

## РОЗРАХУНОК ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ В ТРУБОПРОВОДАХ ПНЕВМОСИСТЕМ ПРИ АДІАБАТИЧНИХ І ПОЛІТРОПНИХ ПРОЦЕСІВ

**Леонт'єв Дмитро Миколайович**, д.т.н., проф. професор кафедри автомобілів ім. А.Б. Гредескула, Харківський національний автомобільно-дорожній університет e-mail: [leontiev@khadi.kharkov.ua](mailto:leontiev@khadi.kharkov.ua), ORCID: 0000-0003-4255-6317

**Ярита Олександр Олександрович**, к.т.н., доцент, доцент кафедри автомобілів ім. А.Б. Гредескула, Харківський національний автомобільно-дорожній університет e-mail: [aleks.yarita@gmail.com](mailto:aleks.yarita@gmail.com), ORCID: [0000-0003-4948-6577](https://orcid.org/0000-0003-4948-6577)

**Леонт'єв Сергій Миколайович**, здобувач PhD, кафедра автомобілів ім. А.Б. Гредескула, Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Воронін Ілля Олексійович** студентів групи АА-61-24

**Вступ.** Сучасні пневматичні системи функціонують в умовах змінних режимів роботи, коли тиск, температура та масова витрата повітря змінюється у часі. Вочевидь, що коректний опис теплових процесів може суттєво вплинути на розрахунок тиску або параметри оцінки нагріву елементів трубопроводів, а також на прогнозування перехідних процесів при пуску або зупинці пневматичного обладнання. Зміна температури газу в об'ємах трубопроводів і ресиверів при стисканні або розширенні грає особливу роль в газовій динаміці. Відомо, що в залежності від умов теплообміну процес витікання газу через місцевий опір в трубопроводі може відбуватися по адіабатному або політропному закону, тому отримання рівняння для визначення зміни температури є актуальним завданням.

**Матеріали дослідження.** Базою для аналізу розрахункового метода для розрахунку зміни температури повітря в трубопроводі пневматичних систем транспортних засобів є перший закон термодинаміки, використаний для постійного об'єму ( $V_1$ ). Для маси газу ( $m$ ) при постійному об'ємі та нестационарній витраті не складно записати рівняння енергетичного балансу:

$$\frac{d}{dt}(mc_v T_1) = \frac{dQ_1}{dt} + (h_0 G_0 - h_1 G_1), \quad (1)$$

Аналогічне рівняння можна отримати і для змінного об'єму:

$$\frac{d}{dt}(mc_v T_1) = \frac{dQ_1}{dt} + (h_0 G_0 - h_1 G_1) - p_1 \frac{dV_1}{dt}, \quad (2)$$

де  $T_1$  – температура газу на виході з трубопроводу, К;  $\frac{dQ_1}{dt}$  – тепловий потік, що проходить через стінки трубопроводу, Вт;  $c_v$  та  $h_i = c_p T_i$  – відповідно, питома теплоємність та питома ентальпія притоку (відтоку) газу, Дж/(кг·К) та Дж/кг;  $G_0$  та  $G_1$  – масові витрати на вході та виході трубопроводу, кг/с;  $m = p_1 V_1 / (RT_1)$  – маса газу в об'ємі, кг;  $p_1$  – тиск газу, Па;  $R$  – питома газова стала, 287 Дж/(кг·К);  $V_1$  – об'єм що наповнюється (спорожнюється), м<sup>3</sup>.

Якщо записати ліву частину рівняння (1) як  $c_v \left( m \frac{dT_1}{dt} + T_1 \frac{dm}{dt} \right)$  та використавши рівняння стану ідеального газу ( $p_1 V_1 = m R T_1$ ) прийнявши припущення, що об'єм є постійним, температура  $T_0 \approx T_1$ , теплообмін з навколишнім середовищем через стінки трубопроводу відсутній (адіабатичний процес), не складно з рівняння (1) отримати диференціальне рівняння для зміни температури в часі:

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{T_1}{p_1 V_1} \left( V_1 \frac{dp_1}{dt} - RT_1 (G_0 - G_1) \right). \quad (3)$$

У випадку наявності теплового обміну з навколишнім середовищем через стінки трубопроводу (політропний процес), для описаних вище умов, рівняння (3) перетвориться на рівняння виду:

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{T_1}{p_1 V_1} \left( V_1 \frac{dp_1}{dt} - RT_1 (G_0 - G_1) + (k-1) \frac{dQ_1}{dt} \right). \quad (4)$$

де  $k = c_p / c_v = 1.4$  – показник адіабати (для повітря).

Тепловий потік  $dQ_1/dt$  як правило можна визначити через коефіцієнт тепловіддачі та температури навколишнього середовища. Він може бути розрахований за залежністю:

$$\frac{dQ_1}{dt} = \alpha F (T_a - T_1), \quad (5)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну,  $F$  – площа поверхні контакту, м<sup>2</sup>.

В умовах коли об'єм змінюється та температура  $T_0 \neq T_1$  в загальному випадку з рівняння (2) отримаємо диференціальне рівняння для зміни температури в часі у вигляді:

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{RT_1}{c_v p_1 V_1} \left( c_p (T_0 G_0 - T_1 G_1) - c_v T_1 (G_0 - G_1) + \frac{dQ_1}{dt} - p_1 \frac{dV_1}{dt} \right). \quad (6)$$

Якщо прийняти  $c_p = k \cdot c_v$ , а  $c_v = R/(k-1)$  для випадку повільної зміни об'єму, то можна рівняння (6) переписати у вигляді:

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{T_1}{p_1 V_1} \left( kR(T_0 G_0 - T_1 G_1) - RT_1(G_0 - G_1) + (k-1) \frac{dQ_1}{dt} - (k-1)p_1 \frac{dV_1}{dt} \right). \quad (7)$$

Вочевидь, що якщо  $T_0 \approx T_1$ ,  $dV_1/dt = 0$  та  $V_1 dp_1/dt \approx kRT_1(G_0 - G_1)$  то рівняння (7) перетворюється на рівняння (4), а якщо відсутній й теплообмін між стікою трубопроводу та навколишнім середовищем ( $dQ_1/dt = 0$ ) то рівняння (7) перетворюється на рівняння (3).

**Результати та обговорення.** Проведений аналіз показує, що зміна температури газу визначається сукупним впливом трьох факторів:

1. **Зміна тиску у часі** ( $dp_1/dt$ ) – зростання тиску визиває нагрів, падіння тиску призводить до охолодження;

2. **Масовим балансом** ( $G_0 - G_1$ ) – при виході газу з об'єму температура зменшується внаслідок втрати внутрішньої енергії та навпаки, при наповненні об'єму температура зростає;

3. **Теплообміном з навколишнім середовищем** ( $dQ_1/dt$ ) – згладжує коливання температури, особливо при довгих перехідних процесах.

Для коротких часових інтервалів, коли теплообмін не встигає проявитися (наприклад наповнення (не більше 0,6 с) або спорожнення гальмового приводу автомобіля (не більше 1,2 с)), процес можна вважати адіабатичним. При довгостроковому процесі або при великій площі теплообміну режим наближується до політропного процесу з показником ( $n \approx 1.2-1.3$ ). Розрахункові залежності придатні для чисельного моделювання динаміки зміни температури в ресиверах, пневматичних трубопроводах, компресорних пристроях, де зміна температури впливає на продуктивність та надійність роботи обладнання.

## Висновки

Отримано універсальне рівняння для визначення швидкості зміни температури повітря в трубопроводах, яке враховує зміну тиску, маси повітря та теплообмін.

1. При адіабатичному процесі ( $dQ_1/dt = 0$ ) температура змінюється пропорційно швидкості зростання тиску та різності масової витрати.

2. При політропному процесі введення члена  $(k-1)dQ_1/dt$  дозволяє врахувати теплообмін між газом та стінками трубопроводу.

3. Розроблені рівняння можуть бути використана для розрахунку перехідних процесів в пневмосистемах, компресорних лініях та газорозподільчих пристроях, що працюють в робочому діапазоні тисків 1–1,5 МПа та температур від мінус 50 до плюс 50 °С.

4. При необхідності уточнення розрахунків можливо використання реальних рівнянь стану (наприклад виріальні або Ван-дер-Ваальса), однак

запропоновані залежності забезпечують інженерну точність для більшості варіантів їх застосування.

## Література

1. Туренко, А. Н., Клименко, В. И., Богомолов, В. А., Рыжих, Л. А., Леонтьев, Д. Н., Красюк, А. Н., & Михалевич, Н. Г. (2015). *Реализация интеллектуальных функций в электронно-пневматическом тормозном управлении транспортных средств*.
2. Leontiev, D., Klimenko, V., Mykhalevych, M., Don, Y., & Frolov, A. (2020). Simulation of working process of the electronic brake system of the heavy vehicle. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 1019, 50-61. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-25741-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-25741-5_6)
3. Леонтьев, Д. М. (2011). *Системний підхід до створення автоматизованого гальмівного керування транспортних засобів категорій М<sub>3</sub> та N<sub>3</sub>*. Харківський національний автомобільно-дорожній університет.
4. Leontiev, D. N., Voronkov, O., Korohodskyi, V., Hlushkova, D., Nikitchenko, I., Teslenko, E., & Lykhodii, O. (2020). Mathematical Modelling of Operating Processes in the Pneumatic Engine of the Car. *SAE Technical Paper*. 2020-01-2222
5. Туренко, А. Н., Клименко, В. И., Рыжих, Л. А., & Леонтьев, Д. Н. (2012). *Основы создания и исследования электронно-пневматического тормозного управления транспортных средств*.
6. Korohodskyi, V., Leontiev, D., Rogovyi, A., Kryshtopa, S., Gritsuk, I., Voronkov, O., & Prokopiuk, D. (2022). Research of spark ignition engine and internal mixture formation using single-zone, two-zone and three-zone calculation model of it working process. *SAE Technical Paper*. 2022-01-1000
7. Леонтьев, Д. Н. (2013). Моделирование переходных процессов в пневматическом тормозном приводе автомобиля, который оборудован системой автоматического регулирования тормозного усилия. *Вісник СевНТУ. Сер.: Машиноприладобудування та транспорт*, (142), 88-91.
8. Туренко, А. М., Клименко, В. И., Богомолов, В. О., Леонтьев, Д. М., Михалевич, М. Г., & Куріпка, О. В. (2020). *Розрахунок та дослідження взаємодії структурних модулів електронно-пневматичного гальмового приводу*.
9. Yaryta, O. A., Mychalevych, M. G., Leontiev, D. N., Klymenko, V. I., Bogomolov, V. A., Gritsuk, I. V., & Novikova, Y. B. (2018). Features of controlling electropneumatic valves of actuator to control its clutch with acceleration valve. *Наука и техника*, (1), 64-71.
10. Turenko, A. M., Klymenko, V. I., Lomaka, S. Y., Ryzhykh, L. O., Mykhalevych, M. H., Leontiev, D. M., Cheban, A. A., & Krasiuk, O. M. (2010, June 25). *Elektronno-pnevmatychna halmivna systema* [Electronic-pneumatic brake system] (Patent No. UA 91121 U). Ukrayins'kyu instytut intelektual'noyi vlasnosti (Ukrpatent).
11. Савченко, Є., Гармаш, А., Сухомлин, О., & Сінельнік, Д. (2022). On the issue of using expenditure functions in simulation of pneumatic links of the " throttle-capacity" type. *Автомобільний транспорт*, (51), 43-57.

12. Чернышев, А.В., Крутиков, А.А., Демихов, К.Е., Полинков, А.В., Белова О.В., Смирнов, И.А. (2006). Разработка математической модели пневматической системы термостабилизации. *Научное приборостроение*. 16(1). 94-106

13. Рижих, Л. О., Ломака, С. Й., Леонтьев, Д. М., Красюк, О. М., & Чебан, А. А. (2010). Моделювання динамічної зміни тиску на виході з РГС на основі його статичної характеристики при зміні вертикальних навантажень на осях транспортного засобу. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, (2), 89-92.

14. Леонтьев, Д.Н., Рыжих, Л.А., Ломака, С.И. (2007). Алгоритмы функционирования регуляторов тормозных сил с электронным управлением. *Автомобильная промышленность*, (11), 17-19.

15. Voronkov, O., Nikitchenko, I., Korohodskyi, V., Ryzhykh, L., Rudenko, N., & Makarova, T. (2021). Feasibility of Heating the Air in a Hybrid Pneumatic Engine for a Compact Vehicle. *SAE Technical Paper*. 2021-01-1246

16. Рижих, Л. О., Леонтьев, Д. М., & Куріпка, О. В. (2020). Щодо питання моделювання електропневматичного гальмового приводу. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції « Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація», 15-16*

17. Leontiev, D., & Don, Y. (2019). Обґрунтування раціонального закону зміни тиску в електропневматичному гальмовому приводі під час екстреного гальмування. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, (84), 21-21.

18. Леонтьев ДМ, Крамський ОВ. (2010, 17 червня). Програма розрахунку пневматичних гальмівних приводів двохвісних транспортних засобів. (№ 33767). Інститут інтелектуальної власності України (Україна).

19. Leontiev, D. N., Voronkov, O., Nikitchenko, I., Sklyarov, N., & Nazarov, A. (2021). Pneumatic Power Unit for a Wheeled Vehicle. *SAE Technical Paper*. 2021-01-0640

20. Богомоллов, В. О., & Леонтьев, Д. М. (2019). Щодо питання підвищення ефективності дії гальмового керування транспортного засобу з пневматичним гальмовим приводом. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції "Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація", 72-73.*

21. Богомоллов, В. О., Клименко, В. І., Леонтьев, Д. М., Савченко, Є. Л., & Гармаш, А. А. (2020). Щодо питання використання витратних функцій під час моделювання пневматичних ДЄ-ланок з високою та низькою швидкістю. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції ННІ механотроніки і систем менеджменту*. 72-73

22. Bohomolov, V. O., Leontiev, D. M., Klymenko, V. I., Yaryta, O. O., Savchenko, Ye. L., & Riabiukha, Yu. O. (2018, January 25). *Elektropnevmatychnyi pidsyluvach pryvoda z cheplennia avtotransportnoho zasobu* [Electropneumatic clutch drive booster of a motor vehicle] (Patent No. UA 122715 U). Ukrayins'kyu instytut intelektual'noyi vlasnosti (Ukrpatent).

23. Bohomolov, V. O., Leontiev, D. M., Mykhalevych, M. H., Klymenko, V. I., Yaryta, O. O., Savchenko, Ye. L., & Riabiukha, Yu. O. (2018, May 10). *Elektropnevmatychna systema keruvannia zcheplenniam* [Electropneumatic clutch control system] (Patent No. UA 125238 U). Ukrayins'kyi instytut intelektual'noyi vlasnosti (Ukrpatent).

24. Bohomolov, V. O., Klymenko, V. I., Leontiev, D. M., & Alexieiev, R. V. (2014, November 10). *Rehuliator rivnia pidlohy avtotransportnoho zasobu* [Vehicle floor level regulator] (Patent No. UA 94337 U). Ukrayins'kyi instytut intelektual'noyi vlasnosti (Ukrpatent).

**УДК 629.027**

## **ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ НАСЛІДКІВ БІЧНОГО УДАРУ ДЛЯ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ КАТЕГОРІЇ $M_1$**

**Михалевич Микола Григорович**, докт. техн. наук, професор кафедри автомобілів ім. А.Б. Гредескула, Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
e-mail: mkolyag@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9890-3838

**Шаповаленко Владислав Олексійович**, асистент кафедри автомобілів ім. А.Б. Гредескула, Харківський національний автомобільно-дорожній університет,  
e-mail: vladislav-shapovalenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5770-0740

Робота присвячена дослідженню та вдосконаленню систем екстреного підняття кузова транспортного засобу, що спрямована на підвищення рівня пасивної безпеки під час бокового удару. У ній розглянуто вибір принципу функціонування, визначення раціональних параметрів системи пасивної безпеки на основі пневматичної підвіски, а також можливість використання підйому кузова для зниження травматизму водія та пасажирів [1, 2]. Крім того, робота охоплює питання покращення експлуатаційних характеристик пневматичної системи підресорювання, розроблення алгоритму роботи системи екстреного підйому кузова та формування рекомендацій щодо реалізації принципу керування підвіскою.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розв'язання науково-практичного завдання підвищення пасивної безпеки автомобільного транспорту з пневматичною підвіскою за рахунок регулювання тиску у пневматичних елементах зі сторони удару та зміни характеристик амортизаторів.

Проблема підвищеного травматизму водіїв і пасажирів під час бокових зіткнень транспортних засобів категорії  $M_1$  є глобальною, оскільки такі автомобілі мають мінімальну зону деформації. Під час досліджень враховано особливості конструкції бокових частин автомобіля та вимоги міжнародних програм оцінювання безпеки (*NCAP*, *EuroNCAP*, *USNCAP* та ін.), що дозволяє комплексно оцінити ефективність бокових систем пасивної безпеки.