane ($N \cdot m$) during steady motion, which (taking into account the specific design of the crane and the weight of the load is determined by known formulas); $\eta_{m,m}$ and $\eta_{t,m}$ - respectively, the efficiency of the moving and turning mechanisms.

In the case of moving and turning mechanisms, the dependence of the amount of energy expended on the weight of the load (as well as on the number of activations of the mechanism in one operation) has the same character as in the case of a lifting mechanism. As established by calculations, the effect of changes in the weight of the load on the energy consumed during these operations is relatively insignificant, since the total mass of the moving parts of the crane significantly exceeds the maximum lifting capacity of the crane. Therefore, other things being equal, the mechanisms of movement and rotation spend almost the same amount (slightly more) of energy when moving a load of maximum mass as when moving a load of small mass. Due to this, when cargo units are enlarged, the specific energy spent on their horizontal movement is reduced in percentage even more than in the case of a lifting operation.

As we can see, the specific energy consumed during the reloading of the cargo is reduced for all energy-consuming operations. Therefore, the amount of energy saved during the whole cycle will be quite significant.

More than 20% of the total cargo turnover of ports is packaged cargo. When transporting such cargo, loading and unloading it in packages or containers has a particularly great effect in order to enlarge the cargo units being lifted, and therefore save energy consumption.

To reduce the number of lifting mechanisms engagements and ensure a slow lowering of the cargo, it is recommended to use multi-speed lifting mechanisms. In this case, a low speed will be used before placing the cargo, and a relatively high one will be used the rest of the time. In addition, changing the speed in this case requires relatively less energy than starting the mechanism from the beginning.

Increasing the productivity of loading and unloading machines, in addition to those listed, is also possible due to the simultaneous performance of individual reloading operations (for example, lifting and lowering operations with a crane, turning it or partially combining it with another operation). It is also important to improve the design of load-receiving devices, which will reduce the time of attaching them to the load and detaching it from it. And reducing the loading and unloading cycle time leads to increased productivity and, accordingly, efficiency. A particularly significant energy saving opportunity for loading and unloading processes in ports is the use of a direct (without passing through warehouses) option for transshipment. However, due to the complexity of planning, its implementation is only partially possible.

Thus, in the article, a methodology has been developed for calculating the amount of energy consumed during individual operations of the cargo loading-unloading process. Graphs of the relationship between the amount of energy consumed and the lifted cargo mass for various lifting heights were constructed.

For the assessment of energy efficiency, a dimensionless quantity – the useful work performed by the crane when consuming 1 kWh of energy (η) – was introduced. Graphs of its relationship with the crane's utilization coefficient based on lifting capacity were constructed, and based on their analysis, some possible ways (certain recommendations) to improve the energy efficiency of the loading-unloading process were suggested.