DOI: <https://doi.org/10.32353/khrife.1.2019.022>
УДК 343.148.6

В. К. Словінський,

кандидат технічних наук, судовий експерт-вибухотехнік Черкаського
НДЕКЦ МВС України, м. Черкаси, Україна,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6194-3171>
e-mail: vkslovinskyi@ukr.net

Г. І. Єлагін,

кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник,
інженер Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України,
м. Черкаси, Україна,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2577-6430>
e-mail: gvelagin@ukr.net

О. С. Алексєєва,

кандидат технічних наук, доцент,
провідний науковий співробітник Черкаського інституту пожежної
безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного
захисту України, м. Черкаси, Україна,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1119-4081>
e-mail: Alekseeva@ukr.net

В. В. Наконечний,

кандидат технічних наук, доцент,
інженер з охорони праці Черкаського інституту пожежної безпеки імені
Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту
України, м. Черкаси, Україна,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1081-6383>
e-mail: valnakon@gmail.com

ПОРІВНЯННЯ ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ФАКТОРІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ РІДКОГО ТА ГАЗОПОДІБНОГО АВТОМОБІЛЬНОГО ПАЛЬНОГО

Проведено аналіз потенційно небезпечних факторів при використанні в автомобілях дизельного, бензинового, метанового та пропан-бутанового пального. Доведено, що метан при використанні сертифікованого обладнання і професійному його монтажі значно безпечніше, ніж пропан-бутан і, тим більше, ніж бензин або дизельне пальне.

Ключові слова: автомобільне пальне, бензин, дизельне пальне, метан, пропан, бутан, вибух, питома густина, концентраційні межі поширення полум'я, температура самоспалахування, температура вибуху, тиск вибуху.

Постановка наукової проблеми. Постійне здороження нафти і продуктів її переробки, зокрема всіх видів рідкого автомобільного пального, провокує використання як автомобільне пальне більш дешевих його видів, зокрема горючих газів: природного (метану) та пропану і бутану, що добуваються з нафти. Одним з головних питань при цьому є питання потенційної небезпечності використання такого пального.

Власне кажучи, і бензин, і дизельне пальне, і метан, і пропанові суміші належать до речовин пожежонебезпечних. І загоряння та вибухи, на жаль, відбуваються при використанні будь-якого з них. Можна навести багато прикладів пожеж останніх років з горінням і вибухом пального і під час руху автомобіля¹, і під час стоянки², і біля АЗС³ і в гаражах⁴. При цьому горить та вибухає і рідке, і газоподібне пальне.

У роботі проведене порівняння потенційної небезпечності експлуатації автомобілів, в яких використовується рідке пальне, і автомобілів з газобалонними установками.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Зважаючи на те, що все більше користувачів переходять з рідкого пального на газоподібне, проблема вибору пального обговорюється досить широко. Розглядаються економічні⁵ і екологічні⁶ аспекти цієї проблеми, а також складність установки та обслуговування газо-балонних систем. Багато уваги приділяється порівнянню переваг і недоліків використання метану та пропан-бутанових сумішей між собою. Детально, з наведенням статистичних даних по Росії, пожежонебезпечність газобалонних автомобілів і причини в кожному випадку вибуху проаналізовано у⁷.

Мета дослідження. В даній роботі розглянуто 6 варіантів використання пального для автомобільного двигуна. Бак з бензином та системою подачі його в карбюратор і далі в циліндри двигуна, бак з дизельним паливом і системою подачі його в циліндри двигуна, газобалонна установка при монтажі балонів з метаном на даху автомобіля, газобалонна установка при монтажі балонів з метаном у багажному відсіку автомобіля, газобалонна установка при монтажі балонів з сумішшю пропану та бутану на даху автомобіля, газобалонна установка при монтажі балонів з сумішшю пропану та бутану у багажному відсіку автомобіля. При цьому аналізується потенційна

¹ В Дніпре во время движения загорелся автомобиль с двумя детьми. URL: <https://ru.tsn.ua/.../v-dnepre-vo-vremya-dvizheniya-zagorelsya-avtomobil-s-dvumya-detmi-1195215.html> (дата звернення 10.04.2017).

² На автотрассе под Житомиром сгорел автомобиль с ГБО. ВИДЕО URL: <http://zhzh.info/news/2018-11-01-37693> (дата звернення 10.04.2017).

³ У Вінниці 4 особи згоріли в автомобілі заживо. URL: <https://znaj.ua/content/u-vinnyci-chotyryosoby-orily-v-avtomobili-zazhyvo> (дата звернення 10.04.2017).

⁴ На Дніпре в результате пожара в гараже сгорел мужчина. URL: https://24tv.ua/ru/na_dnepre_v_rezultate_pozhara_v_garazhe_sgorel_muzhchina_n981223 (дата звернення 10.04.2017).

⁵ Газ VS бензин. Выгодно ли в Украине устанавливать ГБО на автомобиль. URL: <https://www.segodnya.ua/.gaz-vs-benzin-vygodno-li-v-ukraine-ustanavlivat-gbo-na-avtomobil-668480.html> (дата звернення 10.04.2017)

⁶ Эксперты рассказали, стоит ли менять бензиновый двигатель. URL: <https://ru.tsn.ua/.../eksperty-rasskazali-stoit-li-menyat-benzinovy-dvigatel-avto-na-gazovyy-416222.html> (дата звернення 10.04.2017).

⁷ Васюков Г. В., Корольченко А. Я., Рубцов В. В. Пожарная безопасность газобаллонных автомобилей. *Автомобильная промышленность*, 2006 г., № 2.

небезпечність під час руху автомобіля, а також під час зберігання його на відкритій стоянці і в закритому гаражі.

У кожному випадку за вихідні дані приймалися поширений період експлуатації — літо з температурою повітря 30⁰С та можливий витік пального і вірогідність утворення вибухонебезпечної суміші.

Упродовж 2018 році в Україні на транспортних засобах виникло 4346 пожеж (у 2017 році — 4 212 пожеж; +3,2 %), що становить 5,5 % від загальної кількості пожеж в Україні. Унаслідок цих пожеж загинуло 22 людини (у 2017 році — 18 людей; +22,2 %), що становить 1,1 % від загальної кількості загиблих в Україні. Загибелі дітей не зареєстровано (у 2017 році — 1 дитина). На згаданих пожежах отримали травми 55 людей (у 2017 році — 80 людей; – 31,3 %), у тому числі 3 дітей (у 2017 році — 1 дитина).

Пожежами знищено та пошкоджено 3 924 одиниці техніки. Матеріальні втрати від пожеж склали 972 млн 446 тис. грн., що становить 11, 7 % від загальної суми збитків.

Серед транспортних засобів найчастіше горіли:

- легкові автомобілі (3209 проти 3158 пожеж; +1,6 % або 73,8 % від загальної кількості пожеж на транспортних засобах);
- вантажні автомобілі (462 проти 448 пожеж; +3,1 % або 10,6 %);
- автобуси (285 проти 248 пожеж; +14,9 % або 6,6 %).

Причини виникнення пожеж на деяких транспортних засобах наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Причини виникнення пожеж на деяких транспортних засобах

Причини пожеж	Легкові автомобілі		Вантажні автомобілі		Автобуси	
	2018	2017	2018	2017	2018	2017
Підпал	734	802	43	47	47	48
ППБ при проведенні ел.-, газозварювальних робіт	41	30	7	2	7	4
Необережне поводження з вогнем під час паління	47	31	23	13	5	0
Необережне поводження з вогнем	64	127	22	28	9	7
Недолік технології виробництва	41	15	10	0	2	0
Перегрів (руйнування рухомих деталей) унаслідок тертя	22	10	30	16	3	1
Розгерметизація паливної (газової) системи	234	39	27	4	8	0
Несправність електросистем	1861	1872	244	273	193	169
Інші причини	165	232	56	65	11	19
Всього пожеж:	3209	3158	462	448	285	248

Найпоширеніші місця виникнення пожеж на деяких транспортних засобах наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Місця виникнення пожеж на деяких транспортних засобах

Місце виникнення пожежі	Легкові автомобілі		Вантажні автомобілі		Автобуси	
	2018	2017	2018	2017	2018	2017
Кабіна водія, салон	510	577	117	99	53	53
Відсік двигуна	2011	357	197	38	179	12
Кузов	467	494	90	106	35	33
Інше	221	1730	58	205	18	150
Всього пожеж:	3209	3158	462	448	285	248

Пожежна безпека автомобілів багато в чому визначається розташуванням паливного бака. Найбільш поширеним є той варіант, коли паливний бак розташовується позаду транспортного засобу — в багажному відсіку або під ним. Встановлення паливного бака в безпосередній близькості до двигуна, що дозволяє зменшити довжину паливопроводу і збільшити загальну надійність подачі палива, збільшує пожежну небезпеку і перевантаження коліс переднього або заднього моста відповідно до переднього чи заднього розташування двигуна. Тому в автомобілях з переднім розташуванням двигуна паливний бак розміщується позаду. На автомобілях з невеликою місткістю паливний бак розміщується збоку, знизу або ззаду. В автомобілях із заднім розташуванням двигуна паливний бак знаходиться спереду. У «безпечних» автомобілях паливні баки розташовані в межах бази автомобіля: У передньопривідного автомобіля з розташуванням двигуна спереду найбільш раціональним є розташування паливного бака за заднім сидінням. У цьому випадку знижується ймовірність загоряння палива при бічному і фронтальному ударах. У той же час ця ймовірність дещо збільшується при ударі ззаду.

До найважливіших внутрішніх джерел виникнення пожежі у автомобілі належать нагріті поверхні при порушенні герметичності паливної системи або системи змащування. У працюючому автомобілі є дві зони максимальних температур:

- моторний відсік;
- зона випускного тракту від колектора до вихлопної труби глушника.

У двигуні внутрішнього згоряння температура відпрацьованих газів по довжині випускного тракту становить 800–830 °С, а температура поверхонь 710–770 °С. Зрозуміло, що це дуже висока температура, вона вища за температуру самозаймання більшості паливно-мастильних матеріалів, які використовуються в транспортних засобах. В автомобілі паливо може накопичуватися тільки в нішах двигуна і в деяких місцях моторного відсіку. Оскільки моторні відсіки не герметизовані, в них існує інтенсивний повітрообмін з навколишнім середовищем. У цьому

випадку концентрація парів у зоні випаровування палива обмежується верхньою межею в залежності від швидкості повітря в цій зоні. При швидкості повітря 0,15–0,18 м/с концентрація парів не може перевищити 0,01 мг/л. При швидкості 0,25–0,3 м/с — 0,001 мг/л. Враховуючи, що швидкості повітря у моторних відсіках автомобілів перевищують наведені значення на порядок і більше (1,5–5 м/с), концентрація парів або палива, що накопичилось, не може досягти небезпечних значень і займання виключається¹. Але порушення герметичності паливного баку чи виливи з запасної каністри в багажному відділенні, враховуючи, що густина парів бензину або дизельного пального значно більша за густину повітря, веде до швидкої появи суміші з небезпечною концентрацією.

Бензин.

Найбільш вірогідні місця витіку бензину — витік із запасної каністри в багажнику, в гаражі або іншому місці зберігання; підтікання з бензобаку (внаслідок пошкодження його або внаслідок нещільно закритої кришки); негерметичність у системі паливопроводу або у підкапотному просторі (внаслідок негерметичності чи несправності бензонасоса чи паливопроводу).

Характерний запах бензину і добре видимі плями цієї речовини в переважній більшості випадків викликають невідкладні дії з усунення несправності.

А що буде, якщо несправність лишилася непоміченою?

Нижня концентраційна межа поширення полум'я найбільш небезпечного А–66 визначається як 0,76 % (об)², що відповідає даному показнику нонану C_9H_{20} ³. Тиск насиченої пари нонану при 30°C складає 6 мм рт. ст. Отже⁴, при даній температурі в закритому приміщенні пари бензину можуть знаходитися з концентрацією $6 \times 100 / 760 = 0,8$ об. %. Молекулярна маса нонану складає 182 атомних одиниць маси. Густина парів нонану при температурі в 30°C (303K) дорівнює $182 \times 273 / (22,4 \times 303) = 7,32$ кг/м³. Густина повітря при тих же умовах — 1,14 кг/м³. При такому співвідношенні пари бензину в-основному будуть змішуватися з повітрям в нижній частині багажника, гаража чи підкапотного простору.

¹ Расследование пожаров: учебник / под ред. Г. Н. Кириллова, М. А. Галишева, С. А. Кондратьева. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, 2007. С. 134–136.

² Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник / под ред. А. Н. Баратова и А. Я. Корольченко. Книга первая. Москва : Химия, 1990. С. 163.

³ Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник / под ред. А. Н. Баратова и А. Я. Корольченко. Книга вторая. Москва : Химия, 1990. С. 54.

⁴ Єлагін Г. І., Шкарабура М. Г., Кришталь М. А., Тищенко О. М. Основи теорії розвитку та припинення горіння. Частина 1. Черкаси, 2004. С. 145.

Потрапляння в таку суміш відкритого вогню швидше за все викличе вибух. Зрозуміло, що при безпосередньому піднесенні джерела підпалювання до поверхні рідини загоряння найбільш вірогідне. У такому випадку тепло від джерела запалювання викличе підвищення температури поверхневого шару рідини, випаровування додаткових порцій горючих парів, підвищення концентрації цих парів над поверхнею до нижньої концентраційної межі поширення полум'я, спалахування цих додаткових порцій парів з виділенням більшої кількості тепла, наростаюче збільшення кількості парів і, як наслідок, поширення полум'я на всю поверхню або вибух. Таким чином, при цій температурі витік бензину в багажнику автомобіля або в закритому гаражі швидко приведе до утворення вибухонебезпечної концентрації. У щільно закритому багажнику вибухонебезпечна концентрація за рахунок витоку із запасної каністри може утворитися навіть під час руху автомобіля. У підкапотному просторі при цій температурі під час руху знаходження парів у концентрації, більшій ніж 0,8 об. %, маловірогідне, так як під час руху цей простір провітрюється і пари, що випаровуються, відразу змішуються з надлишком повітря. Але коли автомобіль стоїть на місці і двигун працює «на холостому ході», несправності паливопроводної системи або бензонасосу можуть викликати появу парів, з видаленням яких система обдуву радіатора не впорається.

Температура самоспалахування бензинів коливається в межах від 255⁰С (для найбільш небезпечного А–66) до 435⁰С (для авіаційного 91/115)¹. Це означає, що при такій температурі загорання можливе навіть без відкритого вогню, наприклад при потраплянні бензину на розпечену поверхню глушника.

Температура згорання бензинів — у середньому 1200⁰С (1473К)². Зважаючи на те, що під час вибуху продукти згорання роботу в перший момент не виконують, і вся енергія реакції окислення переходить у теплову, температура вибуху буде на 15–20⁰С більшою³, тобто близько 1500К, що в даному випадку суттєвого значення не має. При повному перетворенні суміші нонану з повітрям у продукти згорання (вибуху) один моль нонану при реакції з 14 молями оксигену і 52,64 молями нітрогену⁴ утворює 71,64 молі продуктів згорання. Тобто об'єм суміші при гіпотетичних нормальних умовах збільшиться б у 1,06 рази. Враховуючи ж збільшення температури з 303К до 1500К можна спрогнозувати, що тиск вибуху в замкненому об'ємі дорівнюватиме $(760 \times 1,06 \times 1500) / 303 = 3980$ мм рт. ст., тобто близько 5,2 атм.

¹ Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Книга первая. С. 163.

² Там само. С. 162.

³ Єлагін Г. І., Шкарабура М. Г., Кришталь М. А., Тищенко О. М. С. 133.

⁴ Там само С. 33.

Дизельне пальне.

Як і у випадку з бензином, найбільш вірогідні місця витоку — витік із запасної каністри в багажнику, в гаражі або іншому місці зберігання; підтікання з баку (внаслідок утворення в ньому дірочок або внаслідок нещільно закритої кришки); негерметичність у системі паливопроводу або у підкапотному просторі (внаслідок негерметичності чи несправності паливного насосу).

Як і бензин, дизельне пальне має відчутний запах і утворює добре видимі плями, що викликає невідкладні дії з усунення несправності.

Вірогідність не помітити несправність і в цьому випадку дуже мала, але все-таки існує.

Найлегша фракція найбільш летючого дизельного пального марки «А» (за ГОСТ 305–82) починає википати при температурі 150⁰С, що відповідає знов-таки нонану, тиск насиченої пари якого при 30⁰С¹ складає 6 мм рт. ст. Але за фракційним складом цього вуглеводню в дизельному пальному дуже мало. Переважну більшість складають фракції, що мають температуру кипіння 255–322⁰С. Так що за модель можна взяти пентадекан з температурою кипіння 270⁰С. Нижня концентраційна межа поширення полум'я найбільш небезпечних дизельних палив марок «Л» та «З» за ГОСТ 305–82 визначається як 0,5 % (об)². Тиск насиченої пари пентадекану при 30⁰С менший за 1 мм рт. ст. Отже³, при даній температурі в закритому приміщенні пари дизельного пального можуть знаходитися з концентрацією не більше $1 \times 100 / 760 = 0,13$ об. %. Це означає, що навіть потрапляння в приміщення відкритого вогню вибуху або пожежі не викличе.

Зрозуміло, це не означає, що в такому приміщенні можна розпалювати багаття чи курити. Але випадкове потрапляння в приміщення відкритого вогню скоріше за все вибуху не викличе. Загорання тут можливе лише при безпосередньому піднесенні джерела підпалювання до поверхні рідини.

Молекулярна маса пентадекану складає 212 атомних одиниць маси. Густина парів пентадекану при температурі в 30⁰С (303К) дорівнює $212 \times 273 / (22,4 \times 303) = 8,52$ кг/м³. Густина повітря при тих же умовах — 1,14 кг/м³. Отже, пари дизельного пального, як і пари бензину, будуть змішуватися з повітрям в нижній частині багажника, гаража чи підкапотного простору. Але на відміну від парів бензину, до небезпечної концентрації при 30⁰С справа не дійде.

А от температура самоспалахування дизельних палив навіть нижча, ніж температура самоспалахування бензинів, і коливається в межах від 210⁰С (для палива марки «Л» за ГОСТ 305–82 до 370⁰С (для авіаційного

¹ Справочник химика / под. ред. В. П. Никольского. Т.1. М.-Л. : Химия, 1963. С. 654.

² Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Книга вторая. С. 266.

³ Єлагін Г. І., Шкарабура М. Г., Кришталь М. А., Тищенко О. М. С. 145.

91/115)¹. Це означає, що при такій температурі загорання можливе навіть без відкритого вогню, наприклад, при потраплянні пального на розпечену поверхню глушника. При безпосередньому піднесенні джерела підпалювання до поверхні рідини або потраплянні рідини на розпечену поверхню загорання цілком вірогідне. У такому випадку тепло від джерела запалювання або від розпеченої поверхні викличе підвищення температури поверхневого шару рідини. При температурі в 60–70⁰С випаровування додаткових порцій горючих парів викличе підвищення концентрації цих парів над поверхнею до 0, 5 % (об), тобто до нижньої концентраційної межі поширення полум'я. Спалахування цих додаткових порцій парів викличе додаткову кількість тепла, додаткову кількість парів і, як наслідок, поширення полум'я на всю поверхню або вибух.

Температура згорання дизельних палив 1100⁰С (1373К). Температура вибуху буде на 15–20⁰С більшою², тобто близько 1400К, що в даному випадку теж суттєвого значення не має. При повному перетворенні суміші пентадекану з повітрям у продукти згорання (вибуху) один моль пентадекану при реакції з 23 молями кисню і 86, 48 молями нітрогену³ утворює 117, 48 молі продуктів згорання. Тобто, об'єм суміші при гіпотетичних нормальних умовах збільшився б у 1,07 рази. Враховуючи ж збільшення температури з 303К до 1400К можна спрогнозувати, що тиск вибуху в замкненому об'ємі дорівнюватиме $(760 \times 1,07 \times 1400) / 303 = 3760$ мм рт. ст., тобто біля 5,0 атм.

Метан.

Метан, що використовується як автомобільне пальне, звичайно міститься в балонах підвищеної міцності при тиску у 200–250 атм. Балони можуть розташовуватися або в багажному відсіку, або на зовнішній поверхні транспортного засобу. Вірогідні причини витоку метану — несправність газового обладнання та нещільності в системі газопроводу. Для забезпечення можливості виявлення витоку метану його одорують додаванням невеликих кількостей речовин з дуже специфічним запахом (етилмеркаптан і інш.). Запах одоранту, що звичайно сприймається як запах метану, не помітити дуже важко. Тим не менше, потенційну небезпечність витоку недооцінювати не можна.

Нижня концентраційна межа поширення полум'я для метану дорівнює 5,28 % (об)⁴. При 30⁰С ця речовина знаходиться у газоподібному стані. Молекулярна маса метану складає 16 атомних

¹ Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Книга вторая. С. 266.

² Єлагін Г. І., Шкарабура М. Г., Кришталь М. А., Тищенко О. М. Вказана праця. С. 133.

³ Там само С. 33.

⁴ Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Книга первая. С. 466.

одиниць маси. Густина парів метану при температурі в 30°C (303K) дорівнює $16 \times 273 / (22, 4 \times 303) = 0,64 \text{ кг/м}^3$, що значно менше за густину повітря. Це означає, що в незамкненому приміщенні досягнення небезпечної концентрації практично виключається. Отже, за умови розташування балонів на зовнішній поверхні вибух виключений навіть при несправності газового обладнання. Але можливість створення вибухонебезпечної суміші в дуже щільно закритому багажному відсіку, або в гаражі існує.

Температура самоспалахування метану складає 537°C^1 , що значно вище, ніж відповідний показник для бензину чи дизельного пального.

Дані по температурі згорання метану в повітрі коливаються від 1900°C до 2160°C , в середньому 2030°C (2303K), температура вибуху буде орієнтовно 2320K . При повному перетворенні суміші метану з повітрям у продукти згорання (вибуху) один моль метану при реакції з 2 молями кисню і 7,52 молями нітрогену утворює 10, 2 моля продуктів згорання. Тобто об'єм суміші при гіпотетичних нормальних умовах взагалі не змінився б. Враховуючи ж збільшення температури з 303K до 2320K можна спрогнозувати, що тиск вибуху в замкненому об'ємі дорівнюватиме $(760 \times 2320) / 303 = 5820 \text{ мм рт. ст.}$, тобто біля 7, 7 атм.

Це більше, ніж тиск вибуху для бензину або дизельного пального.

Пропан-бутан

Суміш пропану та бутану, яка використовується в автомобілях, в літній період містить біля 40% пропану C_3H_8 та 60% бутану C_4H_{10} . Ця суміш знаходиться у рідкому вигляді в балонах під тиском до 16 атмосфер. Як і у випадку з метаном, балони можуть розташовуватися або в багажному відсіку, або на зовнішній поверхні транспортного засобу. Ті ж самі і вірогідні причини витоку газу — несправність газового обладнання та нещільності в системі газопроводу. Для забезпечення можливості виявлення витоку цю суміш також одорують додаванням речовин з неприємним запахом.

Нижня концентраційна межа поширення полум'я для пропану дорівнює 2,3 % (об)², для бутану — 1,2 % (об). Для суміші, що розглядається, за відомою формулою³: $\text{КМПП} = 100 / (40/2, 3 + 60/1,2) = 1, 5\%$ (об). При 30°C ця суміш знаходиться у газоподібному стані. Молекулярна маса пропану складає 44 атомних одиниць маси. Густина його парів при температурі в 30°C (303K) дорівнює $44 \times 273 / (22, 4 \times 303) = 1,77 \text{ кг/м}^3$. Для бутану відповідні цифри складають 58 атомних одиниць маси та $58 \times 273 / (22, 4 \times 303) = 2,33 \text{ кг/м}^3$. Густина парів суміші при цій температурі

¹ Там само.

² Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Книга вторая. С. 143.

³ Єлагін Г. І., Шкарабура М. Г., Кришталь М. А., Тищенко О. М. С. 130.

$1,77 \times 0,4 + 2,33 \times 0,6 = 2,1$ кг/м³, а це майже вдвічі більше за густину повітря при тих же умовах (1,14 кг/м³). Отже, пропан-бутанові пари змішуватимуться з повітрям переважно в нижній частині навіть незамкненого приміщення, в тому числі в нижній частині багажного відсіку автомобіля. І концентрація горючих газів в цій суміші швидко досягне позначки в 1,5% (об).

Температура самоспалахування пропану складає 470⁰С¹, бутану — 405⁰С. Це вище, ніж відповідний показник для бензину чи дизельного пального, але нижче, ніж для метану.

За підрахунками по стандартній процедурі, наприклад², теоретична температура вибуху пропану і бутану практично однакова і складає 2130⁰С (2400К).

При повному перетворенні суміші пропану з повітрям у продукти згорання (вибуху) один моль пропану при реакції з 5 молями кисню і 18, 8 молями нітрогену утворює 25,8 молів продуктів згорання. Тобто об'єм суміші пропану з повітрям при гіпотетичних нормальних умовах взагалі-то збільшився б у 25 8/24, 8=1, 04 рази.

Враховуючи ж збільшення температури з 303К до 2400К, можна спрогнозувати, що тиск вибуху в замкненому об'ємі дорівнюватиме $(760 \times 2400 \times 1, 04) / 303 = 6260$ мм рт. ст., тобто біля 8,3 атм.

Відповідно, один моль бутану при реакції з 6, 5 молями кисню і 24, 4 молями нітрогену

утворює 33, 5 молі продуктів згорання. Тобто, об'єм суміші при гіпотетичних нормальних умовах збільшився б у 33, 5/31, 9=1,05 рази.

Враховуючи ж збільшення температури з 303К до 2400К можна спрогнозувати, що тиск вибуху в замкненому об'ємі дорівнюватиме $(760 \times 2400 \times 1, 05) / 303 = 6320$ мм рт. ст., тобто також біля 8,3 атм.

Висновки. Як впливає з наведених розрахунків, найменшою потенціальною небезпекою виникнення пожежі і вибуху при використанні сучасного автомобільного пального треба визнати небезпеку використання метану. Тиск вибуху цієї речовини трохи більший за тиск вибуху рідких видів пального, але метан не здатен накопичуватися не тільки у відкритих приміщеннях, а навіть у закритих, якщо наявні найменші щілини. До того ж, з усіх розглянутих типів саме

¹ Пожаро-взрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Книга вторая. С. 143.

² Єлагін Г. І., Шкарабура М. Г., Кришталь М. А., Тищенко О. М. С. 53, 133.

метан має найвищу температуру самоспалахування. Газові балони, які звичайно монтують у багажнику або на даху автомобіля, найбільш міцні з усіх ємностей для зберігання пального і витримують значні пошкодження навіть при важких ДТП. В доступних статистичних даних стверджується, що за поточний рік пожеж і вибухів з вини метанового обладнання взагалі не зафіксовано. Натомість обладнання з пропан-бутановими установками стали причиною близько 10 % пожеж і вибухів, решта ж 90% випадків припадає на рідкі види пального.

При умові використання сертифікованого обладнання і професійного його монтажу балони з метаном та їх «обв'язка» значно безпечніші, ніж балони з пропан-бутаном і, тим паче, ніж паливні баки і каністри з рідким паливом.

References

- Avtomobil' z GBO zagorivša bilâ Kyivskoi zapravki.* URL : https://censor.net.ua/video_news/3079617/avtomobils_gbo_zagorelsya_vozle_kievskoyi_zapravki_video [in Ukrainian].
- Čto vybrat' Na avto — propan, ili metan?* URL : Auto.Today <https://auto.today/.../5938-ustanovka-gbo-cto-vybrat-propan-ili-metan.html> [in Russian].
- Èksperty rasskazali, stoit li menât' benzinovyy dvigatel'.* URL : <https://ru.tsn.ua/.../eksperty-rasskazali-stoit-li-menyat-benzinovyy-dvigatel-avto-na-gazovyy-416222.html> [in Russian].
- Êlagin, G. Î., Škarabura, M. G., Krištal, M. A., Tišenko, O. M. (2004). *Osnovi teorii rozvitu ta pripinennâ gorinnâ. Častina 1. Čerkasi* [in Ukrainian].
- Gaz VS benzin. *Vygodno li v Ukraine ustanavlivat' GBO Na avtomobil'.* URL : <https://www.segodnya.ua/./gaz-vs-benzin-vygodno-li-v-ukraine-ustanavlivat-gbo-na-avtomobil-668480.html> [in Russian].
- Kakoj gaz lučše zapravlât' v avto, metan ili propan. *Propan 24.* URL : propan24.ru/.../kakoj-gaz-luchshe-zapravlyat-v-avto-propan-ili-metan [in Russian].
- Na avtotrasse pod Žitomirom sgorel avtomobil' s GBO.* VIDEO. URL : <http://zhzh.info/news/2018-11-01-37693> [in Russian].
- Na Dnepre v rezul'tate požara v garaže sgorel mužčina.* URL : https://24tv.ua/ru/na-dnepre-v-rezultate-pozhara-v-garazhe-sgorel-muzhchina_n981223 (data zvernennia 12.05.2019) [in Russian].
- Osobennosti ustanovki GBO, o kotoryh Ne znaet zakazčik.* URL : autoportal.ua/articles/chtobudeteli/27348.html (data zvernennia 12.05.2019) [in Russian].
- Pid Slavâns'kom goriv avtomobil'.* URL : <https://karachun.com.ua/pod-slavyanskom-gorel-avtomobil-4716> [in Ukrainian].
- Požaro-vzryvoopasnost' vešestv i materialov i sredstva ih tušeniâ* (1990). Spravočnik. Pod redakcij A. N. Baratova i A. Â.Korol'čenko. Kniga pervaâ. Moskva: Himiâ (data zvernennia 12.05.2019) [in Russian].
- Požaro-vzryvoopasnost' vešestv i materialov i sredstva ih tušeniâ* (1990). Spravočnik. Pod redakcij A. N. Baratova i A. Â. Korol'čenko. Kniga vtorââ. Moskva: Himiâ [in Russian].
- Rassledovany'e požarov:* Učebny`k / Pod redakcy`ej G.N. Ky`ry`llova, M.A. Galy`sheva, S.A. Kondrat`eva, 68 ry`sunkov, 15 tably`cz. (2007). SPb.: Sankt-Peterburgsky`j un`versy`tet Gosudarstvennoj proty`vopozharnoj sluzhby. MChS Rossy`y`. [in Russian].

- Sekrety ustanovki GBO ot professional'nyh gazovshikov.* URL : www.sq.com.ua/sekrety_ustanovki_gbo_ot_ustanovschikov/ (data zvernennia 12.05.2019) [in Russian].
- Spravočnik himika* (1963). Pod. Red. V. P. Nikol'skogo. T.1. M-L: Himiâ. [in Russian].
- Температура gorenîâ DT. URL : <https://betodisel.ru/diztoplivo-temperatura-goreniya> [in Russian].
- U transporta, rabotaûšego na gaze, bol'soe buduše.* URL : <https://www.kp.ru/daily/26076/2981935/> (data zvernennia 12.05.2019) [in Russian].
- U Vinnici 4 osobi zgorili v avtomobili zaživo.* URL : <https://znaj.ua/content/u-vinnyci-chotyryosoby-orily-v-avtomobili-zazhyvo> [in Ukrainian].
- V Dnepre vo vremâ dvizheniâ zagorelsâ avtomobil' s dvumâ det'mi.* URL : <https://ru.tsn.ua/.../v-dnepre-vo-vremya-dvizheniya-zagorelsya-avtomobil-s-dvumya-detmi-1195215.html> (data zvernennia 12.05.2019) [in Russian].
- V Odesi vnoči gorili avtomobili.* URL : <https://ru.tsn.ua/v-odesse-nochyu-goreli-avtomobili-1190163.html> [in Ukrainian].
- Vasûkov, G.V., Korol'čenko, A.Â., Rubcov, V.V. (2006). Požarnaâ bezopasnost' gazoballonnyh avtomobilej. *Avtomobil'naâ promyšlennost'*. № 2 [in Russian].

В. К. Словинский, Г. И. Елагин, О. С. Алексеева, В. В. Наконечный
СРАВНЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЖИДКОГО И ГАЗООБРАЗНОГО
АВТОМОБИЛЬНОГО ТОПЛИВА

Проведен детальний аналіз потенційно небезпечних факторів при використанні в автомобілях дизельного, бензинового, метанового і пропан-бутанового палив. Розглянуто 6 варіантів використання палива: бак с бензином і системою подачі його в карбюратор і далі в циліндри двигателя, бак з дизельним паливом і системою подачі його в циліндри двигателя, газобаллонна установка при монтажі балонів с метаном на крыше автомобіля, газобаллонна установка при монтажі балонів с метаном в багажному отсеке автомобіля, газобаллонна установка при монтажі балонів с пропан-бутановою сумішшю на крыше автомобіля, газобаллонна установка при монтажі балонів с пропан-бутановою сумішшю в багажному отсеке автомобіля. При цьому аналізується потенційна небезпечність во время движенья автомобіля, а також во время нахожденья його на открытой стоянке и в закрытом гараже. В качестве исходных данных принимались распространённый период експлуатації — лето з температурой окружающего воздуха 30⁰С и возможная утечка палива с вероятностью образования взрывоопасной смеси. В качестве модели при рассмотрении бензина принят нонан, при дизельного палива — пентадекан.

Отмечено, что температура самовоспламенения бензинов колеблется в пределах от 255⁰С до 435⁰С, нижним концентрационным пределом взрываемости бензина можно считать значение 0,76 % об., а при выбранных условиях в закрытом помещении пары бензина могут находиться в концентрации до 0,8 об. %. Удельная плотность паров дизельного палива при тех же условиях составляет 8,52 кг/м³. При взрыве давление в закрытом объеме достигнет 5,2 атм.

Температура самовоспламенения дизельных палив колеблется в пределах от 210⁰С до 370⁰С, нижним концентрационным пределом взрываемости дизельного палива можно считать значение в 0, 5 % об., а при выбранных условиях в закрытом помещении пары дизельного палива могут находиться в концентрации до 0,13 об.%. При взрыве давление в закрытом объеме достигнет 5,0 атм.

Температура самовоспалення метана становить 537°C , нижній концентраційний межу вибуховості цього газу дорівнює 5,28 % (об). Густина парів метана при температурі в 30°C (303K) дорівнює $0,64\text{ кг/м}^3$, що значно менше густини повітря. Давлення вибуху в закритому об'ємі досягне 7,7 атм.

Пропан-бутанова суміш, що використовується в літній період, містить близько 40% пропану і 60% бутану. Температура самовоспалення пропану становить 470°C , бутану — 405°C . Розрахований нижній концентраційний межу вибуховості цієї суміші — 1, 5% (об), а густина парів суміші при температурі в 30°C — $2,1\text{ кг/м}^3$, що майже вдвічі більше густини повітря при тих же умовах. Розраховане тиск вибуху в закритому об'ємі досягне 8,3 атм.

Зроблено висновок про те, що при використанні сертифікованого обладнання і при професійному його монтажі, метан, який не здатний накопичуватися в нижній частині приміщення або будь-якого відсіку, значно безпечніше, ніж пропан-бутан і, тим більше, ніж бензин або дизельне паливо, густина парів яких більше густини повітря.

Ключові слова: автомобільне паливо, бензин, дизельне паливо, метан, пропан, бутан, вибух, густина, концентраційні межі вибуховості, температура самовоспалення, температура вибуху, тиск вибуху.

V. Slovinskyi, G.Yelagin, Y. Alexeieva, V.Nakonetcnyi
COMPARISON OF POTENTIALLY DANGEROUS FACTORS WITH THE
USE OF RARE AND GASILY VEHICLE

A detailed analysis of the potentially dangerous factors in the use of diesel, gasoline, methane and propane-butane fuels was carried out in cars. A detailed analysis of potentially dangerous factors when using diesel, gasoline, methane and propane-butane fuels in automobiles has been carried out. 6 options of fuel usage are considered: a tank with gasoline and a system supplying it to the carburetor and further to the engine cylinders, a tank with diesel fuel and the system feeding it to the engine cylinders, gas cylinder installation when installing cylinders with methane on the roof of the car, gas cylinder installation when mounting cylinders with methane in the luggage compartment of the car, gas installation when installing cylinders with propane-butane mixture on the roof of the car, gas installation when installing cylinders with propane-butane mixture in the cargo compartment of the car. Meanwhile, the potential danger while the vehicle is in motion is analyzed, as well as while it is in the open parking lot and in the garage. As the initial data, the common operation period was taken – in summer with the temperature of 30°C and possible fuel leakage with the probability of formation of an explosive mixture. Nonane is taken as a model when considering gasoline, and Pentadecane is used for diesel fuel.

It was noted that the gasoline self-ignition temperature ranges from 255°C to 435°C , the lower concentration limit of petrol explosiveness can be considered as 0.76% vol., while under selected conditions indoors, gasoline vapor can reach the concentration of up to 0.8 vol. %. The relative vapor density of diesel fuel under the same conditions is 8.52 кг/м^3 . With the explosion, the pressure in the closed volume will reach 5.2 atm.

It was noted that the gasoline self-ignition temperature ranges from 210°C to 370°C , the lower concentration limit of petrol explosiveness can be considered as 0.5 % vol., while under selected conditions indoors, gasoline vapor can reach the concentration of up to 0.13 vol. %. With the explosion, the pressure in the closed volume will reach 5.0 atm.

The self-ignition temperature of methane is 537°C, the lower concentration limit of explosiveness of this gas is 5.28% (vol). The vapor density of methane at the temperature of 300°C (303K) is 0.64 kg/m³, which is significantly less than the density of air. The explosion pressure in the closed volume will reach 7.7 atm.

The propane-butane mixture used in summer contains about 40% of propane and 60% of butane. Spontaneous ignition temperature of propane is 4700C, butane is 4050C. The calculated lower explosion limit of this mixture is 1.5% (vol), and the vapor density of mixture at the temperature of 300°C is 2.1 kg/m³, which is almost twice the density of air under the same conditions. The calculated explosion pressure in the closed volume will reach 8.3 atm.

It was concluded that when using certified equipment which is professionally installed, methane, which cannot accumulate in the lower part of the room or any compartment, is much safer than propane-butane and, especially, than gasoline or diesel fuel, as vapor densities of both are more than air density.

Keywords: automobile fuel, gasoline, diesel fuel, methane, propane, butane, explosion, relative density, explosion limits, self-ignition temperature, explosion temperature of explosion, pressure of explosion.

Надійшла до редколегії 12.06.2019 р.