

О.М. ПИЛИПЕНКО, О.В. БАТРАЧЕНКО

Черкаський державний технологічний університет

І.М. ЛИТОВЧЕНКО

Національний університет харчових технологій

## ОБҐРУНТУВАННЯ НОВОГО СПОСОБУ ЗМЕНШЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНОГО ОПОРУ СІДЕЛЬНИХ АВТОПОТЯГІВ

Запропоновано новий спосіб зменшення аеродинамічного опору сідельних автопотягів – застосування у складі напівпричепа аеродинамічних тунелів, крізь які відбувається перетікання повітряних потоків, що набігають на лобову частину напівпричепа та обтікають напівпричеп з боків. Шляхом чисельного моделювання встановлено особливості розподілення зон турбулентної дисипації повітряного потоку та його швидкості в зоні розрідження позаду напівпричепа.

Ключові слова: сідельний автопотяг, зменшення аеродинамічного опору, новий спосіб, чисельне моделювання.

OLEXANDR MIKHAILOVICH PILIPENKO, OLEXANDR VICTOROVICH BATRACHENKO

Cherkassy state technological University

IGOR MIKOLAEVYCH LITOVCHENKO

National University of food technologies

### JUSTIFICATION FOR THE NEW WAY REDUCING THE AERODYNAMIC DRAG OF SEMI-TRUCKS

A new way to reduce aerodynamic drag truck Heavy and long vehicles - use in the semi wind tunnels, through which there is flow of air currents that run on the frontal part of the semi-trailer and the semi flow around the sides. It is shown that during transport the majority of types of cargo, semitrailers is Incomplete volume even when fully loaded weight. This creates the possibility of placing wind tunnels in the upper and lower lateral parts of trailers. Through numerical simulation of the peculiarities of the distribution areas of turbulent air flow and dissipation of its speed in the area behind the semi dilution. The results prove promising application of the proposed method for reducing the aerodynamic drag truck Heavy and long vehicles.

Keywords: truck, semi-trailer, aerodynamics, simulation.

#### Постановка проблеми

Ефективним шляхом підвищення паливної економічності сідельних автопотягів є зменшення їх аеродинамічного опору [1, 2]. Найбільшу частку (30–35%) аеродинамічного опору автопотягу складає зона розрідження (ЗР) позаду напівпричепа, дещо меншу (близько 20%) – лобовий опір кабіни та напівпричепа [1, 2]. На теперішній час відомо такі шляхи зменшення шкідливого впливу ЗР позаду напівпричепа, як застосування задніх спойлерів, які встановлюються позаду напівпричепа, та використання напівпричепів обтічної (каплеподібної) форми.

Задні спойлери виготовляються такими виробниками, як «TrailerTail», «Aerorevolution», «STEMCO Aerodynamics», Mercedes-Benz Aerodynamics Trucks «Aero trailer» тощо. Але вони володіють низькою ефективністю і їх застосування в країнах Європейського союзу є неможливим через діючі стандарти, які жорстко обмежують довжину автопотягу. Відомі напівпричепа обтічної форми «Teardrop» фірми «Don-Vig» та «Krone AeroLine» фірми «MAN Truck & Bus». Однак суттєвого зменшення аеродинамічного опору можна досягти лише при яскравій вираженій обтічній формі напівпричепа, що призводить до неможливості перевезення габаритних вантажів, зменшення використовуваного корисного об'єму та неможливості завантаження і розвантаження автотранспорту з боку дверей, що є необхідним при роботі з рампи.

Актуальним є розробка нового способу зменшення аеродинамічного опору автопотягів, який би володів підвищеною ефективністю та був позбавлений при цьому зазначених вище недоліків.

#### Аналіз останніх джерел

В роботах [1, 2] наведені узагальнені числові дані впливу окремих чинників на загальний аеродинамічний опір автопотягу. Автори [3–5] представили результати моделювання аеродинаміки автопотягу стандартної будови. Авторами роботи [6, 7] було досліджено ефективність застосування задніх спойлерів.

У відомих роботах не запропоновано нових шляхів зменшення аеродинамічного опору сідельних автопотягів за рахунок зменшення ЗР позаду напівпричепа та відсутні результати відповідних досліджень. Актуальним є вирішення даної задачі.

**Метою статті** є розробка нового способу зменшення аеродинамічного опору сідельних автопотягів, обґрунтування технічної можливості його реалізації та дослідження ефективності його застосування шляхом чисельного моделювання аеродинаміки автопотягу.

#### Виклад основного матеріалу

Як зазначалось вище, суттєво зменшити аеродинамічний опір автопотягу можна усунувши або значно зменшивши ЗР позаду напівпричепа. Аналізуючи існуючі способи вирішення цієї задачі, можна визначити наступне. У випадку коли фургон напівпричепа має звичайну форму паралелепіпеда, тоді є можливість перевезення великогабаритних вантажів та завантаження-розвантаження напівпричепа електротранспортом з рампи через задні двері напівпричепа. Але такому напівпричепу властивий

великий аеродинамічний опір через значну ЗР позаду напівпричепа. У випадку коли фургон напівпричепа має яскраво виражено обтічну (каплеподібну) форму у вертикальній та у горизонтальній площині, тоді його аеродинамічний опір є мінімальним серед існуючих напівпричепів. Але в такому випадку немає можливості перевезення великогабаритних вантажів, завантаження-розвантаження напівпричепа електронавантажувачем з рампи через задні двері та суттєво збільшується довжина автопотягу.

Отже, можна сформулювати наступне технічне протиріччя: фургон повинен мати форму паралелепіпеда для перевезення великогабаритних вантажів та покращення зручності навантажувальних робіт і фургон повинен мати каплеподібну форму задля мінімізації його аеродинамічного опору.

Для вирішення даного технічного протиріччя авторами був застосований наступний інструментарій теорії технічних систем – поняття ідеального кінцевого результату, функціонально-вартісний аналіз та типові прийоми (принципи) вирішення технічних протиріч (принципи дроблення, місцевої якості, асиметрії, «матрьошки», часткового або надлишкового рішення, обернути шкоду на користь, використання гнучких оболонки і тонких плівок).

Відомі технічні рішення, спрямовані на зменшення ЗР, так чи інакше передбачають створення плавної зміни форми напівпричепа в задній його частині з метою зменшення відриву потоку повітря та зменшення утвореної зони турбулентності. Тобто вони передбачають «боротьбу» із завихреннями позаду напівпричепа в той чи інший спосіб. Але фізична природа завихрень повітряного потоку така, що усунути їх без використання каплеподібної форми фургона або задніх спойлерів значної довжини на даний час не можливо. Значно ефективнішим є недопущення утворення цих завихрень тим чи іншим способом.

Ідеальним кінцевим результатом було б проходження повітря крізь автопотяг задля усунення огинання повітряним потоком корпусу автопотяга і попередження таким чином утворення завихрень.

Шляхом застосування функціонально-вартісного аналізу було встановлено, що в будові автопотягу є резерв простору крізь який може бути організовано проходження набігаючого потоку повітря, а саме крізь верхню та бокові частини напівпричепа, а також крізь верхній спойлер кабіни тягача. Таку можливість підтверджує практика вантажних перевезень – не при кожному вантажному перевезенні перевозиться вантаж такого виду і в такій кількості, щоб об'єм напівпричепа був заповнений повністю.

Авторами пропонується (рис. 1) новий спосіб зменшення аеродинамічного опору сидельних автопотягів пропускати потік повітря, який набігає на лобову частину автопотягу, крізь аеродинамічні тунелі, що розташовані у верхній та у задній нижній частинах напівпричепа [8]. Аеродинамічні тунелі (рис. 2) при цьому виконуються гнучкими з можливістю згортання та розгортання – вони розкладаються в робоче положення при наявності вільного об'єму в напівпричепі задля зменшення його аеродинамічного опору і складаються в неробоче положення при перевезенні великогабаритних вантажів. Більш детально конструкція аеродинамічних тунелів наведена у [9].

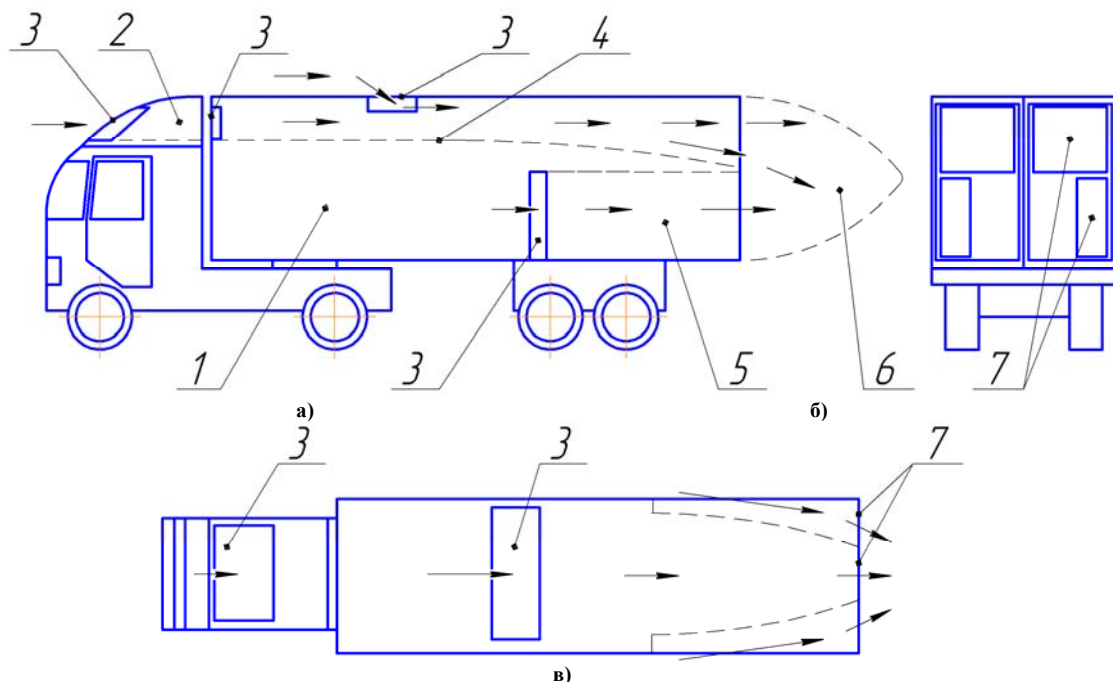
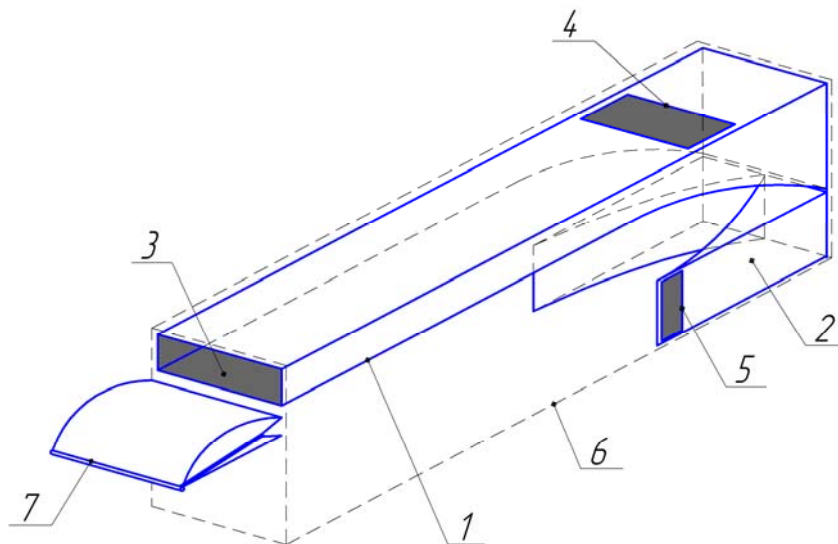


Рис. 1. Принципова схема реалізації розробленого способу зменшення аеродинамічного опору сидельного автопотягу: а) вид автопотягу збоку; б) вид автопотягу ззаду; в) вид автопотягу зверху; 1) напівпричіп; 2) передній спойлер; 3) люки; 4) верхній аеродинамічний тунель; 5) бокові аеродинамічні тунелі; 6) зона розрідження позаду напівпричепа; 7) вихідні вікна



**Рис. 2. Схема розташування аеродинамічних тунелів в напівпричепі:**  
 1) верхній аеродинамічний тунель; 2) бокові аеродинамічні тунелі;  
 3) передній повітрязабірний люк; 4) верхній повітрязабірний люк; 5) бокові повітрязабірні люки;  
 6) вантажна зона автомобілю; 7) передній спойлер

Запропонований спосіб дозволяє істотно зменшити загальний аеродинамічний опір автопотягу за рахунок одночасного зменшення ЗР позаду напівпричепи та зменшення лобового опору тягача та напівпричепи (два негативні чинники взаємно нейтралізуються). При цьому, на відміну від аналогів, зберігається незмінною довжина автопотягу, можливість перевезення великогабаритних вантажів та виконання навантажувальних робіт механізованим способом з рампи.

В таблиці 1 наведено розраховані значення величини вільного об'єму та вільної висоти напівпричепу при перевезенні вантажів різного типу. Прийнято наступні технічні характеристики напівпричепи: вантажопідйомність – 22 т; загальний об'єм – 82 / 87 м<sup>3</sup>; довжина – 13,6 м; ширина – 2,45 м; висота – 2,45 / 2,6 м; площа підлоги – 33,32 м<sup>2</sup>. Об'ємна вага вантажів прийнята відповідно до [10].

Таблиця 1

**Вільна висота у напівпричепі при умові його повного завантаження по масі**

№	Вид вантажу	Об'ємна вага вантажу, т/м <sup>3</sup>	Об'єм вантажу, що відповідає 22 т, м <sup>3</sup>	Вільний об'єм напівпричепу, м <sup>3</sup>		Вільна висота у напівпричепі, м	
				для 82 м <sup>3</sup>	для 87 м <sup>3</sup>	для 82 м <sup>3</sup>	для 87 м <sup>3</sup>
1	Одяг	0,12	183	-	-	-	-
2	Тютюн	0,28	78,5	3,5	8,5	0,1	0,25
3	Чай	0,32	68,75	13,25	18,25	0,4	0,55
4	Кондитерські вироби	0,45	49	33	38	0,99	1,14
Вантажі, при яких вільною є понад 50% висоти напівпричепу							
5	Горілчані вироби	0,5	44	38	43	1,14	1,29
6	Папір / парфумерія	0,52	42,3	39,7	44,7	1,19	1,34
7	Мийні засоби / азбестові вироби	0,7	31,4	50,6	55,6	1,52	1,67
8	Крупа, макарони	0,75	29,3	52,7	57,7	1,58	1,73
9	Цукор	0,77	28,5	53,5	58,5	1,61	1,76
10	Метизи	2,5	8,8	73,2	78,2	2,2	2,35

Як видно з таблиці 1, при транспортуванні більшості видів вантажів навіть при повністю заповненому напівпричепі за масою (що відбувається не в усіх випадках транспортування вантажів) наявний значний вільний простір у верхній частині напівпричепу. Це доводить принципову можливість реалізації розробленого способу зменшення аеродинамічного опору сидельного автопотягу.

Дослідження ефективності застосування розробленого способу проводилось шляхом чисельного моделювання аеродинаміки автопотягу із використанням програмного комплексу FlowVision. Базовими в математичній моделі були рівняння Нав'є-Стокса, рівняння нерозривності потоку, рівняння турбулентної в'язкості. Крім того, в модель входять рівняння для турбулентної енергії і швидкості дисипації турбулентної енергії. В даній роботі в ході моделювання була використана k-ε модель турбулентної течії в'язкої рідини з невеликими змінами густини при великих змінах числа Рейнольдса. У розрахунку були використані наступні параметри: густина повітря 1,2 кг/м<sup>3</sup>; температура t=20 °C; швидкість навігаючого повітря 25 м/с

(даний режим відповідає руху автопотягу зі швидкістю 90 км/год). При визначенні граничної умови стінки була задана шорсткість поверхні, яка характерна для матеріалу, з якого виготовляються автопотяги. В ході досліджень використана 3D-модель автопотягу марки «IVECO New Stralis XP» довжиною 17 м із одним верхнім та двома боковими аеродинамічними тунелями розробленої будови.

Результати моделювання представлені на рис. 3, 4. Як слідує з отриманих результатів, застосування аеродинамічних тунелів призводить до суттєвого зменшення турбулентної дисипації повітряного потоку. у верхній частині зони розрідження позаду напівпричепу зони максимальна дисипація складає 100 одиниць, тоді як для стандартного автопотягу [5] вона сягає 200 одиниць, а для автопотягу із задніми спойлерами [7] – від 120 до 185 одиниць. При цьому для випадку аеродинамічних тунелів розмір зон з максимальною дисипацією менший від 1,2 разу до 24 разів. В нижній частині зони розрідження, в центральному повздовжньому перерізі, спостерігається підвищена дисипація (рис. 3, б), оскільки в даній частині відсутній аеродинамічний тунель, бокові аеродинамічні тунелі розміщені з боків напівпричепу.

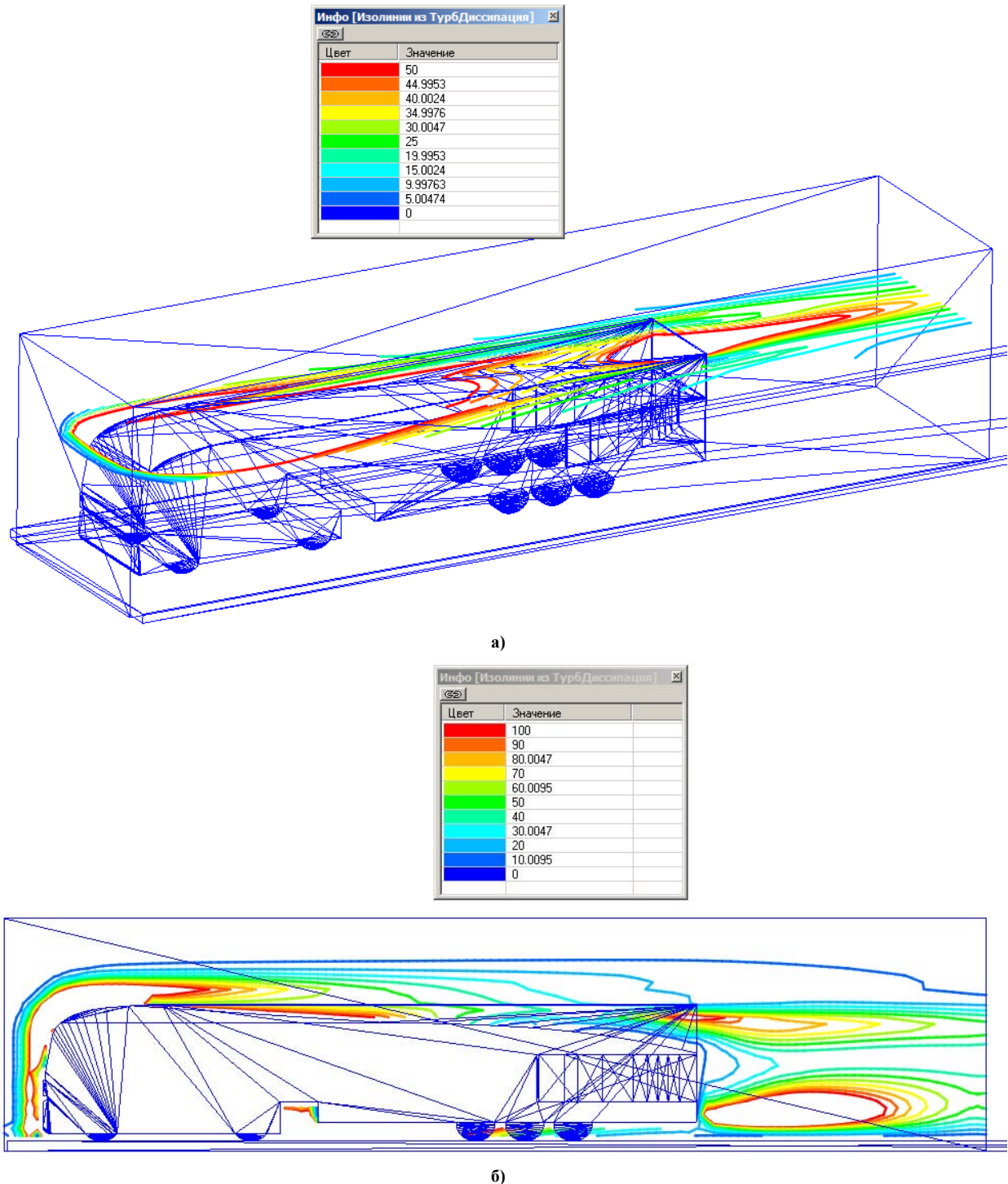


Рис. 3. Розподілення турбулентної дисипації повітряного потоку при обтіканні автопотягу, м/с (у вигляді ізоліній): а) в горизонтальному повздовжньому перерізі; б) у вертикальному центральному повздовжньому перерізі

Позаду бокових аеродинамічних тунелів спостерігається аналогічне верхньому тунелю зменшення турбулентної дисипації, яке, однак менше за верхній тунель внаслідок меншої площі отвору для входу повітря в боковий тунель в порівнянні з верхнім тунелем.

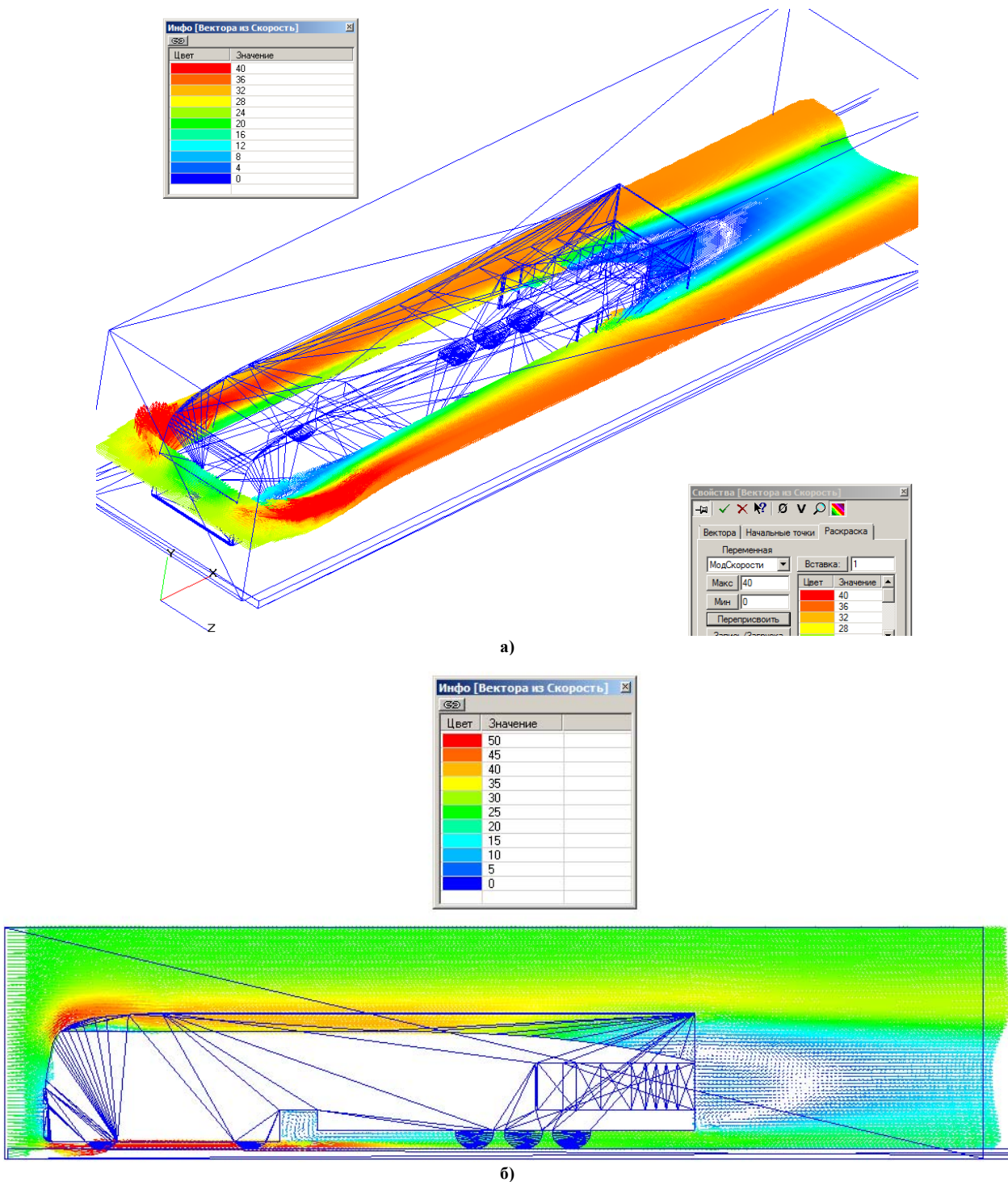


Рис. 4. Розподілення швидкості повітряного потоку при обтіканні автопотягу, м/с (у вигляді векторів): а) в горизонтальному повздожньому перерізі; б) у вертикальному центральному повздожньому перерізі

Швидкість повітряного потоку позаду напівпричепу також істотно відрізняється від швидкості при обтіканні стандартного автопотягу. Її значення сягає 15 м/с у верхній частині зони розрідження, тоді як для стандартного автопотягу [5] ці значення складають 4,5 м/с, що вказує на значно менше розрідження позаду напівпричепу з аеродинамічними тунелями в порівнянні зі стандартним автопотягом. Значення швидкості повітряного потоку в даній зоні відповідають швидкості повітря при використанні заднього спойлеру довжиною 5,5 м [7]. Отримані дані вказують на ефективність застосування аеродинамічних тунелів у складі автопотягів.

#### Висновки

Запропоновано новий спосіб зменшення аеродинамічного опору сідельних автопотягів –

застосування у складі напівпричепа аеродинамічних тунелів, крізь які відбувається перетікання повітряних потоків, які набігають на лобову частину напівпричепа та обтікають напівприцеп з боків. Показано, що при перевезенні переважної частини видів вантажів, напівприцеп є недозавантаженим за об'ємом (насамперед, по висоті) навіть при повному завантаженні за вагою. Це створює можливість розміщення аеродинамічних тунелів у верхній та у нижніх бокових частинах напівпричепа.

Шляхом чисельного моделювання встановлено особливості розподілення зон турбулентної дисипації повітряного потоку та його швидкості в зоні розрідження позаду напівпричепа. Отримані результати доводять перспективність застосування запропонованого способу для зменшення аеродинамічного опору сидельних автопотягів. На розроблені рішення подано 2 заявки на винахід.

### Література

1. Евграфов А.Н. Аэродинамика автомобиля / А. Н. Евграфов. – М. : МГИУ, 2010. – 356 с.
2. Belzile Marc. Review of Aerodynamic Drag Reduction Devices for Heavy Trucks and Buses. Technical Report [Електронний ресурс] / Marc Belzile. – Канада, 2012. – Режим доступу : [www.tc.gc.ca](http://www.tc.gc.ca).
3. Pevitt C. A Computational Simulation of Aerodynamic Drag Reductions for Heavy Commercial Vehicles / C. Pevitt, H. Chowdury, H. Moriaand, F. Alam // 18th Australasian Fluid Mechanics Conference. – Launceston, Australia. – 3–7 December 2012. – P. 54–84.
4. Rose McCallen. DOE's Effort to Reduce Truck Aerodynamic Drag through Joint Experiments and Computations [Електронний ресурс] / Rose McCallen et al. – США, 2006. – Режим доступу : [www1.eere.energy.gov](http://www1.eere.energy.gov).
5. Пилипенко О. М. Моделювання аеродинаміки сидельного автопотягу / О. М. Пилипенко, О. В. Батраченко, І. М. Литовченко // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький : ХНУ, 2017. – № 2. – С. 27–34.
6. Андрейчик А. Ф. Влияние заднего спойлера полуприцепа на общее аэродинамическое сопротивление седельного автопоезда / А. Ф. Андрейчик и др. // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – № 2. – С. 30–33.
7. Пилипенко О. М. Дослідження аеродинамічних властивостей задніх спойлерів сидельних автопотягів / О. М. Пилипенко, О. В. Батраченко, І. М. Литовченко // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький : ХНУ, 2017. – № 3.
8. Заявка на патент на винахід. Україна, МПК (2012) В 62В 35/00. Спосіб зменшення аеродинамічного опору вантажного автомобіля / Пилипенко О.М., Батраченко О. В. ; заявник і власник патенту Батраченко О. В.
9. Заявка № а201701297 на патент на винахід. Україна, МПК (2012) В 62В 35/00. Пристрій для зменшення аеродинамічного опору вантажного автомобіля / Пилипенко О.М., Батраченко О. В., Литовченко І. М. ; заявник і власник патенту Батраченко О. В.
10. Горяинов О. М. Практика вантажних перевезень і логістики / О. М. Горяинов. – Харків : Видавництво "Кортес-2001", 2008. – 323 с.

### References

1. Evhrafov A.N. Aerodynamika avtomobilya / A. N. Evhrafov. – M. : MHIU, 2010. – 356 s.
2. Belzile Marc. Review of Aerodynamic Drag Reduction Devices for Heavy Trucks and Buses. Technical Report [Elektronnyi resurs] / Marc Belzile. – Kanada, 2012. – Rezhym dostupu : [www.tc.gc.ca](http://www.tc.gc.ca).
3. Pevitt C. A Computational Simulation of Aerodynamic Drag Reductions for Heavy Commercial Vehicles / C. Pevitt, H. Chowdury, H. Moriaand, F. Alam // 18th Australasian Fluid Mechanics Conference. – Launceston, Australia. – 3–7 December 2012. – P. 54–84.
4. Rose McCallen. DOE's Effort to Reduce Truck Aerodynamic Drag through Joint Experiments and Computations [Elektronnyi resurs] / Rose McCallen et al. – SShA, 2006. – Rezhym dostupu : [www1.eere.energy.gov](http://www1.eere.energy.gov).
5. Pylypenko O. M. Modeliuvannya aerodynamiky sidelnogo avtopotiahu / O. M. Pylypenko, O. V. Batrachenko, I. M. Lytovchenko // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – Khmelnytskyi : KhNU, 2017. – # 2. – S. 27–34.
6. Andreichyk A. F. Vliyanye zadnego spoilera poluprytsepa na obshchee aerodynamicheskoe soprotyvlenye sedelnogo avtopoezda / A. F. Andreichyk y dr. // Mekhanyka mashyn, mekhanyzmov y materialov. – 2014. – # 2. – S. 30–33.
7. Pylypenko O. M. Doslidzhennia aerodynamichnykh vlastyvostei zadnykh spoileriv sidelnykh avtopotiahiv / O. M. Pylypenko, O. V. Batrachenko, I. M. Lytovchenko // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. – Khmelnytskyi : KhNU, 2017. – # 3.
8. Zaiavka na patent na vynakhid. Ukraina, MPK (2012) B 62V 35/00. Sposib zmenshennia aerodynamichnoho oporu vantazhnogo avtomobilya / Pylypenko O.M., Batrachenko O. V. ; zaiavnyk i vlasnyk patentu Batrachenko O. V.
9. Zaiavka # a201701297 na patent na vynakhid. Ukraina, MPK (2012) B 62V 35/00. Prystrii dlia zmenshennia aerodynamichnoho oporu vantazhnogo avtomobilya / Pylypenko O.M., Batrachenko O. V., Lytovchenko I. M. ; zaiavnyk i vlasnyk patentu Batrachenko O. V.
10. Horiainov O. M. Praktyka vantazhnykh perevezen i lohistyky / O. M. Horiainov. – Kharkiv : Vydavnytstvo "Kortes-2001", 2008. – 323 s.

Рецензія/Peer review : 21.6.2017 р.

Надрукована/Printed : 3.9.2017 р.  
Рецензент: к.т.н., доц. Рубан Д.П.