

УДК 621.34

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.104.0.64

ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НАЗЕМНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ МАШИНИ ПІД ЧАС ЇЇ РУХУ

Афонін В. М.¹, Авраменко А. М.^{2,3}, Левтєров А. М.^{2,3}, Воронков О. І.²,
Воробйов Д. В.²

¹ Приватна фірма «Променерго», м. Мерефа, Україна

² Харківський національний автомобільно-дорожній університет

³ Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України

Анотація. Наведено порівняльні результати чисельного моделювання процесу течії відпрацьованих газів у проточній частині випускного тракту двигуна наземної транспортної машини, зважаючи на їх розбавлення атмосферним повітрям. Для моделювання використовувався метод кінцевих об'ємів. Задачу розв'язано в тривимірній стаціонарній постановці. Як робоче тіло розглядалися відпрацьовані гази з відповідними теплофізичними властивостями та атмосферне повітря. Для моделювання в'язкої турбулентної течії використовувалась $k-\varepsilon$ -модель турбулентності. У роботі показано, що додавання атмосферного повітря дозволяє ефективно знижувати температуру відпрацьованих газів. Застосування штатної системи ежекції дає змогу реалізувати зниження температури відпрацьованих газів на 10–12 градусів – без додаткових енерговитрат. За певних умов експлуатації це забезпечить зниження рівня інфрачервоного випромінювання наземної транспортної машини з двигуном внутрішнього згорання, а відтак, і ймовірність її виявлення та враження.

Ключові слова: дизельний двигун, відпрацьовані гази, температура, помітність, тепловий слід, інфрачервоний спектр.

Вступ

Розвиток сучасних систем спостереження та виявлення техніки, особливо з використанням штучного інтелекту, привів до необхідності створювати умови для зменшення її помітності, насамперед у інфрачервоному спектрі випромінювання [1–3].

Придушення теплового сліду від енергоустановки транспортного засобу (наприклад, ДВЗ) зазвичай спрямовано на зниження температури відпрацьованих газів (ВГ). Такого зниження можна досягти різними способами, основні з яких: розбавлення потоку ВГ атмосферним повітрям, розпилення в потоці ВГ спеціальних рідин, що мають високу теплоємність і в процесі випаровування дозволяють знижувати температуру ВГ, та використання термоелектричних генераторів [4], які додатково уможливають генерування електроенергії безпосередньо на борту наземної транспортної машини.

Найкращих результатів можна досягти за умови поєднання зазначених методів. Розбавлення потоку ВГ атмосферним повітрям потребує організації процесу подачі повітря без негативного впливу на штатні системи силової установки наземної транспортної машини (наприклад, системи ежекційного охолодження [5] та ежекційного очищення

свіжого повітря та вилучення пилу) і без додаткових енерговитрат.

Аналіз публікацій

Зменшення помітності наземної транспортної машини дає змогу підвищити її живучість та забезпечити умови для виконання поставлених завдань [3]. За чинником – помітність у інфрачервоному спектрі випромінювання – основною проблемою наземної техніки є викиди щодо гарячих відпрацьованих газів ДВЗ у атмосферу та високі температури кришки моторно-трансмійного відділення, де зазвичай розташовані радіатори певних систем ДВЗ.

Використання сучасних програмних комплексів дозволяє моделювати складні процеси тепломасообміну в тривимірній постановці з високим ступенем достовірності та інформативності [6]. Для розв'язання задачі автори формують геометрію проточної частини, налаштовують математичні моделі, описують граничні умови тепломасообміну й теплофізичні властивості робочого тіла та проводять порівняльне чисельне моделювання.

Особливістю сучасних програмних комплексів і впроваджених методів є залежність результатів моделювання від коректності налаштування математичних моделей та значень самих граничних умов (ГУ) тепломасо-

обміну [6]. Саме тому вибір та обґрунтування вихідних показників має вирішальне значення в досягненні результатів чисельного моделювання.

Розроблення підходів для аналізу умов формування теплового сліду від двигуна наземної транспортної машини є вкрай важливим науковим і практичним завданням.

Мета та постановка завдання

Мета роботи – проведення порівняльного чисельного моделювання з оцінювання ефективності розбавлення потоку ВГ двигуна наземної транспортної машини атмосферним повітрям для зниження їх температури.

Для досягнення поставленої мети в роботі визначалися та виконувалися такі завдання:

- провести огляд публікацій із сучасних систем придушення теплового сліду;
- сформувавши геометрію проточної частини випускного тракту двигуна наземної транспортної машини;
- розрахувати робочий процес двигуна наземної транспортної машини для режиму номінальної потужності;
- сформувавши масив граничних умов для порівняльного чисельного моделювання процесів теплообміну;
- проаналізувати результати порівняльного розрахункового дослідження;
- сформулювати висновки про ефективність запропонованого підходу з придушення теплового сліду двигуна наземної транспортної машини.

Викладення основного матеріалу

У роботі розглядався дизельний двигун наземної транспортної машини типу 5ТДФМА. Основні технічні параметри двигуна наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні технічні параметри двигуна

№	Параметр	Од. вим.	5ТДФМА
1	Потужність	кВт	783
2	Частота обертання, що відповідає режиму номінальної потужності, n	хв ⁻¹	2850
3	Діаметр циліндра, D	мм	120
4	Хід поршня, S	мм	2x120
5	Ступінь стиснення, ϵ	-	15,8
6	Кількість циліндрів	шт.	5

Далі для підготовки масиву ГУ й подальшого порівняльного чисельного моделювання процесу течії ВГ з додаванням повітря у про-

точній частині ежектора розраховано робочий процес двигуна для режиму номінальної потужності (результати наведено в табл. 2).

Таблиця 2 – Результати розрахунку робочого процесу двигуна

№	Параметр	Од. вим.	5ТДФМА
1	Потужність	кВт	783
2	Ефективний ККД	%	37,6
3	Питома ефективна витрата палива	г/(кВт·год)	225
4	Середній ефективний тиск	МПа	0,98
5	Годинна витрата палива	кг/год	176,1
6	Температура після турбіни	°С	461

Надалі для порівняльного чисельного моделювання була синтезована геометрія проточної частини випускного тракту двигуна наземної транспортної машини (рис. 1) та розрахункова сітка (рис. 2).

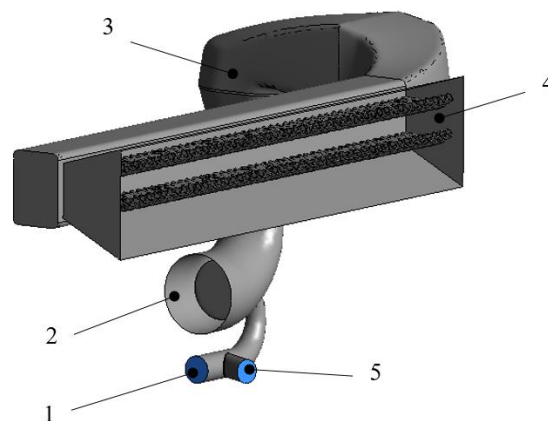


Рис. 1. Геометрія проточної частини випускного тракту двигуна наземної транспортної машини: 1 – патрубок відсмоктування пилу; 2 – вхідний патрубок (після турбіни); 3 – проточна частина ежектора; 4 – сопла для виходу ВГ у навколишнє середовище; 5 – патрубок підводу додаткового повітря

Для порівняльного чисельного моделювання процесу течії ВГ з додаванням атмосферного повітря використовувалась $k-\epsilon$ -модель турбулентності, задача розв'язувалась у тривимірній стаціонарній постановці в декартових координатах з урахуванням теплообміну між робочим тілом

(газами) та стінками проточної частини випускного тракту.

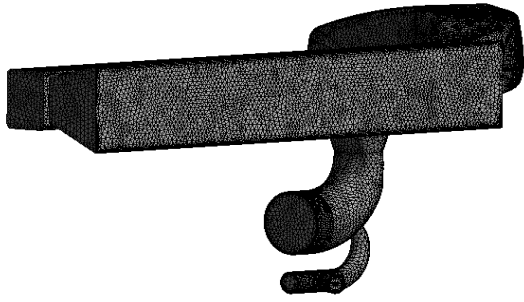


Рис. 2. Розрахункова сітка (1031423 розрахункових комірок)

Рівняння k - ε -моделі турбулентності мають такий вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \cdot k \cdot \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \cdot \varepsilon - Y_M + S_k,$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \cdot \varepsilon \cdot \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} \cdot G_b) - C_{2\varepsilon} \cdot \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon,$$

де k – питома кінетична енергія турбулентності; ε – швидкість в'язкої дисипації енергії турбулентності; ρ – щільність газу; μ_t – турбулентна динамічна в'язкість; \bar{u}_i – усереднена швидкість; ∂_k – безрозмірна емпірична константа; G_k – турбулентна кінетична енергія, утворена від середніх градієнтів швидкості; G_b – кінетична енергія виштовхувальної сили; $C_{3\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ – константи; Y_M – внесок змінного розширення за умови турбулентності стиснення в загальну швидкість дисипації; S_k – інваріант тензора деформацій.

Значення тепломасообміну наведені в табл. 2, а схема завдання ГУ – на рис. 3.

Таблиця 2 – ГУ тепломасообміну для порівняльного чисельного моделювання

Параметр	G , кг/с	t , °C
Вхід ВГ	1,76	461
Параметр	P , МПа	t , °C
Вхід повітря	0	25
Вихід ВГ	0	25

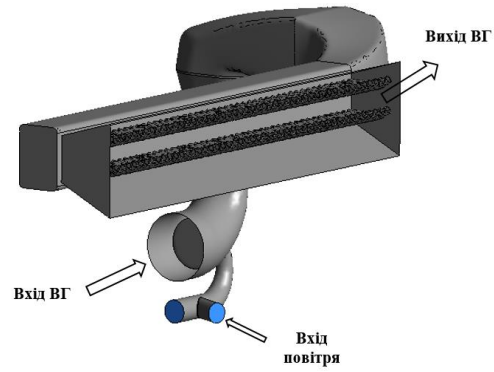


Рис. 3. Схема завдання ГУ тепломасообміну

Основні результати проведеного порівняльного дослідження

Розподіл швидкості потоку ВГ у вигляді ліній току в проточній частині ежектора для базового та модернізованого варіантів наведено на рис. 4.

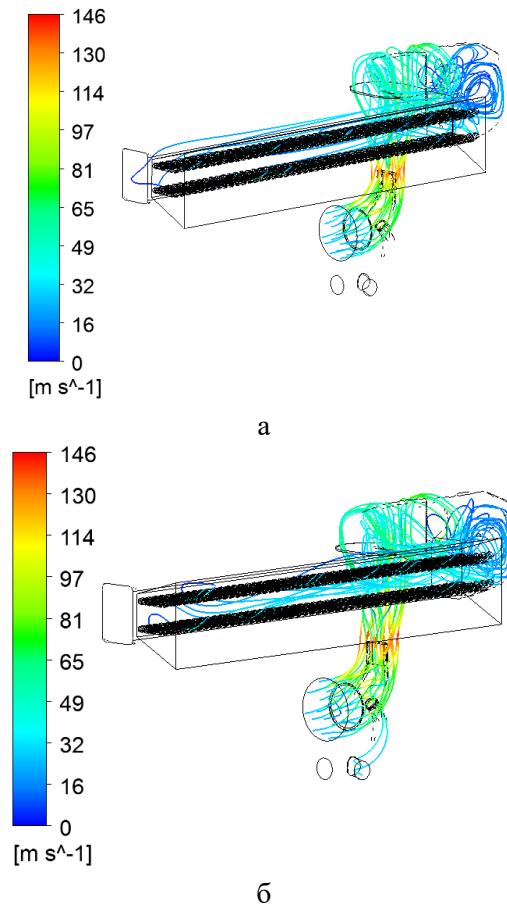


Рис. 4. Розподіл швидкості потоку ВГ у проточній частині ежектора: *a* – базовий варіант; *б* – модернізований варіант

У базового варіанта максимальна швидкість потоку спостерігається в зоні сопла проточної частини ежектора й досягає 142 м/с (рис. 4, *a*). За довжиною проточної

частини випускного тракту швидкість потоку ВГ змінюється в межах від 30 до 100 м/с. У зонах вихідних сопел швидкість потоку становить 140 м/с, що в поєднанні з певними конструктивними елементами дає змогу організувати ежекційне охолодження [5].

У модернізованого варіанта спостерігається підвищення швидкості потоку ВГ з атмосферним повітрям у межах 5–10 м/с (рис. 4, б).

Розподіл швидкості потоку ВГ в об'ємному вигляді в проточній частині ежектора для базового та модернізованого варіантів наведено на рис. 5.

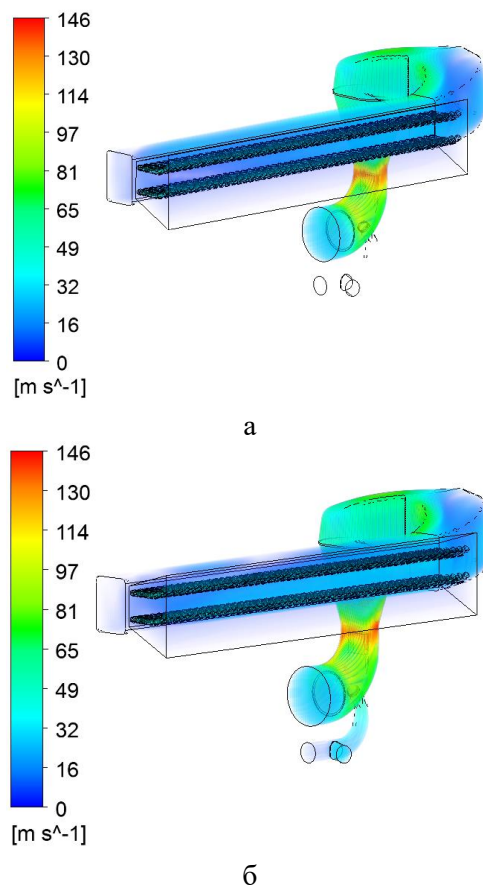


Рис. 5. Розподіл швидкості потоку ВГ у проточній частині ежектора: *a* – базовий варіант; *б* – модернізований варіант

Об'ємний вигляд швидкостей потоку ВГ наочно демонструє відсутність застійних зон у проточній частині випускного тракту для базового та модернізованого варіантів (рис. 5, *a* і *б*).

Розподіл температури потоку ВГ в об'ємному вигляді в проточній частині ежектора для базового та модернізованого варіантів наведено на рис. 6.

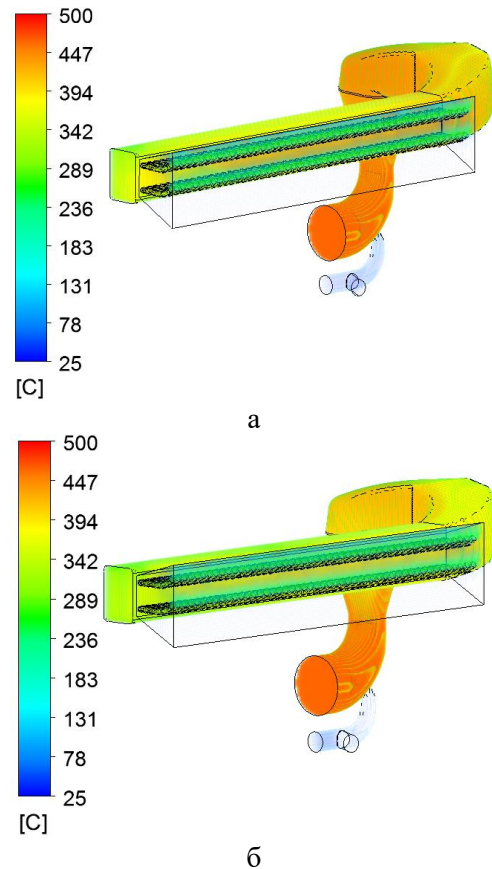


Рис. 6. Розподіл температури потоку ВГ у проточній частині ежектора: *a* – базовий варіант; *б* – модернізований варіант

Максимальна температура ВГ досягає 461 °C на вході в проточну частину ежектора (рис. 6, *a* і *б*). Для базового варіанта в процесі течії ВГ по випускному тракту їх температура поступово знижується до рівня 250 °C в центральній частині випускного тракту, а на виході із сопел становить 88 °C (рис. 6, *a*).

Для модернізованого варіанта завдяки підсмоктуванню атмосферного повітря та розбавленню потоку ВГ температура в центральній частині випускного тракту знижується до 10–12 °C (рис. 6, *б*). На виході із сопел вона становить 76 °C (рис. 6, *б*). Таке зниження температури ВГ (на 12 °C) вдалося досягти завдяки ежекційному ефекту без додаткових енерговитрат.

Для подальшого зниження температури ВГ необхідно проводити оптимізацію конструкції сопла ежектора або використовувати додатковий компресор для подачі атмосферного повітря в потік ВГ.

Узагальнені результати порівняльного розрахункового дослідження наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Узагальнені результати порівняльного розрахункового дослідження

Базовий варіант		
	G, кг/с	t, °C
Вхід	1,76	461
Вихід	1,76	88
Модернізований варіант		
	G, кг/с	t, °C
Вхід (ВГ)	1,76	461
Вхід (повітря)	0,15	25
Вихід	1,91	76

Висновки

Мету, поставлену в роботі, досягнуто.

Огляд публікацій із сучасних систем придушення теплового сліду показав, що розвиток та вдосконалення систем придушення теплового сліду є актуальним науково-практичним завданням.

У роботі сформовано геометрію проточної частини випускного тракту двигуна наземної транспортної машини в тривимірній постановці, що надалі дало змогу провести порівняльне чисельне моделювання процесу течії ВГ з додаванням атмосферного повітря.

Розраховано робочий процес двигуна наземної транспортної машини для режиму номінальної потужності та сформовано масив ГУ для чисельного моделювання тепломасообміну в проточній частині випускного тракту двигуна наземної транспортної машини.

Проаналізовано результати порівняльного розрахункового дослідження та сформульовано висновки з вибору раціональних способів щодо придушення теплового сліду двигуна наземної транспортної машини з мінімальними енерговитратами.

Література

1. Anna Pohl, Yvonne Paulley, Anthony Smith, Ove Gustafsson, Sebastian Möller, Jonas Allvar. The impact of exhaust plumes on the infrared signature of combat vehicles – an experimental and analytical study, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Volume 306, 2023, 108649, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2023.108649>.
2. Veerman HET, Schleijsen HMA, Brettschneider A, Amram R. Ship signature management to increase infrared countermeasure effectiveness. In: *Proceedings of the volume 11539, technologies and systems, platforms, effects IV: 1153903; 2020. Event: SPIE Security and Defence, 2020, Online Only.* <https://doi.org/10.1117/12.2573953>
3. Taeil Kim, Taehwan Kim, Ji-Yeul Bae, Daeyoon Jung, Hyung Hee Cho. Infrared Signature Analy-

sis on Armored Vehicle Applied with Emissivity Controlled Structure. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 30(2), pp.179–184, April, 2017.

<https://doi.org/10.7734/COSEIK.2017.30.2.179>

4. L.I. Anatyshuk, R.V. Kuz, Yu.Yu. Rozver. Efficiency of thermoelectric recuperators of the exhaust gas energy of internal combustion engines. *AIP Conf. Proc.* 1449, 516–519 (2012). <https://doi.org/10.1063/1.4731607>.
5. Пат. 633 У України. Газоповітряний тракт ежекційної системи охолодження силової установки бронемашини. Оpubл. 16.10.2000.
6. Авраменко А.М. Сучасні методи дослідження економічних, екологічних та ресурсних показників дизельних двигунів: монографія. Харків: ППМаш НАН України, 2019. 204 с. ISBN 978-966-02-9043-3.

References

1. Anna Pohl, Yvonne Paulley, Anthony Smith, Ove Gustafsson, Sebastian Möller, Jonas Allvar, The impact of exhaust plumes on the infrared signature of combat vehicles – an experimental and analytical study, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Volume 306, 2023,108649, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2023.108649>.
2. Veerman HET, Schleijsen HMA, Brettschneider A, Amram R. Ship signature management to increase infrared countermeasure effectiveness. In: *Proceedings of the volume 11539, technologies and systems, platforms, effects IV: 1153903; 2020. Event: SPIE Security and Defence, 2020, Online Only.* <https://doi.org/10.1117/12.2573953>.
3. Taeil Kim, Taehwan Kim, Ji-Yeul Bae, Daeyoon Jung, Hyung Hee Cho. Infrared Signature Analysis on Armored Vehicle Applied with Emissivity Controlled Structure. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 30(2), pp.179–184, April, 2017. <https://doi.org/10.7734/COSEIK.2017.30.2.179>.
4. L.I. Anatyshuk, R.V. Kuz, Yu.Yu. Rozver. Efficiency of thermoelectric recuperators of the exhaust gas energy of internal combustion engines. *AIP Conf. Proc.* 1449, 516–519 (2012). <https://doi.org/10.1063/1.4731607>.
5. Pat. 633 U Ukraini. Gazopovitryaniy trakt ejekciynoi sistemi oholodjennya silovoi ustanovki bronemashini. Opubl. 16.10.2000.
6. Avramenko A.M. Suchasni metodi dosli djennya ekonomichnih, ekologichnih ta resursnih pokazniki v dizel nih dviguni v: monografiya. Harkiv: IPMash NAN Ukraini, 2019. 204 s. ISBN 978-966-02-9043-3.

Афонін Валентин Миколайович¹, генеральний директор, тел. (057) 748-47-98, prn187@ukr.net,

Авраменко Андрій Миколайович^{2,3}, д.т.н., с.д., професор кафедри ДВЗ, пров. наук. співр. відділу термогазодинаміки енергетичних машин,

тел. +38 067-944-64-75, an0100@ukr.net,

Лєвтеров Антон Михайлович^{2,3}, к.т.н., с.н.с., н.с. каф. ДВЗ, с.н.с. відділу термогазодинаміки енергетичних машин, тел. +38067-572-49-795, antmix@gmail.com,

Воронков Олександр Іванович², д.т.н., проф., зав. каф. ДВЗ, dralexadi@gmail.com, тел. +38 050-583-00-45,

Воробійов Дмитро Володимирович², аспірант каф. ДВЗ, тел. +38068-618-27-09, vorobiovdmitro@ua.fm.

¹Приватна фірма «Променерго», 62472, Україна, Харківська обл., Харківський р-н, м. Мерефа, вул. Довженка Олександра, 187-Г.

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 61046, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25.

³Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, 61002, Україна, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10.

Reducing the level of infrared radiation of a ground vehicle during its movement

Abstract. Problem. Reducing the visibility of a ground vehicle makes it possible to increase its survivability and provide conditions for the performance of assigned tasks. The development of approaches to the analysis of the conditions for the formation of a heat trace from the engine of the ground vehicle is an extremely important scientific and practical task. **Goal.** The purpose of the work was to carry out comparative numerical modelling to assess the effectiveness of diluting the EG flow of the engine of the ground vehicle with atmospheric air to reduce their temperature. **Methodology.** Using the method of finite volumes, a comparative numerical experiment was conducted in a three-dimensional stationary setup. The possibility of sucking atmospheric air with the standard nozzle of the ejector was quantified. **Results.** The study shows that the addition of atmospheric air can effectively reduce the temperature of exhaust

gases. The use of a regular ejection system allows to reduce the temperature of exhaust gases by 10-12 degrees without additional energy consumption. **Originality.** Using the method of a comparative numerical experiment, the effectiveness of adding atmospheric air to the exhaust gases of a diesel engine in order to suppress the heat trace was evaluated. **Practical value.** An approach to reducing the temperature of the exhaust gases of the ground vehicle engine is proposed, that allows to decrease its visibility in the infrared radiation spectrum without additional energy consumption.

Key words: diesel engine, exhaust gases, temperature, visibility, heat trace, infrared spectrum.

Valentyn Afonin¹, General Director,

tel. (057) 748-47-98, prm187@ukr.net,

Andrii Avramenko^{2,3}, DSc (Engineering), Professor of the Department of ICE, leading researcher of the Department of thermo gas dynamics of power machines, tel. +38 067-944-64-75, an0100@ukr.net,

Anton Levterov^{2,3}, PhD (Engineering), leading researcher, researcher of the Department of ICE, leading researcher of the Department of thermo gas dynamics of power machines tel. +38067-572-49-795, antmix@gmail.com,

Oleksandr Voronkov², DSc (Engineering), Prof., Head of the Department of ICE, dralexadi@gmail.com, tel. +38 050-583-00-45,

Dmytro Vorobyov², post-graduate student of the Department of ICE, tel. +38068-618-27-09, vorobiovdmitro@ua.fm.

¹Promenergo Private Company, 187-G Dovzhenka Oleksandra Str., Merefа, 62472, Kharkiv district, Kharkiv region, Ukraine.

²Kharkiv National Automobile and Highway University, 25 Yaroslava Mudrogo Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

³A.M. Pidgorny Institute of the Problems of Mechanical Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine, 2/10 Pozharsky Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.