

УДК 621.225:69.002.51

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.2.24

РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ СТВОРЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ БУДІВЕЛЬНО-ДОРОЖНІХ МАШИН

Хмара Л.А.¹, Холодов А.П.²

¹ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

***Анотація.** Розглянуто перспективні шляхи вдосконалення будівельно-дорожніх машин. Наведено порівняльні таблиці, що показують розподіл і витрати енергії різних машин у процесі їх експлуатації. Унаслідок аналізу наявних публікацій визначена мета роботи, а саме розроблення теорії створення енергоефективних будівельно-дорожніх машин формуванням гібридних приводів робочих органів і рушіїв з урахуванням наявних і перспективних методів підвищення паливної, екологічної ефективності та надійності машин. Запропоновано класифікацію способів підвищення ефективності БДМ.*

***Ключові слова:** енергоефективність, будівельно-дорожня машина, ККД, енергія, паливо, гібридний привід.*

Вступ

Значна частина робіт, які виконуються будівельно-дорожніми машинами (БДМ) здійснюється за умови високих витрат енергії, значна частка якої припадає на подолання сил опору та переміщення власних мас робочого обладнання. У цьому випадку механізм і обладнання машин відчувають циклічно мінливе навантаження під час виконання технологічних операцій. Крім того, у процесі експлуатації машин змінюються параметри робочого середовища, що призводить до підвищення динамічних навантажень у гідроприводі та нестабільності режимів експлуатації. Це призводить до збільшення питомих витрат на розроблення ґрунту, зменшення терміну служби та продуктивності СДМ, збільшення витрати палива і, як наслідок, зниження їх екологічності. Особливу важливість набувають дослідження процесу експлуатації СДМ з урахуванням системних зв'язків між силовою установкою, гідроприводом, робочим обладнанням та робочим середовищем з метою усунення непродуктивних витрат енергії. На основі чинних критеріїв енергоефективності та оптимальних режимів експлуатації машин, установлених з практичного досвіду, необхідно внести зміни в технологію проектування та створення машин з метою зниження втрат енергії за рахунок упровадження енергозберігаючих систем, приводів і технологій.

У зв'язку з цим особливої актуальності набувають розроблення й наукове обґрунтування нових методів і технічних рішень, загальної концепції створення енергоефектив-

них будівельно-дорожніх машин, що забезпечує підвищення ефективності робочого процесу БДМ.

Аналіз публікацій

Для того щоб спрогнозувати можливість зниження настановної потужності проектованої машини або впровадження тієї чи іншої енергозберігальної системи, необхідно проаналізувати умови роботи машини, характер розподілу потужності в її робочому циклі, тому що, працюючи в енергоємних режимах, механізми споживають велику кількість енергії, що виробляється силовою установкою, і лише незначна її частина витрачається на виконання корисної роботи в технологічному процесі.

Проблемам енергозбереження та енергоефективного керування технологічними процесами машин присвячені роботи В.М. Гене, Л.А. Хмари А.А. Лашенова, В.І. Баловнева, Т.В. Алексєєвої, Н.Г. Домбровського, В.В. Савінкіна, М. Klanfar, V. Kesojevic, D. Komljenovic та ін.

Мета і постановка завдання

Розроблення енергозберігального приводу (ЕП) є важливою науково-технічною концепцією, яка забезпечить підвищення продуктивності й ефективності роботи шляхом перетворення, накопичення енергії та перерозподілу потужності за елементами екскаватора відповідно до енергоємності виконуваних операцій.

Метою дослідження є створення теорії створення енергоефективних будівельно-

дорожніх машин формуванням гібридних приводів робочих органів і рушіїв з урахування наявних і перспективних методів підвищення паливної, екологічної ефективності та надійності машин

Дослідження енергоємності робочих процесів машин

На даний час гідрофіковані машини становлять 80 % від загальної кількості парку СДМ. За умови екскавації ґрунтового середовища робота гідроприводів протягом усьо-

го життєвого циклу становить 85 %. На виконання основних функціональних операцій від 50 % до 70 % припадає на роботу в умовах важких режимів навантаження. Землерийні машини характеризуються великою кількістю увімкнень силових гідродвигунів і елементів, які впливають на завантаження гідроприводу й динаміку її зміни. Таким чином, енергоємні операції становлять 50–70 % робочого часу машини та супроводжуються значною кількістю увімкнень гідроприводу (табл. 1)

Таблиця 1 – Доля роботи гідроприводів СДМ під навантаженням

Показник	Екскаватори	Бульдозери	Скрепери	Навантажувачі	Крани
Енергоємні операції	50–70 %	58–69 %	56–70 %	46–50 %	~ 50 %
Кількість увімкнень за зміну роботи	1250	1500	1200	900	1000

З іншого боку, виробники обладнання надають дані про витрату палива, пов'язані з широким спектром моделей конкретного обладнання [5, 6]. Це корисно, але менш універсально для розрахунку розмірів і вибору обладнання. Деякі інші джерела забезпечують питому витрату палива, що залежить від навантаження, який є погодинною витратою за умови робочого навантаження, приводить до потужності двигуна та виражений у л/(кВт·год). Останній можна розглядати як еквівалент коефіцієнта навантаження, оскільки він відтворює витрати в разі робочого навантаження. Це, однак, не забезпечує кошти для обліку відмінностей у щільності палива та ефективності двигуна під час оцінки споживання. Згадані дані про коефіцієнти навантаження доступні для широко використовуваного обладнання, такого як вантажівки, екскаватори, скрепери і бульдозери, але навряд чи їх можна знайти для гідравлічних молотів, сівалок для вибухових робіт або мобільних дробильних установок, грохотів і стрічкових конвеєрів. Тому корисно дати певне уявлення про ці чинники та їх діапазони

для цієї останньої групи обладнання, навіть якщо вони підходять для конкретного типу кар'єра.

Кілька джерел використовуються в цьому дослідженні, щоб порівняти їх з емпіричними даними.

Основний підхід в оцінці споживання палива полягає в припусканні питомої витрати палива відповідно до стану та типу двигуна. Потім застосовується номінальна потужність двигуна, відома з технічних характеристик обладнання, і в кінцевому підсумку визначається коефіцієнт навантаження конкретно для типу обладнання та умов застосування/експлуатації.

Знаючи ці цінності, витрату можна розрахувати, використовуючи таке рівняння:

$$Q_d = N \cdot k_{le} \cdot q_d, \quad (1)$$

де N – номінальна потужність двигуна (кВт); k_{le} – коефіцієнт навантаження двигуна; q_d – питома витрата палива, (кг/(кВт·год)).

Таблиця 2 – Дані про витрату палива та розрахункові коефіцієнти навантаження

Виробник і модель	Номінальна потужність, (кВт)	Витрата палива, (л/ч)	Витрата палива, залежно від навантаження, 1/(кВт·ч)	Розрахунковий коефіцієнт навантаження	Середній коефіцієнт навантаження
1	2	3	4	5	6
Екскаватори					
Hyundai R 200W - 7	114	8,87	0,078	0,301	0,30

Закінчення табл. 2

1	2	3	4	5	6
Liebherr R 944 C HD-S Litronic	190	32,52	0,171	0,661	0,56
Liebherr R 944 B HD-S Litronic	180	23,96	0,133	0,514	
Liebherr R 934 C HD-S Litronic	150	21,96	0,146	0,566	
Liebherr R 934 B HD-S Litronic	145	17,62	0,122	0,469	
Liebherr R 914 B Litronic	112	17,29	0,154	0,596	
Фронтальні навантажувачі					
Caterpillar 966 H	213	15,07	0,071	0,273	0,27
Caterpillar 966 H	213	14,59	0,068	0,265	
Liebherr L 576	205	16,43	0,080	0,310	
Liebherr L 576	205	14,50	0,071	0,273	
Liebherr L 576	205	13,96	0,068	0,263	
Liebherr 574	195	12,76	0,065	0,253	
Вантажні автомобілі					
Bell B40D	308	18,67	0,061	0,234	0,23
Bell B40D	308	18,78	0,061	0,236	
Terex TR45	370	22,74	0,061	0,237	
Бульдозер					
Komatsu D155 AX - 6	264	33,16	0,126	0,485	0,48
Свердло-вибухові свердловини					
Bohler BPI 155	125	19,96	0,160	0,616	0,61
Мобільні дробильні установки					
Locotrack LT 105 S	224	27,98	0,125	0,483	0,46
Locotrack LT 110S (челюсті)	310	36,26	0,117	0,452	
Locotrack LT 200 HP (конус)	310	31,04	0,100	0,387	0,38
Мобільні установки для просіювання					
Finly 393)	69	6,00	0,087	0,336	0,49
Chieftain 2100	74	15,00	0,203	0,783	
Posch FLEX RO – RO	149	8,49	0,057	0,220	
Warrior 1800	74	12,00	0,162	0,627	
Мобільний стрічковий конвеєр					
Telestack TK 421	28,8	3,90	0,135	0,523	0,52

Актуальність питання підвищення енергоефективності експлуатації машин обумовлює необхідність чіткої класифікації структуризації способів підвищення ефективності БДМ (рис. 1).

Запропонована класифікаційна схема описує підсистеми впливу в системі енергоефективної машини:

- об'єкт удосконалення/дослідження;
- вплив на стадіях життєвого циклу;
- види проведених заходів;

– результат дій (технічний результат).

У класифікаційній схемі докладно описані об'єкти впливу конструктивно-технологічних систем, які встановлюють роль і причинно-наслідкові зв'язки кожного заходу. Послідовність досягнутих результатів з урахуванням попередніх впливів описують «схему-алгоритм», на підставі якої можна формувати варіативні методики досягнення енергоефективності процесів.

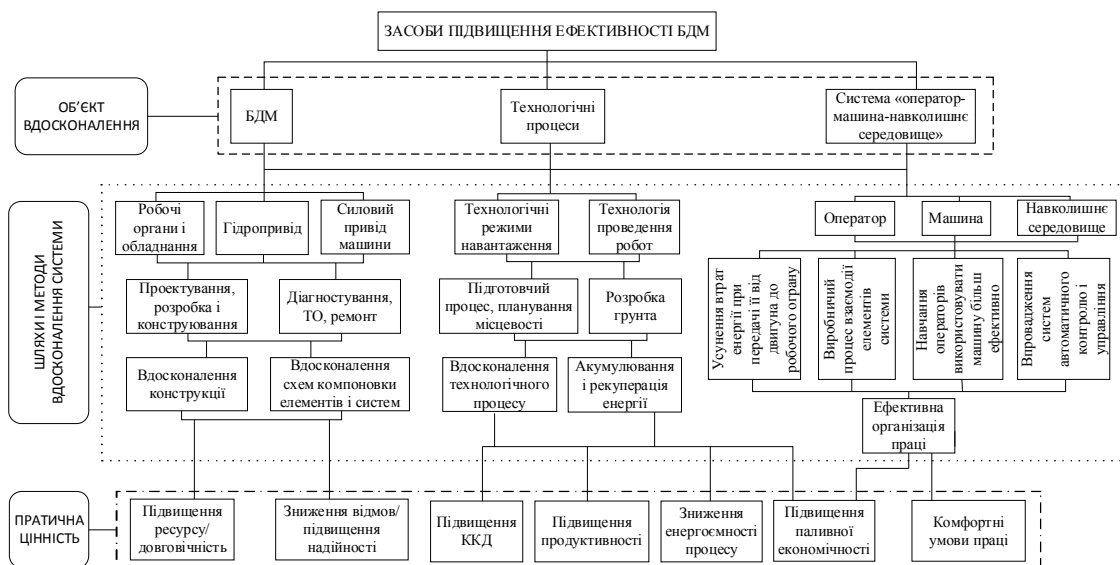


Рис. 1. Способи підвищення ефективності БДМ

Реалізація способів підвищення ефективності БДМ

Під час роботи автогрейдерів спостерігаються певні недоліки: недостатнє ущільнення ґрунту та низьку адаптивність ходової частини до ґрунтових умов.

У цьому випадку підвищення ефективності машини полягає в удосконаленні рушія автогрейдера, у якому наявність нових конструктивних елементів забезпечує підвищення ефективності процесу переміщення рушія за рахунок використання декількох балансирних підвісок з різними діаметрами пневмоколісних шин (рис. 2).

Визначене завдання вирішується тим, що автогрейдер, який містить самохідне шасі з рамою 1, балансир 10 з мостами 3, 4, 5, пневмоколісні шини 6, 7, 8, 9 різного діаметра, кабіну 14, грейдерний 15 та бульдозерний відвали 16, відповідно до корисної моделі, балансир 10, додатково оснащений балансирною рамою 11, у якій встановлена пара мостів 4 і 5, зокрема пневмоколісні шини 6, 7, 8, 9 кожного з послідовно встановлених мостів 2, 3, 4, 5 автогрейдера, починаючи від бульдозерного відвала 16, відповідають умові $D_1 < D_2 < D_1, D_3 < D_2, \dots, D_n < D_{n-1}$, де D_1, D_2, D_3, \dots – діаметри послідовно встановлених пневмоколісних шин від бульдозерного відвала 16 відповідно першої, другої та третьої; D_n – діаметр крайньої пневмоколісної шини, встановленої від бульдозерного відвала 16.

Для дослідження характеристик колеса на тягові характеристики автогрейдера створено 3D-модель і проведено віртуальні експериментальні дослідження. За прототип було взято шину для важкого автогрейдера Дз98 – Я-140, яка представлена на рис. 3.

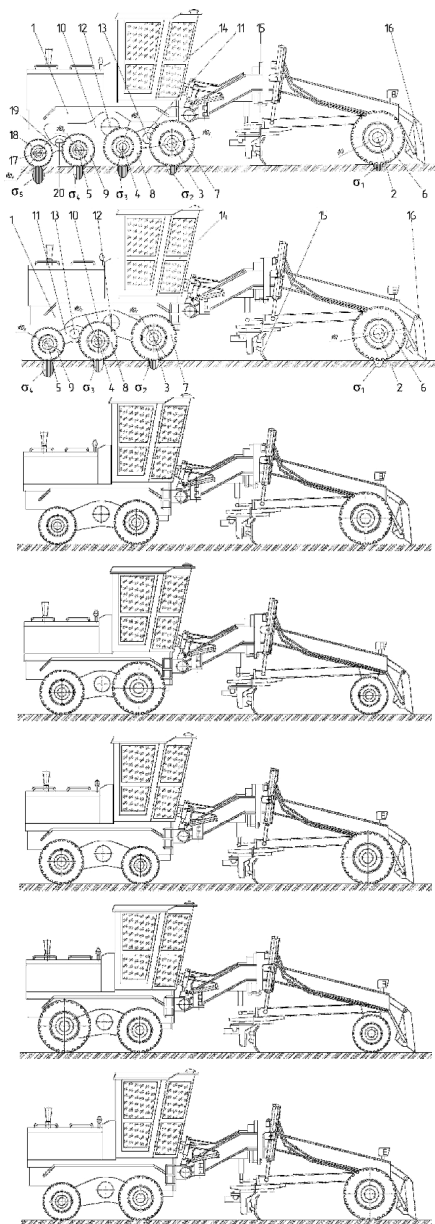


Рис. 2. Автогрейдери з удосконаленим рушієм

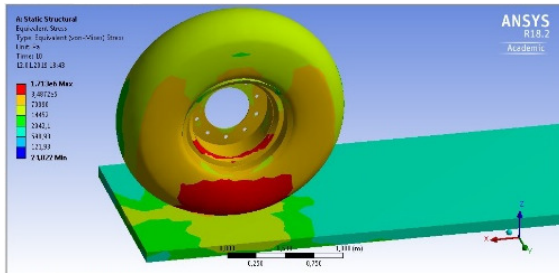


Рис. 3. Еквівалентні напруження в зоні контакту колеса

Удосконалення гідроакумулювальних систем БДМ можливе за рахунок установки керованих муфт між первинним двигуном гідронасоса, що дозволяють відключати його на недовантажених режимах роботи (рис. 4).

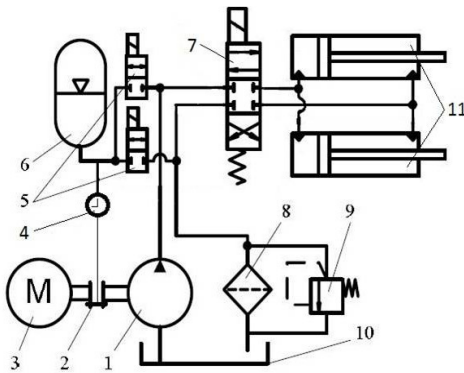


Рис. 4. Схема гідроакумулювальної системи з керованою муфтою: 1 – гідронасос; 2 – керована муфта зчеплення; 3 – ДВЗ; 4 – датчик тиску; 5 – гідророзподільники управління процесом зарядки-розрядки ГПА; 6 – гідропневмоаккумулятор; 7 – гідророзподільник; 8 – фільтр; 9 – запобіжний клапан; 10 – бак; 11 – гідроциліндри управління робочим обладнанням

Застосування керованої муфти в гідроакумулювальній системі дозволить знизити витрати енергії первинного двигуна, а отже, і витрату палива на холостих режимах роботи і на навантажених режимах з використанням гідроакумулювальної системи.

Пропонується система, що дозволяє регулювати температуру газової камери гідропневмоаккумулятора, що дає змогу збільшувати тиск залишкової робочої рідини (рис. 5).

Наведена схема працює таким чином: у момент коли в ГПА недостатній тиск для виконання робочих операцій, розподільна заслінка 7 перекриває потік вихлопних газів у вихлопну систему й направляє їх до теплообмінника 3, у теплообміннику вбудований

балон з газом азоту (N₂) 4, за умови зростання температури в балоні 4 газ розширюється і подається через трубопровід 5 у газову порожнину ГПА 6, таким чином тиск у робочій порожнині ГПА зростає, у разі досягнення номінального тиску в робочій порожнині ГПА регулююча заслінка перекриває потік вихлопних газів, що йдуть до теплообмінника, і направляє їх до вихлопної труби.

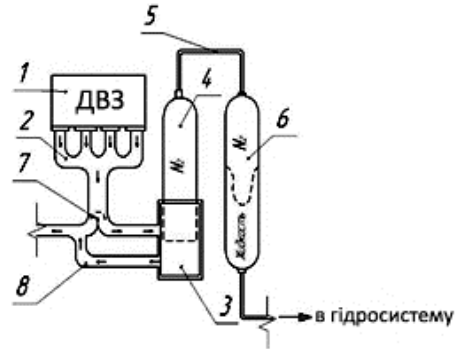


Рис. 5. Регулятор температури гідроакумулювальної системи: 1 – ДВЗ; 2 – вихлопний колектор; 3 – теплообмінник; 4 – балон з азотом; 5 – трубопровід; 6 – ГПА; 7 – розподільна заслінка; 8 – реверсивний патрубков

Для обґрунтування доцільності впровадження тих чи інших удосконалень, спрямованих на підвищення ефективності машини, доцільно застосовувати метод визначення ККД за техніко-економічними показниками (табл. 3).

Таблиця 3 – Комплекс ККД за техніко-економічними показниками

№ з/п	Найменування ККД	Формула ККД
1	ККД за корисною масою	$\eta_G = \frac{m_{гр}}{m_{общ}}$
2	ККД за корисним об'ємом	$\eta_q = \frac{q_k}{q_{маш}}$
3	ККД за витратою потужності	$\eta_N = \frac{N_{пл}}{N_{общ}}$
4	ККД за витратою палива	$\eta_f = \frac{Q_{пол}}{Q_{общ}}$
5	ККД за витраченим часом	$\eta_{Tц} = \frac{t_{пол}}{T_{ц}}$
6	ККД за витраченою роботою	$\eta_A = \frac{A_{пол}}{A_{общ}}$

Усі наведені вдосконалення сприяють досягненню номінальних значень потужності, використовуюваної на виконання корисної роботи й подолання сил опорів, величина якої характеризує енергоємність процесу та його економічний складник. Для обґрунтування граничних значень витраченої енергії приводу та двигуна не ефективно використовувати тільки технічний критерій унаслідок миттєвої і щодо незначної зміни цілого комплексу показників залежно від режимів навантаження і тривалості циклу робочого процесу. Оскільки ефективність роботи гідроприводу БДМ залежить від безлічі чинників і зумовлює довговічність елементів приводу, то гранично-допустиму мінімальну величину ефективності можна визначити, застосовуючи економічні критерії. Визначення економічних критеріїв є перспективним напрямом досліджень.

Висновки

1. У процесі аналітичних і декількох експериментальних досліджень встановлено енергоємності робочих процесів різних видів будівельно-дорожніх машин.

2. Представлені чинники навантаження та споживання палива на основі досліджень, наведених у посібниках Komatsu та Caterpillar, найбільш тісно збігаються з емпіричними даними для більшості БДМ. Можна припустити, що вони надають найточнішу оцінку у випадку різних операційних умови.

3. Представлено класифікацію способів підвищення ефективності БДМ.

4. Визначено передумови розроблення теорії створення енергоефективних будівельно-дорожніх машин формуванням гібридних приводів робочих органів і рушіїв з урахування наявних і перспективних методів підвищення паливної, екологічної ефективності та надійності машин.

Література

1. Кузнецова В.Н., Савинкин В.В. Исследование энергоэффективных параметров одноковшовых экскаваторов: монография. – Омск: СибАДИ, 2015. – 210 с.
2. Klanfar M., Korman T., Kujundžić T. Fuel consumption and engine load factors of equipment in quarrying of crushed stone // Tehnički vjesnik. – 2016. – 23, 1. – P. 163–169.
3. Kecojevic V., Komljenovic, D. Haul Truck Fuel Consumption and CO2 Emission under Various Engine Load Conditions // Mining Engineering. – 2010. – 62, 12. – P. 44–48.

4. Đukan P., Bosanac B., Mrvoš Lj., Paskojević A. Strojevi u građevinarstvu (Machines in Civil Engineering). Građevinar, Zagreb, 1991.
5. Komatsu. Specification & Application Handbook – edition 30, Komatsu Ltd, Tokyo, 2009.
6. Caterpillar. Caterpillar Performance Handbook - edition 40, Caterpillar Inc, Peoria, 2010.
7. Chitkara K.K. Construction Project Management, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1998.
8. Лашеных А.А., Пулин В.М., Тыщенко Ю.И. Влияние энергетических показателей на эффективность транспортных и погрузочно-разгрузочных машин // Промышленный транспорт. – 1978. – № 5. – С. 12.
9. Гене В.М. О повышении энергетической эффективности строительных машин // Известия вузов МВ и ССО. Сер. «Строительство и архитектура», 1966. – № 9. – С. 141–145.
10. Хмара Л.А., Холодов А.П. Энергоэффективные машины для земляных работ. – Харьков: ФОП Бровин О.В., 2016. – 142 с.
11. Sabisch M., Kishan S., DeFries T. et al. Development of Emission Factors, Load Factors, Duty Cycles and Activity Estimates from Nonroad PEMS study // CE-CERT PEMS Conference / Riverside, 2013.

References

1. Kuznetsova V.N., Savinkin V.V. Issledovanie energoeffektivnyih parametrov odnokovshovyih ekskavatorov: monografiya. – Omsk: SibADI, 2015. – 210 s.
2. Klanfar M., Korman T., Kujundžić T. Fuel consumption and engine load factors of equipment in quarrying of crushed stone // Tehnički vjesnik. – 2016. – 23, 1. – P. 163–169.
3. Kecojevic V., Komljenovic, D. Haul Truck Fuel Consumption and CO2 Emission under Various Engine Load Conditions // Mining Engineering. – 2010. – 62, 12. – P. 44–48.
4. Đukan P., Bosanac B., Mrvoš Lj., Paskojević A. Strojevi u građevinarstvu (Machines in Civil Engineering). Građevinar, Zagreb, 1991.
5. Komatsu. Specification & Application Handbook – edition 30, Komatsu Ltd, Tokyo, 2009.
6. Caterpillar. Caterpillar Performance Handbook - edition 40, Caterpillar Inc, Peoria, 2010.
7. Chitkara K.K. Construction Project Management, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 1998.
8. Laschenyih A.A., Pulin V.M., Tyischenko Yu.I. Vliyanie energeticheskikh pokazateley na effektivnost transportnyih i pogruzochno razgruzochnyih mashin // «Promyishlennyiy transport». – 1978. – № 5. – S. 12.
9. Gene V.M. O povyishenii energeticheskoy effektivnosti stroitelnyih mashin. // Izvestiya vuzov

- MV i SSO. Ser. «Stroitelstvo i arhitektura». – 1966. – № 9. – S. 141–145.
10. Khmara L.A., Kholodov A.P. *Energoeffektivnyie mashinyi dlya zemlyanyih rabot.* – Har'kov: FOP Brovin O.V., 2016. – 142 s.
11. Sabisch M., Kishan S., DeFries T. et al. *Development of Emission Factors, Load Factors, Duty Cycles and Activity Estimates from Nonroad PEMS study // CE-CERT PEMS Conference / Riverside, 2013.*

Хмара Леонід Андрійович, д.т.н., проф.,
+38 (093) 267-03-86, leonidkKhmara@yahoo.com,
Державний вищий навчальний заклад
«Придніпровська державна академія будівництва
та архітектури»,

Холодов Антон Павлович, к.т.н., доц.,
+380502063644, antonkholodov23@gmail.com.

Development of scientific foundations for creation of energy efficient construction and road machines

Abstract. *Prospective ways of improving road-building machines are considered. Comparative tables of distribution and energy consumption of different machines during their operation are presented. The analysis of existing publications aims at developing the theory of creating energy-efficient construction and road machines by forming hybrid drives of work equipment and motors, according to existing and promising methods of improving fuel consumption, environmental efficiency and reliability of machines. The classification of ways to improve the efficiency of the road-building is offered.*

Key words: *energy efficiency, road-building machine, efficiency, energy, fuel, hybrid drive.*

Khmara Leonid, *Dr. Sc.(Tech.)*, Professor,
tel. +38 (093) 267-03-86,
e-mail: leonidkKhmara@yahoo.com, State Higher Education Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-A, Chernishevskogo str., Dnipro 49600, Ukraine,
Kholodov Anton, PhD, Associate Professor,
tel.+380502063644, antonkholodov23@gmail.com.

Развитие научных основ создания энергоэффективных строительно-дорожных машин

Аннотация. *Рассмотрены перспективные пути совершенствования строительно-дорожных машин. Приведены сравнительные таблицы, показывающие распределение и расход энергии различных машин в процессе их эксплуатации. В результате анализа имеющихся публикаций поставлена цель работы, а именно разработка теории создания энергоэффективных строительно-дорожных машин формированием гибридных приводов рабочих органов и движителей с учетом существующих и перспективных методов повышения топливной, экологической эффективности и надежности машин. Предложена классификация способов повышения эффективности БДМ.*

Ключевые слова: *энергоэффективность, строительно-дорожная машина, КПД, энергия, топливо, гибридный привод.*

Хмара Леонід Андреевич, д.т.н., проф.,
+38 (093) 267-03-86, leonidkhmara@yahoo.com,
Государственное высшее учебное заведение
«Приднепровская государственная академия
строительства и архитектуры»,
ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепр, Украина,
Холодов Антон Павлович, к.т.н., доц.,
+380502063644, antonkholodov23@gmail.com