

Хабутдінов Р.А.

Національний транспортний університет

Федоренко І.О.

Національний транспортний університет

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОКАЗНИКІВ ТРАНСПОРТНОЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АВТОБУСА ДЛЯ МІСЬКИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Пріоритетним напрямом розвитку міських пасажирських перевезень є оновлення рухомого складу. Велика капіталоємність інвестиційних проектів, різноманіття конструктивно-технічних особливостей сучасних автобусів, високі рівні енергоємності та ресурсоємності автобусних перевезень на міських маршрутах, величини яких суттєво залежать від значень кількості пасажирів в автобусі, зумовлюють актуальність техніко-технологічного підходу і нових методів обґрунтування міських автобусів, які відповідають концепції експлуатаційно-технологічного енергозбереження на автотранспорті.

Наукова новизна полягає у застосуванні моделі транспортно-технологічної операції автобусних перевезень на заміну від транспозиційної за схемою віртуального руху автобуса з технічною швидкістю. Практичне значення для транспортних підприємств полягає в реалізації концепції експлуатаційно-технологічного енергозбереження в автобусних перевезеннях з урахуванням конструктивних факторів, дорожніх умов тощо. Основною метою статті є встановлення закономірностей зміни показників транспортної енергоефективності автобуса на міських маршрутах від впливу різних факторів (довжини перегону між зупинками, максимальної потужності двигуна автобуса, коефіцієнта статичного використання його пасажиромісткості). Установлено актуальність комплексного підвищення транспортної енергоефективності міських автобусних перевезень з урахуванням концепції експлуатаційно-технологічного енергозбереження. Установлено залежності комплексу показників транспортної енергоефективності автобуса від довжини перегону, коефіцієнта статичного використання пасажиромісткості, максимальної потужності двигуна. У роботі пропонується новий підхід і метод моделювання транспортно-технологічної операції автобусних перевезень, за допомогою яких отримано математичні та графічні залежності, що дозволяють ухвалювати більш обґрунтовані рішення під час оновлення автобусів за концепцією експлуатаційно-технологічного енергозбереження. Проведено аналіз техніко-експлуатаційних властивостей і транспортної енергоефективності автобуса для міських пасажирських перевезень на прикладі автобуса Богдан А70132.

Ключові слова: автобус, автотранспортний процес, транспортно-технологічна операція, транспортна енергоефективність, паливна енергоефективність, міські пасажирські перевезення.

Постановка проблеми. У загальному обсязі автомобільних пасажирських перевезень частка міських перевезень в Україні становить приблизно 82%, приміських – 15%, міжміських – 3%, міжнародних – 0,002%. Міські автобуси щодня проїжджають по 200–250 км. Наявний парк міських автобусів характеризується високим рівнем фізичного та морального зношення, що зумовлює необхідність прискореного його оновлення з використанням нових методів аналізу придатності автобусів до енергозберігальних технологій перевезень і до концепції експлуатаційно-технологічного енергозбереження на автотранспорті [1; 11].

Такі методи базуються на теорії енергоресурсної ефективності автотранспортних засобів, технологій і процесів, яка розроблена на кафедрі транспорт-

них технологій НТУ [1; 8; 11]. Для оцінки техніко-технологічного рівня автобусів пропонується використовувати комплекс безрозмірних показників транспортної енергоефективності автобуса. Застосовується новий метод імітаційного моделювання функціонування автобуса як ресурсо-технологічного засобу виробництва автотранспортної послуги з використанням математичних моделей його адаптивно-дискретної кінематики, динаміки та енергетики в міських тестових операціях різної довжини.

Наявні методи обґрунтування оновлення парку автобусів [2; 3; 4; 5; 7] не відповідають вищезгаданій концепції технологічно-інноваційного енергозбереження на автотранспорті [11].

На цьому етапі розвитку перевезень виникає проблема вибору автобусів для здійснення

міських пасажирських перевезень із метою оновлення рухомого складу з урахуванням великої кількості виробників транспортних засобів, типів автобусів та їх конструкцій. У наявних методах вибору автобуса та вдосконалення організації автобусних перевезень [2; 3; 4; 5; 6; 7] розглядається схема віртуального переміщення пасажирів (рух автобуса між зупинками), причому враховуються лише факти відправлення та прибуття на зупиночний пункт (далі – ЗП). Рух вважається сталим (із певною технічною швидкістю). Робота виконана в межах кафедральної науково-дослідної роботи на тему «Теоретичні основи транспортно-технологічних енергозберігальних процесів» (Національний транспортний університет, номер державної реєстрації – 0121U110243, 2017-2022 р.), а також положень Національної транспортної стратегії України до 2030 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30.03.2018 р. № 430-р, ст. 3 Закону України «Про енергозбереження» від 01.07.1994 р. № 74/94-ВР.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У теоріях транспортної економіки й організації автомобільних перевезень [4; 5; 6; 7; 8] знання про транспортний процес формуються на основі суто емпіричного підходу і двох принципів:

а) підміни схеми транспортної операції схемою віртуальної транспозиційної операції;

б) незмінності параметрів автомобілів і транспортних технологій (принцип FUT – Freezing Undescribed Technology).

Завдяки цим принципам у названих теоріях відсутній науковий опис виробничої сутності машинних процедур та процесів автотранспортних технологій. Крім того, відсутня можливість теоретичного аналізу впливу техніко-технологічних новацій на транспортну енергоефективність нових автобусів як носіїв технічних ресурсів автотранспорту. У математичних моделях для аналізу собівартості пасажирських перевезень урахується тільки один параметр автобуса – його пасажиромісткість (тобто розглядається найпростіший перевізний засіб – кузов) [3; 5; 6; 7]. Згідно з методикою економічного аналізу в цих моделях враховуються тільки попередні експлуатаційні витрати [4]. Тому відома модель собівартості перевезень не є придатною для технологічного прогнозування транспортної енергоефективності автобусів. Зважаючи на це, можна зробити висновок, що наявні методи аналізу продуктивності автобуса і собівартості перевезень мають такі недоліки:

а) виходять із моделі транспозиційної операції, в яку закладена схема віртуального транспортування пасажирів;

б) не враховують параметрів енергетики автобуса й автотранспортних технологій, тому є техно-емпіричними;

в) непридатні для технологічного прогнозу й аналізу транспортної енергоефективності нових автобусів.

Постановка завдання. Метою роботи є встановлення закономірностей впливу показників транспортної енергоефективності від довжини перегону, зміни потужності двигуна, зміни коефіцієнта статичного використання пасажиромісткості для автобуса, що здійснює міські пасажирські перевезення. Для її досягнення необхідно виконати такі завдання:

1) проаналізувати вплив довжини перегону на техніко-експлуатаційні характеристики та транспортну енергоефективність автобуса;

2) здійснити аналіз впливу зміни потужності двигуна автобуса залежно від довжини перегону;

3) провести аналіз зміни коефіцієнта статичного використання пасажиромісткості залежно від довжини перегону.

Виклад основного матеріалу дослідження. Згідно з наявним організаційним (нетехнологічним) підходом [6] в організації автобусних перевезень використовується схема транспозиційної операції з урахуванням лише Пп, Пв (подій прибуття та відправлення автобусів) та Ті, Ті+1 (зупинки) (рис. 1).

Пропонується використовувати схему транспортно-технологічної операції [11; 12] (рис. 2). Схема передбачає, що до транспортної операції залучається складний носій технологічних ресурсів із комплексом властивостей (автомобіль як складна транспортна машина, автомобіль як перевізний засіб, автомобіль як складний об'єкт керування рухом тощо). При цьому враховується адаптивно-дискретний рух автобуса [13].

Позначення на рисунку: R_{tx} – технологічні ресурси автотранспорту (сукупність технічних R_t , енергетичних R_e , трудових ресурсів R_{tr}); M_p – кількість пасажирів, яких перевозять; Пп, Пв – події прибуття та відправлення автобуса із зупинки; Ті, Ті+1 – транспортні термінали (зупинки); КТТ2 – другий компонент транспортних технологій (матеріальний і виробничо-процедурний); ERW – процес енергетичного перетворення ресурсів у фізичний продукт транспорту; W_f – фізичний продукт транспорту, $-\Delta E$ – витрати енергії в транспортно-технологічній операції.

Використовуючи математичні моделі транспортної енергоефективності автомобіля узагальненого вигляду й узагальнену модель

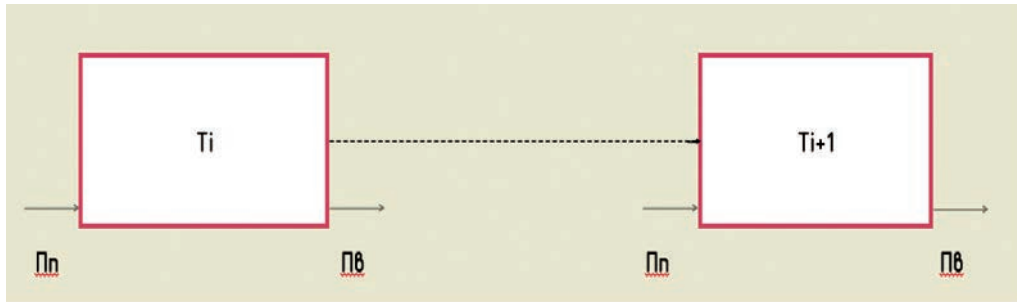


Рис. 1. Схема транспозиційної операції між i-ми автобусними ЗП

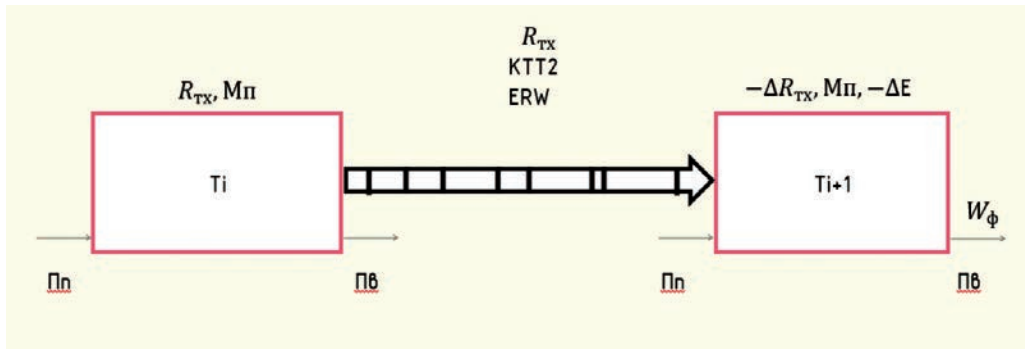


Рис. 2. Схема транспортно-технологічної операції

транспортної операції, [1; 8; 11], розглянуто схему адаптивно-дискретного руху автобуса між зупинками «мінімальна постійна швидкість – розгін – адаптивна постійна швидкість – службове гальмування» у міській тестовій операції з несталими режимами функціонування (з урахуванням зміни довжини перегону в діапазоні 200–2 600 м із кроком 400). Представлена основна формула ресурсовіддачі (1.1), що враховує весь процес адаптивно-дискретного руху. Загальні вирішення моделей транспортної енергоефективності автомобіля узагальненого типу отримано в роботі [1]. У цій статті були використані ці рішення й адаптовані для завдань формування математичних моделей автобусної тестової операції.

$$\rho_e = \frac{q \times \gamma_{cm} \times \sum_1^{n\phi} L_i}{\sum_1^{n\phi} E_i(V_i, +\Delta V_i, -\Delta V_i, K_{jr})} \quad (1.1)$$

де q – вантажність автобуса, т; γ_{cm} – коефіцієнт статичного використання пасажиромісткості автобуса; $\bullet L_i$ – сумарна довжина перегонів циклу, м ($n\phi$ – число фаз циклу); $\sum_1^{n\phi} E_i(V_i, +\Delta V_i, -\Delta V_i, K_{jr})$ – сумарні енергетичні витрати (V_i – швидкість на i -й ділянці, км/год; $+\Delta V_i, -\Delta V_i$ – приріст та зменшення швидкості на i -й ділянці, км/год; K_{jr} – коригувальний коефіцієнт: j – індекс класу автобуса, r – різновид конструкції кожного класу).

Проведено аналіз впливу довжини перегону на техніко-експлуатаційні характеристики та транспортну енергоефективність на прикладі автобуса Богдан А70132. Проаналізовано вплив зміни максимальної потужності двигуна автобуса, зміни коефіцієнта статичного використання пасажиромісткості залежно від довжини перегону (200 м, 700 м, 2 600 м) в умовах циклічного руху між зупинками. Згідно з теорією транспортної енергоефективності [1; 14] враховують такі показники функціонування автобуса, як сумарні рухові енергетичні витрати автобуса у разі його циклічного руху (A_c), загальна витрата палива (Q_c), тривалість руху між зупинками (T_c), показник транспортної результативності машинних процедур автобуса під час його розгону як технологічного засобу транспортування пасажирів (TB), енергетичний коефіцієнт пробігу (UI_c), паливний коефіцієнт пробігу (UIQ_c), коефіцієнт швидкості (K_{vc}), транспортна енергоефективність (Per), паливна ефективність ($Perq$), рух у несталих режимах (K_{tn}).

На рис. 3 представлена залежність сумарних енергетичних витрат автобуса (A_c) від довжини перегону (l_c). Вона має лінійний зростальний характер. Так, під час зміни довжини перегону від 200 м до 2 600 м величина збільшується на 330%. Такий же вид мають графічні залежності таких показників, як загальна витрата палива (Q_c) та тривалість руху між зупинками (T_c).

Показник результативності технологічного впливу автотранспортного засобу під час розгону (ТВ) (1.2) [1; 8] від довжини перегону має гіперболічну залежність із максимальним значенням 4,698 під час довжини перегону 200 м, але зі зростанням довжини перегону різко спадає (600 м – 1,796; 2600 м – 0,418), що представлено на рисунку 4.

Величина показника транспортної результативності машинних процедур автобуса під час його розгону як технологічного засобу транспортування пасажирів:

$$T_{ei} = \frac{q * \gamma_{cm} * V_{ci}}{g * P_{ci} * (t_i + t_{nep})} \quad (1.2)$$

$q\gamma_{cm}$ – маса пасажирів в автобусі, кг ($\gamma_{cm} = 1$)

V_{ci} – середня швидкість за передачами, м/с

P_{ci} – середня сила тяги за передачами, кгс

t_i – час розгону за передачами, с

t_{nep} – час переключання передач, с ($t_{nep} = 2c$)

Енергетичний та паливний коефіцієнти пробігу зменшуються зі збільшенням довжини перегону. Графік представлено на рисунку 5.

Як видно з рисунків 4, 5, показники, що досліджуються, різко знижуються за довжини перегону 600 м. Зворотна ситуація спостерігається під час аналізу коефіцієнта швидкості, енергоефективності та паливної енергоефективності (рис. 6), значення цих показників різко збільшуються.

Аналіз зміни потужності двигуна (Nm) у діапазоні 80%, 100%, 130% заданої потужності показав, що зі зміною довжини перегону (l_c) в діапазоні 200–2 600 (200 – мінімальна, 700 – середня, 2 600 – максимальна) сумарні енергетичні витрати (A_c) та загальна витрати палива (Q_c) для $l_c = 200$ і $l_c = 700$ зростають лінійно, при цьому за $l_c = 2600$ зростання відбувається стрімко і A_c збільшується на 25,22%, Q_c – на 41% (рис. 7, рис. 8). При цьому зростання сумарних енергетичних витрат (A_c) та загальної витрати палива (Q_c) також спостерігається під час збільшення довжини перегону від 700 до максимальних 2 600 м за умов потужності двигуна 264 к.с., а саме: Q_c зростає на 281% порівняно з Q_c за $l_c = 700$, A_c зростає на 223% порівняно з A_c за $l_c = 700$.

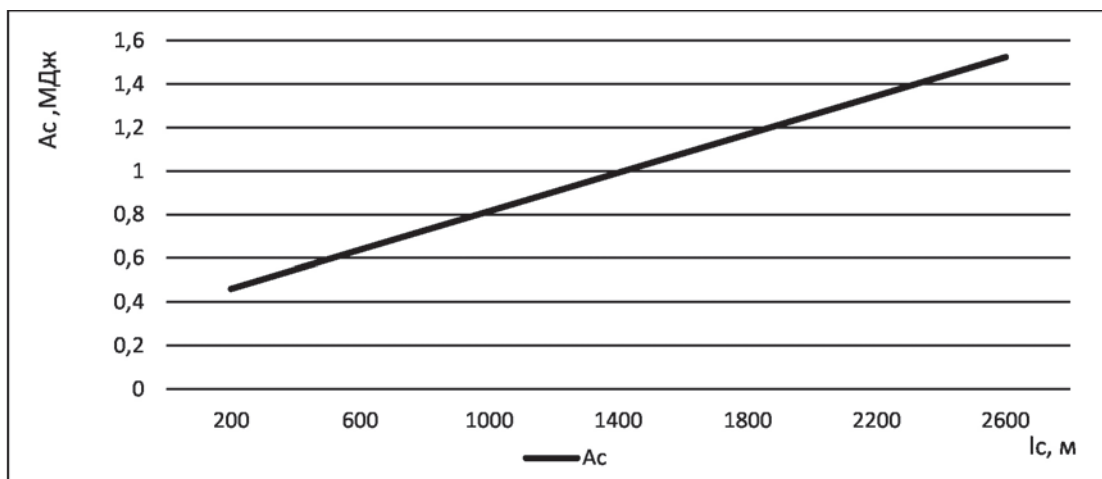


Рис. 3. Залежність сумарних енергетичних (A_c) витрат від довжини перегону (l_c)

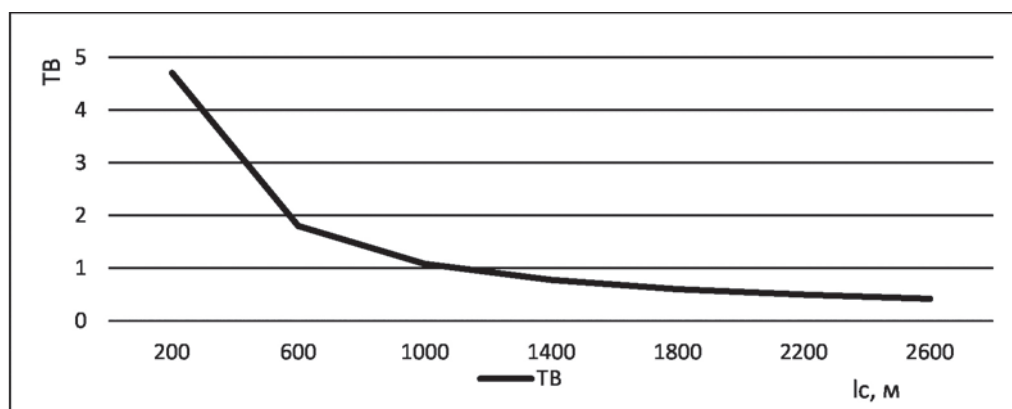


Рис. 4. Залежність показника результативності технологічних впливів (ТВ) під час розгону від довжини перегону (l_c)

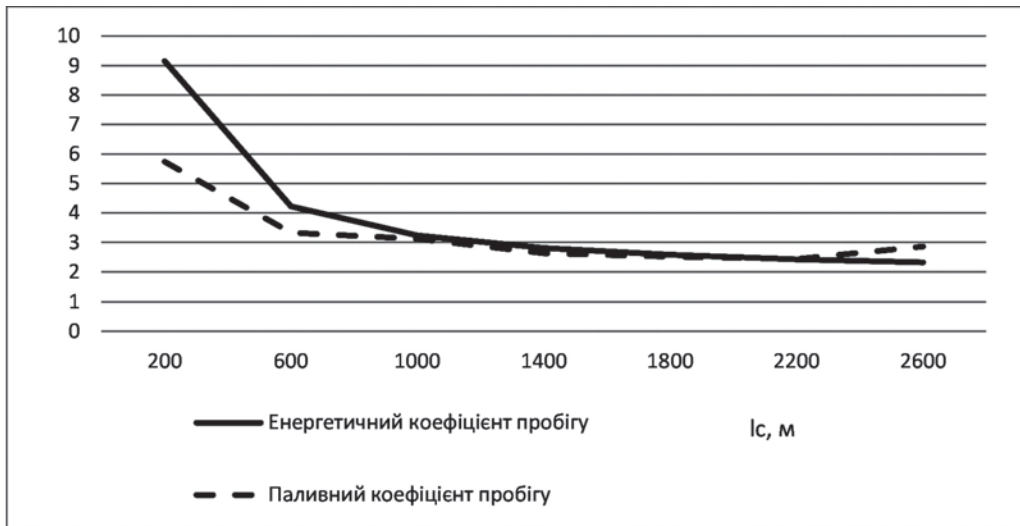


Рис. 5. Залежність енергетичного (UІс) та паливного коефіцієнтів пробігу (UІQс) автобуса від довжини перегону (lс)

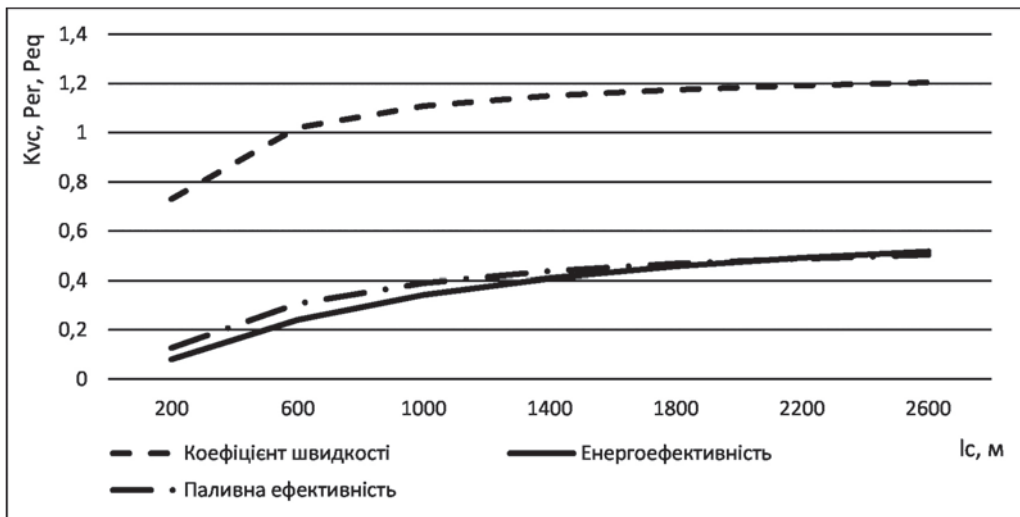


Рис. 6. Залежність коефіцієнта швидкості (Kvc), транспортної енергоефективності (Per) та паливної ефективності (Req) від довжини перегону (lс)

Аналіз зміни показника статичного використання пасажиромісткості (γ_{cm}) у діапазоні 0,2–1 під час довжини перегону 700 м показує, що сумарні рухові енергетичні витрати автобуса за умов його циклічного руху (A_c), загальна витрата палива (Q_c), тривалість руху між зупинками (T_c), показник транспортної результативності машинних процедур автобуса під час його розгону як технологічного засобу транспортування пасажирів (T_B), транспортна енергетична ефективність (Per), паливна енергоефективність (Req), рух у несталих режимах (Ktn) мають лінійну залежність та зростають зі збільшенням γ_{cm} (рис. 9). При цьому енергетична ефективність зростає на 12,5%, паливна – на 17,12%.

Для енергетичного коефіцієнта пробігу (UІс), паливного коефіцієнта пробігу (UІQс) і коефіцієнта

швидкості (Kvc) спостерігається зворотна залежність: зі збільшенням коефіцієнта статичного використання пасажиромісткості UІс зменшується на 10,9%, UІQс – на 17,3%, Kvc – на 0,15% (рис. 10).

Висновки. Установлено актуальність комплексного підвищення транспортної енергоефективності міських автобусних перевезень з урахуванням концепції експлуатаційно-технологічного енергозбереження та запропоновано комплекс показників для математичного моделювання й аналізу техніко-експлуатаційних властивостей і енергоефективності автобуса.

Проаналізовано на прикладі автобуса Богдан А70132 вплив довжини перегону на техніко-експлуатаційні характеристики та енергоефективність автобуса. Установлено, що за умов довжини

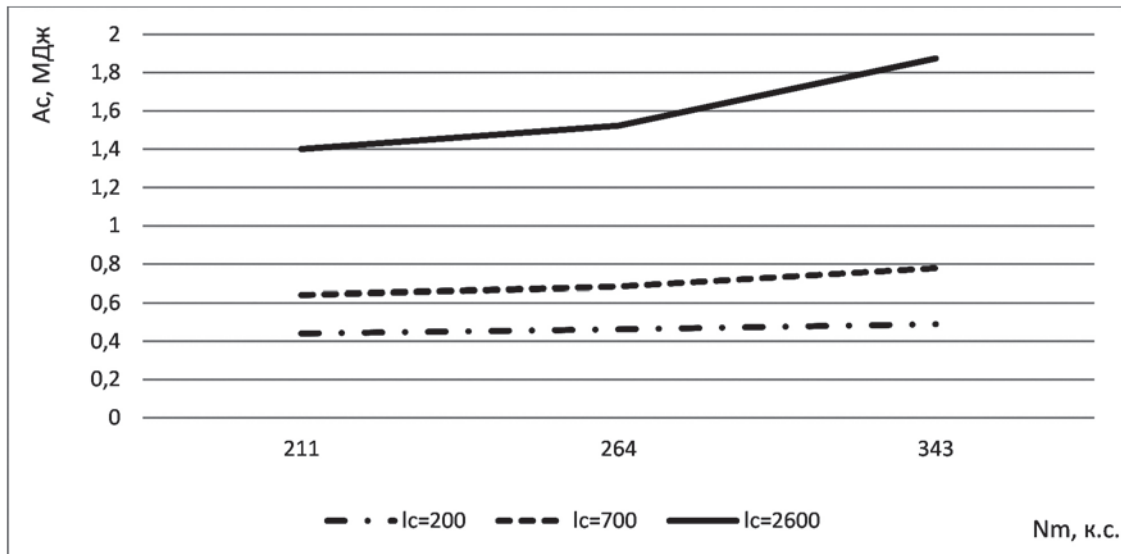


Рис. 7. Залежність сумарних енергетичних витрат (A_c) від потужності двигуна (N_m) під час зміни довжини перегону (l_c)

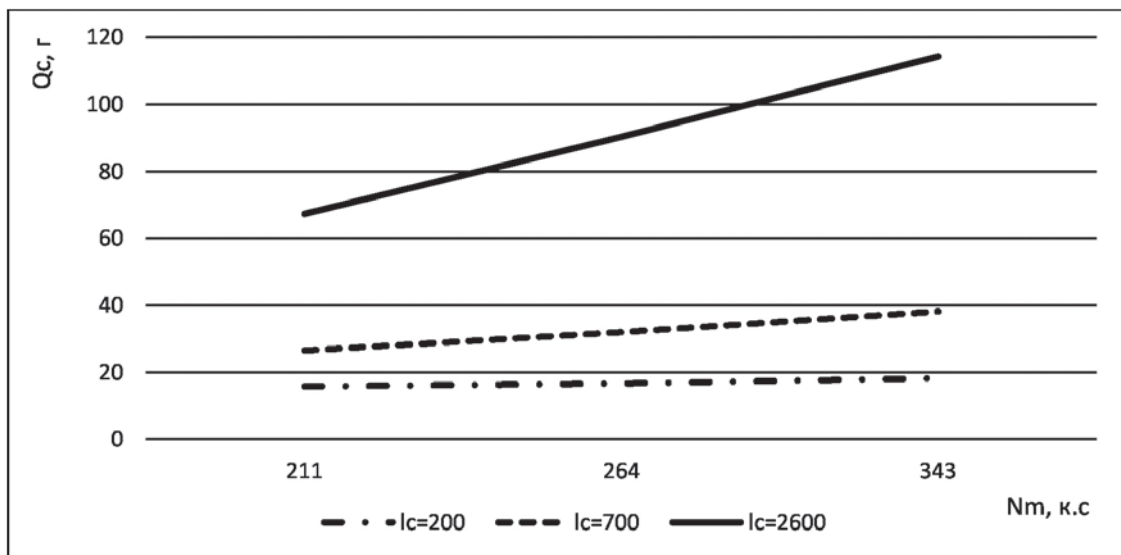


Рис. 8. Залежність загальної витрати палива (Q_c) від потужності двигуна (N_m) під час зміни довжини перегону (l_c)

перегону 600 метрів відбувається різка зміна характеру залежності для низки показників.

Аналіз впливу зміни потужності двигуна автобуса залежно від довжини перегону показав, що зі збільшенням довжини перегону відбувається зростання сумарних енергетичних витрат та загальної витрати палива на 281% та 223% відповідно.

Проведено аналіз зміни коефіцієнта статичного використання пасажиромісткості залежно від довжини перегону. Установлено, що показники поділяються на ті, що зростають зі збільшенням коефіцієнта статичного використання пасажиромісткості (сумарні енергетичні витрати, сумарні витрати

палива, тривалість часу руху між зупинками, показник результативності технологічних впливів під час розгону, енергетична ефективність, паливна енергоефективність, рух у несталих режимах), і ті, що спадають (енергетичний коефіцієнт пробігу, паливний коефіцієнт пробігу, коефіцієнт швидкості).

Установлено графічні залежності комплексу показників транспортної енергоефективності від важливих техніко-експлуатаційних факторів

Подальші дослідження планується проводити для пошуку закономірностей впливу техніко-експлуатаційних характеристик та транспортної енергоефективності для автобусів іноземного виробництва та електробусів.

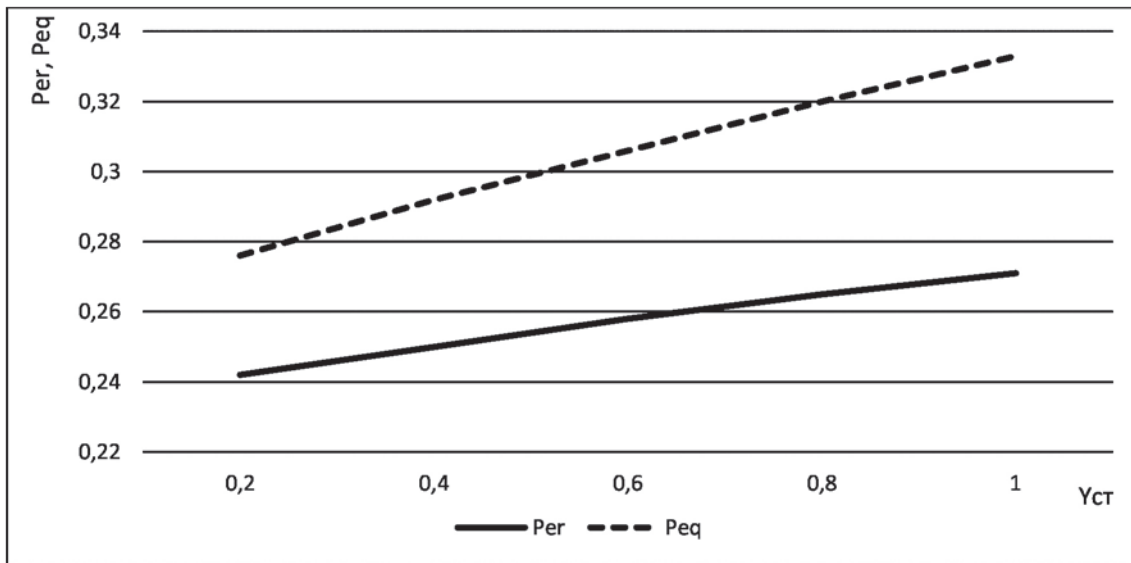


Рис. 9. Залежність транспортної енергетичної ефективності (Per) та паливної енергоефективності (Peq) від показника статичного використання пасажиромісткості $\gamma_{ст}$.

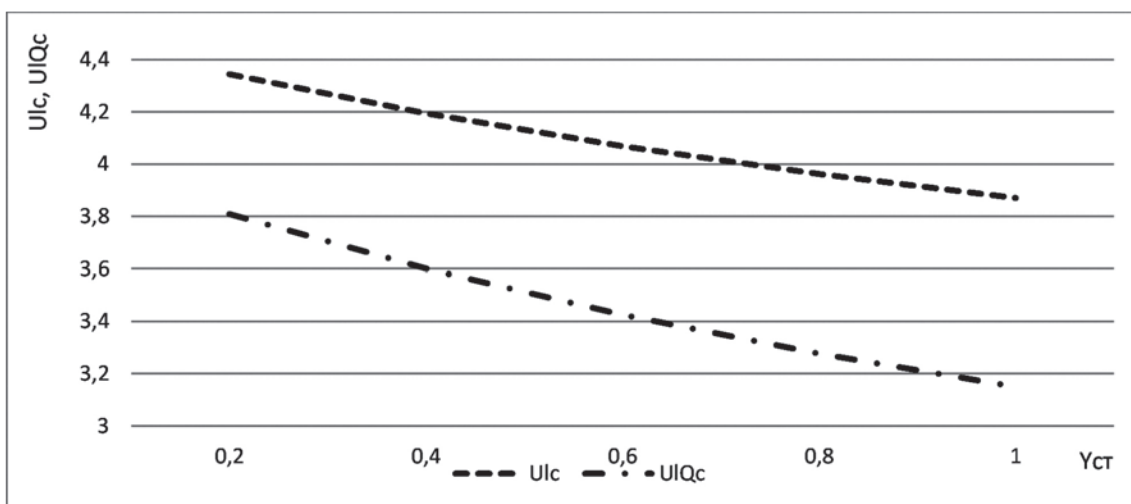


Рис. 10. Залежність енергетичного коефіцієнта пробігу (Ulc) і паливного коефіцієнта пробігу ($UIQc$) від коефіцієнта статичного використання пасажиромісткості $\gamma_{ст}$.

Список літератури:

- Хабутдінов Р.А. Системне формування технологій автомобільних перевезень за критеріями енерго- і ресурсовіддачі : дис. ... докт. техн. Наук : 05.22.01. Київ, 2003. 332 с.
- Тхорук Є.І., Кучер О.О. Визначення оптимального терміну використання автомобільного транспортного засобу як параметра системи оновлення парку рухомого складу. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2016. Вип. 55. С. 412–417.
- Вакуленко К.Є., Доля К.В. Управління міським пасажирським транспортом : навч. посібник; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2015. 257 с. ISBN 978-966-695-382-0 URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/33759816.pdf>
- Экономика транспорта : учебник и практикум для академического бакалавриата / Е. В. Будрина и др.; под редакцией Е. В. Будриной. Москва : Издательство Юрайт, 2018. 366 с.
- Організація та управління пасажирськими перевезеннями: підручник / Маруніч В.С., Шморгуна Л.Г. та ін.; за ред. доц. В.С. Маруніч, проф. Л.Г. Шморгуна. Київ : Міленіум, 2017. 528 с. ISBN 978-966-8063-80-1
- Ігнатенко О.С., Маруніч В.С. Пасажирські перевезення. Київ : НТУ, 2017. 265 с.

7. Верелопуло Г.А. Организация движения и перевозок на городском пассажирском транспорте. Москва : Транспорт, 2009. 267 с.

8. Хабутдінов Р.А., Коцюк О.Я. Енергоресурсна ефективність автомобіля, Київ : УТУ. 1997. 197 с.

9. Піцик М.Г. Підвищення транспортної енергоефективності міських пасажирських автобусних перевезень : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01. Київ, 2020. 20 с.

10. Піцик М.Г., Хабутдінов Р.А. Аналіз експлуатаційно-технологічних характеристик міських автобусів. *Вісник Національного транспортного університету*. 2008. № 17. С. 160–163.

11. Хабутдінов Р.А. Системна концепція енергоресурсної синергії та методологія технологічно-інноваційного управління на автотранспорті / Р.А. Хабутдінов. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник*. Київ : НТУ, 2020. Вип. 1 (46). DOI: 10.33744/2308-6645-2020-1-46-365-374.

Khabutdinov R.A., Fedorenko I.O. ANALYSIS OF THE IMPACT OF TRANSPORT ENERGY EFFICIENCY INDICATORS OF THE BUS FOR URBAN PASSENGER TRANSPORTATION

The priority area for the development of urban passenger transportation is the renewal of the rolling stock. High capital intensity of investment projects, variety of constructive and technical peculiarities of modern buses, high levels of energy and resource intensity of urban passenger transportation, the values of which greatly depend on the number of passengers in the bus, make technical and technological approach and new methods of urban buses justification, which correspond to the concept of operational and technological energy saving on the motor transport. Scientific novelty consists in application of transport-technological operation model of bus transportation to replace the existing one by the scheme of virtual bus traffic with technical speed. Practical significance for transport enterprises lies in the implementation of the concept of operational and technological energy saving in bus transportation taking into account the design factors, road conditions etc. The main objective of the article is to establish the regularities in changes of transport energy efficiency indicators of buses on the city routes, influenced by different factors (length of the route between bus stops, maximum bus engine power, coefficient of static use of its passenger capacity). The urgency of the comprehensive improvement of transport energy efficiency of urban bus transportation, taking into account the concept of operational and technological energy conservation. The dependence of the complex of indicators of the transport energy efficiency of buses on the length of the route, the coefficient of the static use of the passenger capacity, the maximum power of the engine have been determined. The paper proposes a new approach and method for modeling the transport and technological operation of bus transportation, with the help of which mathematical and graphical dependences are obtained, which allow to make more justified decisions when upgrading the buses according to the concept of operational and technological energy saving. The analysis of technical-operational properties and transport energy efficiency of the bus for urban passenger transportation on the example of the Bogdan A70132 bus is performed.

Key words: bus, motor transport process, transport technological operation, transport energy efficiency, fuel energy efficiency, urban passenger transportation.