

Шифр «Зниження токсичності дизеля»

**ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДІВ АЗОТУ ЗА
РАХУНОК КОНВЕРТАЦІЇ ДИЗЕЛЬНИХ
ДВИГУНІВ НА ГАЗОВІ ПАЛИВА**

АНОТАЦІЯ

Актуальність

Дослідження показали, що дизельні двигуни, що конвертуються на альтернативні палива, мають досить високі тягові, динамічні та економічні характеристики, а завдяки екологічній безпеці значно перевершують базові дизельні двигуни. Однією з найбільших екологічних проблем на сучасному етапі розробки конструкцій двигунів внутрішнього згорання є викиди оксидів азоту в вихлопних газах і ця проблема є найбільш гострою для сучасних дизельних двигунів, що працюють на дуже бідних паливних сумішах. Тому зниження викидів оксидів азоту в дизельних двигунах шляхом конвертації їх на газові палива є актуальним завданням фахівців з проектування та експлуатації двигунів внутрішнього згорання.

Мета і завдання

Мета роботи – зниження викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах дизельних двигунів конвертованих на газове паливо. Це необхідно для зниження реальних викидів канцерогенних речовин дизельних двигунів. На практиці конвертація дизельних двигунів на газ дозволить забезпечити не тільки зменшення витрат на паливо, але і суттєво нижчі викиди токсичних компонентів від дизельних двигунів.

Для вирішення вказаної мети виносяться такі завдання:

- розробити математичну модель розрахунку викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах дизельних двигунів та двигунів конвертованих на пропан-бутанову суміш;
- встановити закономірності зміни викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах двигуна при роботі на дизельному паливі та при роботі на пропан-бутановій суміші на сталій частоті обертання колінвала в залежності від навантаження;
- встановити закономірності зміни викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах двигуна при роботі на дизельному паливі та при роботі на пропан-

бутановій суміші в залежності від частоти обертання колінчастого вала двигуна.

Методики досліджень

Застосовані методи математичного моделювання засновані на основі теорії горіння та основних засадах термічної теорії; використані аналітичні та емпіричні методи теорії двигунів внутрішнього згорання. Експериментальні випробування та дослідження проведені на автомобільних двигунах внутрішнього згорання з використанням сучасних вимірювальних пристроїв та реєстраційної апаратури. Обробка результатів експериментів проводилась на основі кореляційного та регресійного аналізу з використанням прикладних комп'ютерних програм.

Загальна характеристика роботи

Розроблена математична модель розрахунку викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах дизельних двигунів та двигунів переобладнаних на газове паливо. Виконані в лабораторних умовах експериментальні дослідження дизельного двигуна моделі X17DTL автомобіля Опель Астра на викиди оксидів азоту у відпрацьованих газах дизельного двигуна та двигуна конвертованого на газове паливо.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1. Аналіз літературних джерел щодо конвертації на газове паливо дизельних двигунів.....	6
2. Створення математичної моделі розрахунку викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах дизельного двигуна та двигуна конвертованого на газове паливо.....	13
3. Методи та матеріали експериментальних досліджень викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах дизельного та конвертованого двигуна.....	17
4. Результати експериментальних досліджень викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах дизельних двигунів, які конвертовані на газове паливо.....	20
5. Обговорення результатів досліджень викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах конвертованого дизельного двигуна.....	23
Висновки.....	24
Список літератури.....	25

ВСТУП

Запаси нафти в надрах Землі невпинно зменшуються. За оптимістичними прогнозами, при існуючих розвіданих запасах і об'ємах видобутку нафти, її вистачить людству приблизно на п'ятдесят років. Другим енергоресурсом в якості моторного палива після нафти є природний газ. В даний час газ як моторне паливо застосовується в більшості держав світу. Низька ціна та високі екологічні характеристики сприяють зростанню використання газу в якості моторного палива.

Дослідження показують, що дизельні двигуни, які переобладнані на альтернативні палива, мають досить високі тягові, динамічні та економічні характеристики, а за своєю екологічною безпекою навіть істотно перевершують базові дизельні двигуни. Це дає підстави стверджувати, що для вирішення комплексної загальносвітової проблеми зниження темпів споживання рідких нафтових палив необхідно істотно збільшувати кількість силових приводів з двигунами, що працюють на альтернативних газових паливах, а для цього, в числі інших напрямів, слід створити для двигунів автомобільного транспорту та інших установок технології конвертації існуючих зараз дизельних силових приводів в газові двигуни. При цьому конвертовані в такі газові двигуни дизельні силові приводи забезпечать зниження негативного впливу двигунів на навколишнє середовище.

Однією з найбільших екологічних проблем на сучасному етапі розвитку конструкцій двигунів внутрішнього згорання є викиди у вихлопних газах оксидів азоту, причому найбільш гостро ця проблема стоїть для сучасних дизельних двигунів, які працюють на дуже збіднених паливних сумішах. Тому зниження викидів оксидів азоту у дизельних двигунах шляхом їхнього переведення на газові палива є актуальним завданням для фахівців в галузі проектування та експлуатації двигунів внутрішнього згорання.

1. Аналіз літературних джерел щодо конвертації на газове паливо дизельних двигунів

Про суттєві перспективи переобладнання дизельних двигунів у газові з іскровим запалюванням свідчить створення моногазових двигунів провідними світовими виробниками автомобільних двигунів та автомобілів, які вже широко використовуються на автомобільному транспорті. Причому переобладнання дизельних двигунів здійснюється як на зріджену пропан-бутанову суміш (рис.1), так і на стиснутий або зріджений природний газ (рис. 2) [1].



Рисунок 1 - Frightliner 120 на пропан-бутане



Рисунок 2 – Автомобіль Volvo-460 на зрідженому метані

В зазначеному напрямку проводять роботи такі відомі світові концерни як Frightliner, Cammins, Volvo, MAN, Mercedes, Scania, Iveco та інші, які вже розробили для комерційної техніки на основі існуючих дизельних двигунів газові з іскровим запалюванням.

Більш детально зупинимось на аналогічних роботах з переобладнання дизельних двигунів у газові, які проводились в країнах колишнього радянського простору.

Одним з найбільш потужних автовиробників, де здійснюється конвертація дизельних двигунів є автозавод КамАЗ, де вже до десятка моделей автомобілів пропонуються для роботи на газомоторному паливі. Наприклад, автозаводом пропонується споживачам автомобіль КамАЗ-65115-32 (рис. 3), дизельний двигун якого конвертований під стиснутий природний газ [2]. У конверто-

ваному двигуні демонтовані дизельні форсунки та встановлені свічки запалювання з індивідуальними котушками, а камера згорання в поршні розточена так, щоб ступінь стиску двигуна знизилась з 17,0 до 12,0. У впускній системі двигуна встановлений газоповітряний змішувач та два дозатора подачі газоповітряної суміші на кожний ряд циліндрів. Паливна система автомобіля КамАЗ-65115-32 складається з балонів стиснутого газу в кількості 9 штук, загальний об'єм балонів складає 182 м³ стиснутого природного газу при максимальному тиску 20 МПа. Потужність конвертованого двигуна залишилось такою ж самою, як і у базового дизельного двигуна – 221 кВт (300 к.с.)

Цікавою є тенденція обладнання автобусів дизельними двигунами конвертованими на газ. Наприклад, тільки Нефтекамський автомобільний завод на даний момент випускає сім! моделей автобусів, які працюють на газомоторному паливі [3]. В гамі продукції Нефтекамського автомобільного заводу є міські, приміські і навіть шкільні автобуси. Для прикладу розглянемо модель автобуса НЕФАЗ-5299-0000040-51 (рис. 4). Пасажиромісткість автобуса – 116 чол., повна маса – 18800 кг. Двигун встановлюється виробництва Мерседес-Бенц, моделі М906 LAG.EEV/1, робочим об'ємом – 6,8 л, потужністю – 205 кВт. Паливо у автобуса НЕФАЗ-5299-0000040-51 – стиснутий природний газ.



Рисунок 3 - Автомобіль КамАЗ-65115-32 Рисунок 4 - Автобус НЕФАЗ-5299-0000040

Досить нетрадиційну концепцію LNG, тобто криогенно-зріджений метан вирішили впроваджувати на Мінському автомобільному заводі [4] на шасі з мотором ЯМЗ-536 (рис.5). Головна перевага перед стиснутим метаном у крио-

генно-зрідженого – більший запас ходу. Середня витрата палива автомобіля – 35 літрів на 100 км, що забезпечує запас ходу в 1440 км. Крім того, криогенно-зріджений метан дещо дешевше за стиснутий природний газ.

Бак для криогенно-зрідженого метану об'ємом 450 літрів та вміщує паливо, кількість якого еквівалентна 308 кубічним метрам стиснутого природного газу. Інакше кажучи, для стиснутого природного газу це був би тридцять один 50-літровий балон, маса яких складала би близько двох тонн. Виграш в цій масі дає прибавку в вантажопідйомності автомобіля і одночасно суттєво спрощує компоновку газової апаратури. Основна проблема криогенно-зрідженого метану: зріджений газ зберігається криогенним способом при температурі близько -190°C . Бак може витримати ці параметри за температури навколишнього середовища плюс $20-40^{\circ}\text{C}$ до двох тижнів, після чого аварійні клапани почнуть скидання тиску.



Рисунок 5 - Газобалонна система автомобіля МАЗ-536 на зрідженому метані

Ще однією цікавою тенденцією є обладнання спецтехніки дизельними двигунами конвертованими на газ.

Наприклад, АТ „Клинцевській автокрановий завод” випускає модель автокрана КС-55713-5К-1 (рис. 6) вантажопідйомністю 25 тон на стиснутому метані [5]. За інформацією від заводу-виробника витрати на паливо знижуються на 70 % при забезпеченні потужності конвертованого двигуна на тому ж рівні, як і у базового дизеля. Згідно технічної документації АТ „Клинцевській автокрановий завод” крім зменшення витрат на паливно-мастильні матеріали та-

кож додатково знижуються викиди шкідливих речовин більше, як в два рази. Загальний об'єм встановлених балонів складає 1040 літрів ($9 \cdot 80\text{л} + 2 \cdot 160\text{л}$), що дозволяє закачувати в систему живлення двигуна 208 м^3 метану.

Досить амбітну програму випуску спецмашин реалізовує Арзамаській завод комунального машинобудування [6], де зараз споживачам пропонується три моделі автомобілів з спеціальними кузовами, які призначені для роботи на стисненому природному газі. Наприклад, заводом випускається модель КО-829БГ для обслуговування та ремонту автомобільних доріг (рис. 7). Паливна система автомобіля КО-829БГ складається з балонів для стиснутого газу в кількості 13 штук, які змонтовані в спеціальному каркасі за кабіною автомобіля. Загальний об'єм балонів складає 1120 літрів або 224 м^3 стиснутого природного газу (при тиску 20 МПа). Двигун – конвертований на метан сучасний дизель під екологічні норми Євро-4 з турбонаддувом та охолоджувачем надувного повітря (інтеркулером) робочим об'ємом 11,76 літра та максимальною потужністю 221 кВт (300 к.с.)



Рисунок 6 - Автокран моделі КС-55713-5К-1 з двигуном на стиснутому метані

Є досвід використання конвертованих дизельних двигунів в газіві, що встановлені на спецтехніку і в Україні. Наприклад, на КраЗе випускається модель КраЗ-5401 з двигуном Mercedes-Benz M906LAG (рис. 8), що працює на метані, потужністю 280 к.с. [7]. Паливна система автомобіля КраЗ-5401 складається з балонів для стиснутого газу в кількості 9 штук, загальний об'єм яких складає 1155 літрів стиснутого природного газу за максимального тиску 20

МПа. Були виконані промислові випробовування автомобіля та встановлено, що витрата метану, в середньому, для автомобіля КраЗ-5401 складає 35 м³ га-зу. Витрата дизпалива в тих же умовах для аналогічного автомобіля КраЗ-Н12.2 на дизпаливі, склала, в середньому, 32 літра.

При роботі двигунів внутрішнього згорання оксиди азоту утворюються в наслідок окислення азоту киснем повітря у процесі згорання палива. Дослідження процесів утворення оксидів азоту під час горіння різноманітних палив досліджувались в роботах [8–12].

Встановлено, що в утворенні оксидів азоту бере участь як азот з атмосферного повітря [8], так і азот, який може міститись у паливі [9]. Кількість оксидів азоту під час горіння палив залежить, в основному, від типу двигуна [10], режимів роботи двигуна [11], параметрів робочого процесу та навколишнього середовища [12].



Рисунок 7 - Спецавтомобіль КО-829БГ **Рисунок 8 - Спецавтомобіль КраЗ-5401**

Питанням утворення оксидів азоту в дизельних двигунах присвячені роботи [13, 14]. З'ясовано, що одним з основних чинників, який впливає на кількість оксидів азоту, є температура горіння в камері згорання [13]. Причому основна кількість оксидів азоту утворюється в дизельних двигунах під час першої фази горіння [14].

В НАМІ виконувались стендові випробовування дизельного двигуна Д-240 [15], який працював при подаванні парів метанолу. Під час експериментів визначались ефективний ККД двигуна, димність, вмісти оксидів вуглецю, ок-

сидів азоту, вуглеводнів. Встановлено, що у залежності від режимів роботи двигуна вміст оксидів азоту знижувався до двох разів.

В ТГСХА були проведені експериментальні випробовування дизельного двигуна 6ЧН 13/11,5 при його експлуатації на дизельному паливі з подачею метилового спирту у рідкій фазі [16]. Результати випробовувань показали, що при роботі на дизельного двигуна на альтернативних сумішах знижувалась температура горіння в камері згорання, що призводило до зменшення вмісту оксидів азоту на 4-10 %.

Дослідження газового двигуна, створеного на базі дизельного двигуна ЯМЗ-236НЕ виконувались на Ярославському моторному заводі [17]. Двигун було обладнано системою запалювання та газобалонною апаратурою з електронним управлінням. Газовий двигун комплектувався штатною системою нейтралізації відпрацьованих газів. Електронна система живлення автоматично забезпечувала оптимальний склад газоповітряної суміші для забезпечення досягнення мінімальних показників токсичності відпрацьованих газів. Базовий двигун за викидами шкідливих речовин з відпрацьованими газами відповідав вимогам Правил ЕЕК ООН ЄВРО-3 і додатково зменшив викиди оксидів азоту на 30 % в порівнянні з роботою на дизельному паливі.

В ІФНТУНГ були виконані стендові випробовування дизельного двигуна Д21А1 при роботі на сумішах дизельного палива та сивушних оливах [18]. Експерименти показали, що при збільшенні частки сивушних оливах у паливних сумішах вміст оксидів азоту зростає на 5-15 %.

Дослідження дизельного двигуна УК-2 при використанні як палива рапсової оливи та сумішей дизпалива та рапсової оливи були проведені в Алтайському ГТУ ім. І. І. Ползунова [19]. Експерименти показали, що при додаванні рапсової оливи в діапазоні від 0 до 20 % викиди оксидів азоту суттєво знижувались.

В Уфимському ГАТУ виконувались дослідження по використанню на дизельних двигунах в якості палива спиртів [20]. На базі дизельного двигуна 1Ч 12/14 була створена експериментальна установка та встановлено, що при ви-

користанні в суміші 50 % метилового спирту досягалось зменшення викидів оксидів азоту на 30 %.

Розробка та оцінка каталізаторів для видалення оксидів азоту з вихлопних газів дизельного двигуна були виконані фахівцями Токійського університету [21]. Були досліджено впливу різних конструкцій систем рециркуляції вихлопних газів на викиди оксидів азоту. Але поза увагою авторів дослідження залишився зв'язок між викидами оксидів азоту та потужністю, що відбирається від двигуна.

Дизельний двигун Д-240 білоруського виробництва був переобладнаний у Луцьком національному технічному університеті в газовий двигун [22]. Особливістю технології конвертації даного дизельного двигуна в газовий було те, що зменшення ступеня стиску до 12,0 було досягнуто за рахунок встановлення трьох штатних прокладок загальною товщиною 4,5 мм між головкою і блоком циліндрів. Були проведені експериментальні дослідження сумарного токсичного ефекту від згорання газового палива та зниження окремих компонентів відпрацьованих газів. Але в роботі не було з'ясовано, як впливає на викиди оксидів азоту частота обертання колінчастого вала двигуна.

Вченими ХПІ була запропонована методика комплексної оцінки забруднення навколишнього середовища двигунами, які працюють на альтернативних паливах [23]. Методика заснована на типовому алгоритмі оцінки збитків від викидів в навколишнє середовище та побудована на аналізі комплексного критерію, що враховує експлуатаційні витрати палива двигунами та викиди нормованих токсичних компонентів відпрацьованих газів. Але адекватної математичної моделі для опису механізмів утворення оксидів азоту авторами запропоновано не було.

Велика увага приділяється викидам оксидів азоту, сажі та карбонільних сполук дизельних та бензинових двигунів легкових автомобілів за нормами Euro 4 та Euro 5 [24]. Тести були проведені на чотирьох транспортних засобах Euro 5 та на двох автомобілях Euro 4 на автомобілях із дизельними двигунами, оснащеними аддитивними та каталітичними фільтрами. Результати показали,

що в порівнянні з циклами гарячого запуску цикли холодного старту збільшили викиди всіх забруднювачів до двох разів. Але авторами була присвячена недостатня увага перевірці результатів на динамометричному стенді.

Статистичні дані по 39 дизельних пасажирських автобусів норм Euro 6 на тестовому маршруті зібрані американськими фахівцями [25]. Результати показали велику розбіжність викидів оксидів азоту на міських маршрутах в залежності від марки транспортного засобу. Середні викиди оксидів азоту на міських маршрутах в 4,5 рази перевищували встановлені нормами Euro 6. Але авторами не було встановлено зв'язків між викидами оксидів азоту та частотами обертання колінвалів двигунів на міських маршрутах.

Таким чином, на даний момент розроблена значна кількість конвертованих на газ дизельних двигунів та існує потреба визначення вмісту у відпрацьованих газах дизельних двигунів, переобладнаних на газове паливо, токсичних компонентів, в тому числі вмісту оксидів азоту r_{NO} , але відсутні адекватні математичні моделі, які це дозволяють зробити.

2. Створення математичної моделі розрахунку викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах дизельного двигуна та двигуна конвертованого на газове паливо

Розроблена математична модель дозволить виконувати розрахунки викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах та температур горіння палива у камері згорання дизельних двигунів, конвертованих на газове паливо на різних режимах роботи.

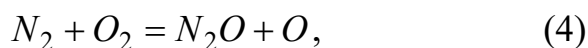
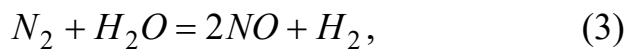
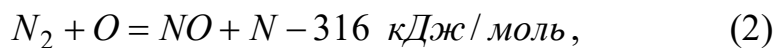
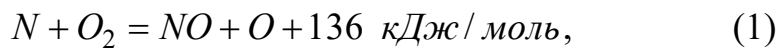
При згоранні газового палива в дизельному двигуні, конвертованому на газ, оксиди азоту утворюються внаслідок реакції окислення азоту киснем повітря. При цьому в реакції окислення, в основному, бере участь азот з атмосферного повітря, але за наявності азоту у паливі зазначений азот також буде брати участь у процесі утворення оксидів азоту під час згорання.

В методиці розрахунків будемо ґрунтуватись на основних засадах термічної теорії:

- кількість оксидів азоту визначається максимальною температурою горіння та концентраціями азоту і кисню в продуктах згорання;
- кількість оксидів азоту залежить від швидкості охолодження продуктів згорання;
- утворення діоксидів азоту відбувається інтенсивніше в умовах більш бідної паливно-повітряної суміші;
- окислення азоту відбувається внаслідок ланцюгового механізму та в зоні продуктів згорання.

При розрахунках прийняті наступні основні припущення: кількість оксидів азоту не залежить від хімічної природи палива; температури та тиски в зоні продуктів згорання однакові у всіх точках камери згорання в даний момент циклу двигуна; продукти згорання однорідні за составом.

В загальному механізм утворення оксидів азоту складається з наступних реакцій:



Основними оксидами, що утворюються у вихлопних газах двигунів внутрішнього згорання є NO та N_2O .

Виходячи з рівнянь (1-5) знайдемо швидкість утворення NO та N_2O з наступних кінетичних рівнянь:

$$\frac{dr_{NO}}{d\tau} = K_{V1}^r \cdot r_N \cdot r_{O_2} - K_{R1}^r \cdot r_{NO} \cdot r_O + K_{V2}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_O - K_{R2}^r \cdot r_{NO} \cdot r_N + K_{V3}^r \cdot r_N \cdot r_{H_2O} - K_{R3}^r \cdot r_{NO} \cdot r_H^2 + K_{V4}^r \cdot r_{N_2O} \cdot r_{O_2} - K_{R4}^r \cdot r_{NO}^2, \quad (6)$$

$$\frac{dr_{N_2O}}{d\tau} = K_{V5}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_{O_2} - K_{R5}^r \cdot r_{N_2O} \cdot r_O + K_{R4}^r \cdot r_{NO}^2 - K_{V4}^r \cdot r_{N_2O} \cdot r_O. \quad (7)$$

де $r_N, r_{O_2}, r_{NO}, r_O, r_{N_2}, r_{H_2O}, r_H, r_{N_2O}$ – концентрації $N, O_2, NO, O, N_2, H_2O, H, N_2O$; $K_{V_1}^r, K_{R_1}^r, K_{V_2}^r, K_{R_2}^r, K_{V_3}^r, K_{R_3}^r, K_{V_4}^r, K_{R_4}^r, K_{V_5}^r, K_{R_5}^r$ – константи швидкостей реакції $(\% \cdot c)^{-1}$.

Застосуємо принцип стаціонарної концентрації для оксиду діазоту N_2O , за яким приймемо, що швидкість його утворення буде дорівнювати нулю $\frac{dr_{N_2O}}{d\tau} = 0$. Тоді об'ємна концентрація оксиду діазоту N_2O згідно з (7) буде

дорівнювати

$$r_{N_2O} = \frac{K_{V_5}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_{O_2} + K_{R_4}^r \cdot r_{NO}^2}{r_O \cdot (K_{R_5}^r + K_{V_4}^r)}. \quad (8)$$

Підставляючи (8) в (6) одержимо

$$\begin{aligned} \frac{dr_{NO}}{d\tau} = & K_{V_1}^r \cdot r_N \cdot r_{O_2} - K_{R_1}^r \cdot r_{NO} \cdot r_O + K_{V_2}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_O - \\ & - K_{R_2}^r \cdot r_{NO} \cdot r_N + K_{V_3}^r \cdot r_N \cdot r_{H_2O} - K_{R_3}^r \cdot r_{NO} \cdot r_H^2 + \\ & + K_{V_4}^r \cdot r_{O_2} \cdot \frac{K_{V_5}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_{O_2} + K_{R_4}^r \cdot r_{NO}^2}{r_O \cdot (K_{R_5}^r + K_{V_4}^r)} - K_{R_4}^r \cdot r_{NO}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

Для переведення констант швидкості з $\frac{cm^3}{mоль \cdot c}$ у $(\% \cdot c)^{-1}$ використаємо

$$r_{V_1}^r = \frac{K^c \cdot p}{8,314 \cdot 10^6 \cdot T},$$

де p – тиск робочого тіла в камері згорання, Па.

Константи швидкостей хімічних реакцій прийняті на підставі аналізу літературних джерел [26-30] та наведені в табл. 1.

Визначимо швидкість утворення оксидів азоту від кута повороту колінчастого валу з диференційного рівняння утворення оксидів азоту від часу (9)

враховуючи, що $\tau = \frac{\varphi}{6n}$.

Таблиця 1 - Константи швидкостей хімічних реакцій

Константа, $\frac{см^3}{моль \cdot с}$	Джерело
$K_{V_1}^r = 1,33T \cdot e^{\left(-\frac{29600}{RT}\right)}, (10) \quad K_{R_1}^r = 3,2 \cdot 10^9 \cdot T \cdot e^{\left(-\frac{163700}{RT}\right)}. (11)$	[26]
$K_{V_2}^r = 1,36 \cdot 10^{14} \cdot e^{\left(-\frac{315700}{RT}\right)}, (12) \quad K_{R_2}^r = 3,12 \cdot 10^{13} \cdot e^{\left(-\frac{1670}{RT}\right)}. (13)$	[27]
$K_{V_3}^r = 4,2 \cdot 10^{13}, (14) \quad K_{R_3}^r = 1,3 \cdot 10^{14} \cdot e^{\left(-\frac{22865}{T}\right)}. (15)$	[28]
$K_{V_4}^r = 1,0 \cdot 10^{14} \cdot T \cdot e^{\left(-\frac{14092}{T}\right)}, (16) \quad K_{R_4}^r = 8,59 \cdot 10^9 \cdot T^{0,69} \cdot e^{\left(-\frac{32210}{T}\right)}. (17)$	[29]
$K_{V_5}^r = 1,52 \cdot 10^{11} \cdot T^{0,71} \cdot e^{\left(-\frac{53940}{T}\right)}, (18) \quad K_{R_5}^r = 1,0 \cdot 10^{14} \cdot T \cdot e^{\left(-\frac{14092}{T}\right)}. (19)$	[30]

Залежність швидкості утворення оксидів азоту від градусів кута повороту колінчастого валу запишемо у вигляді квадратного рівняння

$$\frac{dr_{NO}}{d\varphi} = A + B \cdot r_{NO} + C \cdot r_{NO}^2, \quad (20)$$

$$\text{де } A = \frac{p}{49,884 \cdot T \cdot n} \cdot \left(K_{V_1}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_{O_2} + K_{V_2}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_O + \frac{K_{V_5}^r \cdot r_{N_2} \cdot r_{O_2} \cdot K_{R_4}^r}{K_{R_5}^r + K_{V_4}^r} \right), \quad (21)$$

$$B = \frac{p \cdot (K_{R_1}^r \cdot r_{O_2} + K_{R_2}^r \cdot r_{N_2})}{49,884 \cdot T \cdot n}, \quad (22)$$

$$C = \frac{p}{49,884 \cdot T \cdot n} \cdot \left(\frac{K_{R_5}^r \cdot K_{R_4}^r}{K_{R_5}^r + K_{V_4}^r} \right). \quad (23)$$

Проінтегрувавши (20) одержимо

$$\frac{r_{NO} + \frac{B}{2C} - \sqrt{\frac{B^2 - 4AC}{4C^2}}}{r_{NO} + \frac{B}{2C} + \sqrt{\frac{B^2 - 4AC}{4C^2}}} = e^{\left(2 \cdot C \cdot \sqrt{\frac{B^2 - 4AC}{4C^2}} \cdot (\varphi + const) \right)}. \quad (24)$$

Позначимо $\beta = \sqrt{\frac{B^2 - 4AC}{4C^2}}$. Тоді об'ємна концентрація оксидів азоту r_{NO}

може бути визначена з рівняння

$$r_{NO} = \frac{\pm \left(\frac{B}{2C} + \beta \right) \cdot \left| \frac{r_{NO} + \frac{B}{2C} - \beta}{r_{NO} + \frac{B}{2C} + \beta} \right| \cdot e^{\left(2 \cdot C \cdot \beta \cdot (\varphi + const) - \frac{B}{2C} + \beta \right)}}{1 \pm \left| \frac{r_{NO} + \frac{B}{2C} - \beta}{r_{NO} + \frac{B}{2C} + \beta} \right| \cdot e^{(2 \cdot C \cdot \beta \cdot (\varphi + const))}}. \quad (25)$$

У рівнянні (25) якщо $r_{NO} > \beta - \frac{B}{2C}$ приймається знак „плюс”, якщо $r_{NO} < \beta - \frac{B}{2C}$ приймається знак „мінус”.

Отже, виразом (25) описана математична модель, яка дозволяє визначити вихідну концентрацію оксидів азоту у відпрацьованих газах переобладнаних на газове паливо дизельних двигунів в залежності від вихідних параметрів: констант швидкостей хімічних реакцій, початкової концентрації оксидів азоту, зміни кута повороту колінчастого вала двигуна та температури згорання газо-повітряної суміші. Діапазон зміни температури згорання паливно-повітряних сумішей коливається в межах 1800–2400 К, кут повороту колінчастого вала змінювався в діапазоні 0–720°.

3. Методи та матеріали експериментальних досліджень викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах дизельного та конвертованого двигуна

Метою експериментальних досліджень є перевірка розробленої математичної моделі розрахунків викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах дизельних двигунів, конвертованих на газове паливо. Для виконання поставленої задачі на кафедрі автомобільного транспорту в
 було переобладнано для роботи на зрідженій

пропан-бутановій суміші дизельний двигун моделі X17DTL автомобіля Опель Астра (рис. 9).

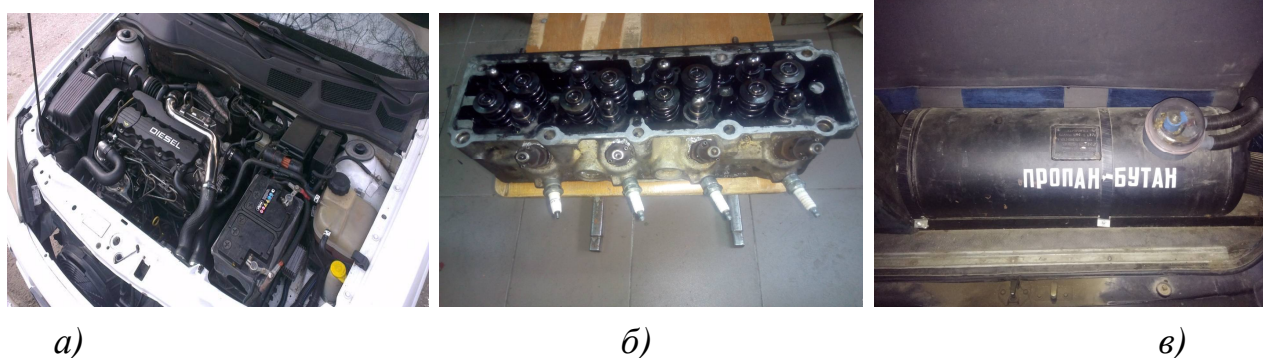


Рисунок 9 - Дизельний легковий автомобіль Опель Астра конвертований на пропан-бутанову суміш: а - дизельний двигун моделі X17DTL; б – головка блока переобладнаного двигуна; в – газобалонна апаратура

Коротка технічна характеристика переобладнаного дизельного двигуна моделі X17DTL автомобіля Опель Астра наведена в табл. 2.

Вказаний автомобіль та двигун були виготовлені в 2000 р. та на момент початку досліджень пробіг автомобіля склав 186 тис. км. Компресія в циліндрах двигуна складала $2,95 \pm 0,05$ МПа.

Для переведення дизельного двигуна моделі X17DTL автомобіля Опель Астра на газ було виконано наступне: знижена степінь стиску двигуна; змонтовано пропан-бутанову газову апаратуру італійського виробництва; встановлена оригінальна мікропроцесорна DIS-система запалення розробки кафедри автомобільного транспорту; оптимізована робота системи управління двигуном.

Моторні дослідження виконувались на електричному гальмівному стенді КИ-8964 ГОСНИТИ з діапазоном зміни гальмівної сили 1,0-16,0 кН. Стенд складається з таких основних вузлів: блока барабанів лівого, блока барабанів правого, пульта управління, пульта дистанційного управління, педометра, вмикача педального. Загальний вигляд стенду КИ-8964 ГОСНИТИ та проведення експериментальних досліджень проілюстровано на рис. 10.

Таблиця 2 – Коротка технічна характеристика переобладнаного дизельного двигуна моделі X17DTL автомобіля Опель Астра

№ п/п	Назва параметра	Значення
1	Базовий двигун	Дизельний, з електронною системою впорскування Bosch EDC 15M
2	Конвертований двигун	Газовий (пропан-бутанова суміш), з системою електронного управління розробки ІФНТУНГ
3	Робочий об'єм двигуна, см ³	1669
4	Номінальна потужність, кВт (к.с.)	50 (68)
5	Частота обертання колінвала при експлуатаційній потужності, об./хв.	4500
6	Степінь стиску базового дизельного двигуна	22,0
7	Степінь стиску конвертованого газового двигуна	13,1

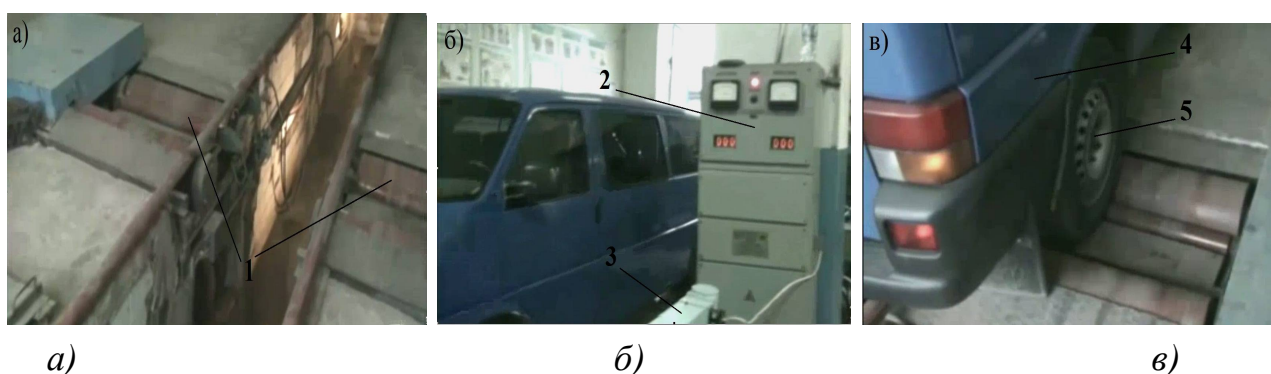


Рисунок 10 - Загальний вигляд стану КИ-8964 ГОСНИТИ:

а – блок барабанів; б – пульт управління; в – проведення експериментальних досліджень; 1 – бігові барабани стану; 2 – вимірювальний блок; 3 – пульт дистанційного керування; 4 – транспортний засіб; 5 – колеса

Паливний бак автомобіля дизельним паливом марки Л виробництва Кременчугського НПЗ. Тиск відкриття форсунок складав 13,5-13,9 МПа. Об'ємні частки оксидів азоту вимірювались газоаналізатором „Автотест-02.03П”. Діапазон вимірювань оксидів азоту складає 0-5000 ppm, абсолютна похибка вимірювань – ± 10 ppm. При визначенні температур відпрацьованих газів використовувались термопари типу «хромель-копель» та логометр-потенціометр УП-2М. Для порівняльної оцінки екологічних показників двигуна на газовому паливі з відповідними показниками базового дизельного двигуна знімались навантажувальні характеристики двигуна на частотах обертання колінчастого валу 1000 об./хв., 1800 об./хв., 2600 об./хв., 3400 об./хв.

4. Результати експериментальних досліджень викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах дизельних двигунів, які конвертовані на газове паливо

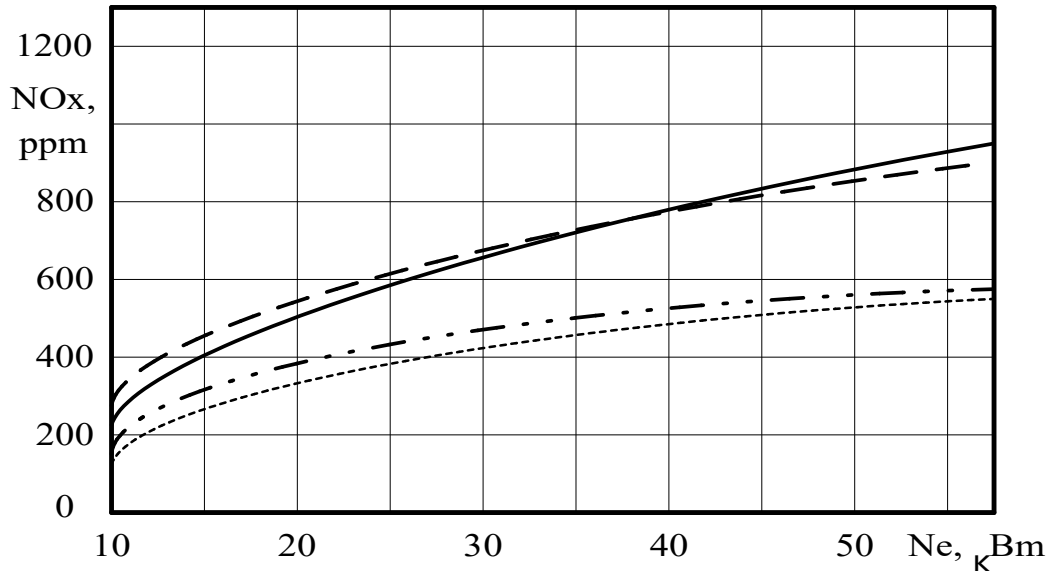
На рис. 11 зображені залежності викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах дизельного двигуна моделі X17DTL автомобіля Опель Астра при роботі на дизельному паливі та при роботі на пропан-бутановій суміші на частоті обертання колінвала 1800 об./хв. в залежності від зміни навантаження.

За результатами проведених експериментів можна зазначити, що при використанні пропан-бутанової суміші у порівнянні з використанням дизельного палива у двигуна моделі X17DTL автомобіля Опель Астра відбулось суттєве зниження викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах у всьому навантажувальному режимі.

Так, при роботі на дизельному паливі при відбиранні потужності 10 кВт викиди оксидів азоту у відпрацьованих газах базового двигуна моделі X17DTL автомобіля Опель Астра склали 255 ppm, а при роботі конвертованого двигуна на пропан-бутановій суміші – 135 ppm. Або зниження викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах склало 47,1 %.

При роботі на дизельному паливі при відбиранні потужності 50 кВт викиди оксидів азоту у відпрацьованих газах базового двигуна моделі X17DTL

склали 945 ppm, а при роботі конвертованого двигуна на пропан-бутановій суміші – 570 ppm. Або зниження викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах двигуна склало 39,7 %.



- работа двигуна на дизельному паливі, експериментальна залежність;
- - - работа двигуна на дизельному паливі, теоретична залежність;
- работа двигуна на газовому паливі, експериментальна залежність;
- ··· - работа двигуна на газовому паливі, теоретична залежність;

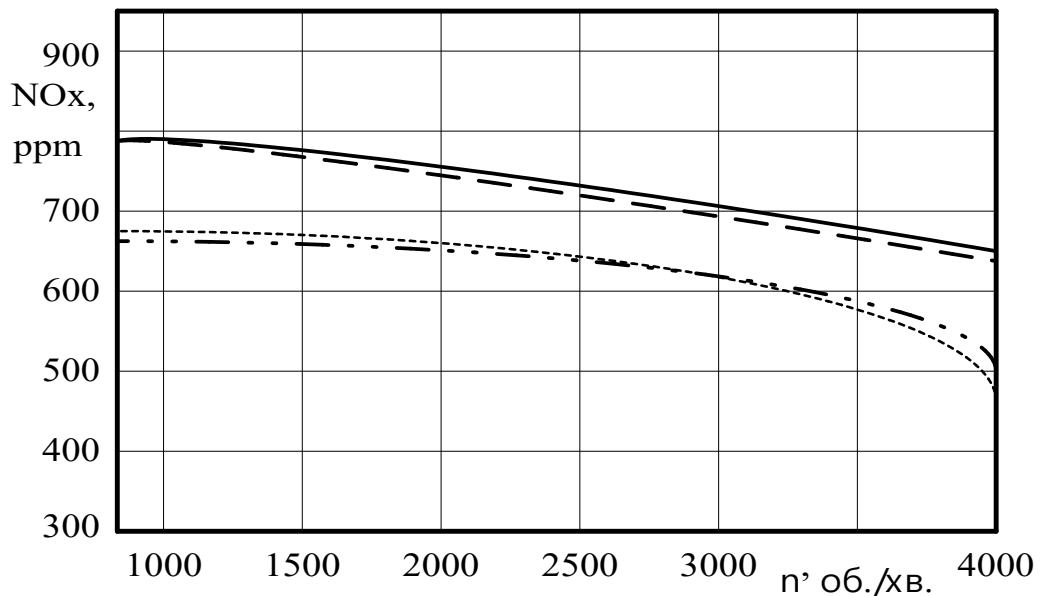
Рисунок 11 - Залежності викидів оксидів азоту NO_x у відпрацьованих газах дизельного двигуна моделі X17DTL автомобіля Опель Астра при роботі на дизельному паливі та при роботі на пропан-бутановій суміші на частоті обертання колінвала 1800 об./хв. в залежності від зміни навантаження N_e

На рис. 12 зображені залежності викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах дизельного двигуна моделі X17DTL автомобіля Опель Астра при роботі на дизельному паливі та при роботі на пропан-бутановій суміші в залежності від частоти обертання колінчастого вала.

Так, при роботі базового двигуна моделі X17DTL автомобіля Опель Астра на дизельному паливі при частоті обертання колінчастого вала 1000 об./хв. спостерігається відносно незначне зниження викидів оксидів азоту у відпра-

цьованих газах з 790 ppm до 680 ppm при роботі конвертованого двигуна на пропан-бутановій суміші, або на 13,9 %.

Але при роботі базового двигуна моделі X17DTL на дизельному паливі на високій частоті обертання колінчастого вала 4000 об./хв. спостерігається суттєво вище зниження викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах з 655 ppm до 475 ppm при роботі конвертованого двигуна на пропан-бутановій суміші, або на 27,5 %.



- работа двигуна на дизельному паливі, експериментальна залежність;
- - - - работа двигуна на дизельному паливі, теоретична залежність;
- работа двигуна на газовому паливі, експериментальна залежність;
- ··· - работа двигуна на газовому паливі, теоретична залежність;

Рисунок 12 - Залежності викидів оксидів азоту NO_x у відпрацьованих газах дизельного двигуна моделі X17DTL автомобіля Опель Астра при роботі на дизельному паливі та при роботі на пропан-бутановій суміші в залежності від частоти обертання колінчастого вала n

Перевірка адекватності математичної моделі здійснювалась в наступному порядку. Одержувались теоретичні криві викидів оксидів азоту за математичною моделлю та експериментальні осцилограми викидів. Отримані теоретичні криві та осцилограми описуються поліноміальними моделями, а характер

зміни експериментальних осцилограм та теоретичних кривих викидів оксидів азоту майже однаковий.

Далі згідно плану симетричного повного факторного експерименту встановлювались значення параметрів в точках плану, за якими методом найменших квадратів визначались коефіцієнти для поліноміальних моделей. Після чого, використовуючи значення викидів оксидів азоту, розрахованих за математичною моделлю та одержаних експериментально, визначали дисперсію адекватності. Далі за повторними дослідженнями в середніх точках визначали дисперсію дослідження.

Перевірка адекватності поліноміальних моделей виконувалась за критерієм Фішера F . Розраховані за дисперсіями значення критерію Фішера $F_{експ}$ порівнювались з теоретичними даними $F_{м.м.}$. Якщо $F_{м.м.} < F_{експ}$, то з певною ймовірністю модель можна вважати адекватною. Надійна ймовірність складає 95 %, оскільки при перевірці адекватності моделі застосовувались таблиці критерію Фішера при 5 % рівнів значимості.

Результати експериментів засвідчили, що значення викидів оксидів азоту отримані за математичною моделлю відрізнялись від дослідних в діапазоні від 1,7 % до 4,6 %. Відмінність теоретичних та експериментальних даних можна пояснити відмінністю енергетичних характеристик та технічного стану реального двигуна від прийнятих в моделі.

5. Обговорення результатів досліджень викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах конвертованого дизельного двигуна

Проведені експерименти дозволяють розширити базу даних щодо протікання робочих процесів в перспективних конструкціях дизельних двигунів, конвертованих на газове паливо. У результаті проведених лабораторних досліджень відпрацьованих газів конвертованих на пропан-бутан дизельних двигунів встановлені закономірності зміни викидів оксидів азоту двигуна X17DTL автомобіля Опель Астра при роботі на дизпаливі та на газу.

Отримані результати зниження викидів оксидів азоту при роботі двигуна

на газу у порівнянні з роботою на дизпаливі при зміні навантаження на 39,7–47,1 % пояснюються меншою температурою горіння газоповітряної суміші у порівнянні з температурою горіння дизельно-повітряної суміші. Так, розрахована температура горіння для двигуна X17DTL на газу склала 2207 К, а на дизпаливі – 2346 К. Викиди оксидів азоту у відпрацьованих газах двигуна на змінній частоті обертання колінчастого валу при роботі на пропан-бутановій суміші на 13,9–27,5 % нижче у порівнянні з дизпаливом, що пояснюються меншим на 30–60 % коефіцієнтом надлишку повітря газових двигунів у порівнянні з дизельними.

Перевірка адекватності математичної моделі розрахунків викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах дизеля та газового двигуна шляхом порівняння розрахункових даних з результатами експериментів показала, що модель задовільно описує викиди оксидів азоту. Зокрема, показники викидів оксидів азоту у відпрацьованих газах дизельного двигуна та двигуна конвертованого на газове паливо отримані в експерименті та розраховані згідно запропонованої математичної моделі відрізняються до 4,6 %.

Одержані теоретичні результати дані добре корелюються з результатами експерименту. Запропонована математична модель може бути використана для оцінки екологічності вихлопних газів дизельних та газодизельних двигунів, але вона не може бути використана для бензинових двигунів. Подальші дослідження будуть пов'язані з вивченням викидів оксидів вуглецю у відпрацьованих газах конвертованих на газове паливо дизельних двигунів.

ВИСНОВКИ

Таким чином, у результаті проведених теоретичних досліджень розроблена математична модель розрахунку викидів оксидів азоту NO_x у відпрацьованих газах дизельних двигунів та двигунів конвертованих на газове паливо.

У результаті проведених в лабораторних умовах експериментальних досліджень дизельного двигуна моделі X17DTL автомобіля Опель Астра на ви-

киди оксидів азоту NO_x у відпрацьованих газах дизельного двигуна та двигуна конвертованого на газове паливо встановлені закономірності зміни:

– викидів оксидів азоту NO_x у відпрацьованих газах двигуна при роботі на дизельному паливі та при роботі на пропан-бутановій суміші на сталій частоті обертання колінвала в залежності від зміни навантаження;

– викидів оксидів азоту NO_x у відпрацьованих газах двигуна при роботі на дизельному паливі та при роботі на пропан-бутановій суміші в залежності від частоти обертання колінчастого вала.

Одержані результати дозволяють оптимізувати конструкції систем живлення двигунів внутрішнього згорання та знизити викиди шкідливих речовин у відпрацьованих газах автомобільних двигунів. Подальші дослідження будуть пов'язані з вивченням викидів оксидів вуглецю у відпрацьованих газах конвертованих на газове паливо дизельних двигунів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Марков В.А. Работа дизелей на нетрадиционных топливах / В.А Марков, А.И. Гайворонский, Л.В. Грехов. – М.: Изд-во «Легион-Автодата». – 2008. – 464 с.

2. Автомобиль-самосвал КамАЗ-65115-32 [Электронный ресурс]. – Электрон. текст. дан. – Режим доступа к источнику: <http://kamaz33.ru/motor-vehicle-kamaz/gazomotornye-avtomobili/avtomobili-samosvaly-na-metane/samosval-kamaz-65115-32.html>

3. Каталог продукции ООО „НЕФАЗ” [Электронный ресурс]. – Электрон. текст. дан. – Режим доступа к источнику:
<http://www.nefaz.ru/products/buses/>

4. Выставка „Газ на транспорте-2015” (GasSuf-2015) [Электронный ресурс]. – Электрон. текст. дан. – Режим доступа к источнику:
<http://rusautomobile.ru/2015/10/tri-v-odnom/>

5. Автокран КС-55713-5К-1 на метане. [Электронный ресурс]. – Электрон. текст. дан. – Режим доступа к источнику:

http://www.oaokaz.ru/catalog/Kranyi_na_gazomotornom_toplive_copy/KS-55713-5K-1_Na_metane/

6. Завод Коммаш. Комбинированная дорожная машина КО-829БГ [Электронный ресурс]. – Электрон. текст. дан. – Режим доступа к источнику:

https://www.kommash.ru/ru/catalogue/production/na_metane_kdm/ko_829bg/

7. Автомобиль моделі КрАЗ-5401 [Электронный ресурс]. – Электрон. текст. дан. – Режим доступа к источнику:

<https://mpark.pro/specialization/258-kraz-5401-skip-lift.html>

8. Гиринович, М.П. Исследование процессов образования оксидов азота при сгорании топлив в перспективных дизелях [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Гиринович Михаил Петрович. – М, 2006. – 123 с.

9. Звонов, В. А. Образование оксидов азота при сгорании альтернативных топлив в дизеле [Текст] / В. А. Звонов, А. С. Теренченко // Автомобильная промышленность. - 2003 - № 3. - С. 10 - 13.

10. Скрыбин, М. Л. Влияние установочного угла опережения впрыскивания топлива на характеристики сгорания и содержание оксидов азота в цилиндре дизеля с турбонаддувом и промежуточным охлаждением наддувочного воздуха 4ЧН 11,0/12,5 [Текст] / М. Л. Скрыбин // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания. Материалы II Всероссийской науч.-практ. конф. «Наука-Технология-Ресурсосбережение»: Сборник научных трудов - Киров: Вятская ГСХА, 2008. - Вып. 5. - С. 194 - 197.

11. Толшин, В. И. Упрощенный метод оценки оксидов азота в отработавших газах судовых дизелей в эксплуатации [Текст] / В. И. Толшин // Сборник научных трудов по проблемам двигателестроения. - М., 2005. - С. 152 - 156.

12. Лиханов, В. А. Изменение образования оксидов азота в цилиндре дизеля при работе на метаноле [Текст] / В.А. Лиханов, А.А. Анфилатов // Тракторы и сельхозмашины. - 2015. - № 4. - С. 3 - 5.

13. Лопатин, О.П. Влияние применения метанола на показатели процесса

сгорания, объемное содержание и массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе с ДСТ в зависимости от угла поворота коленчатого вала на номинальном режиме [Текст] / О.П. Лопатин, А.А. Анфилатов // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания. Мат. II Всерос. науч.-практ. конф. «Наука - Технология – Ресурсосбережение»: сборник научных трудов - Киров: Вятская ГСХА, 2008. - Вып. 5. - С. 137-144.

14. Лиханов, В.А. Влияние применения метанола и МЭРМ на массовую концентрацию оксидов азота в цилиндре дизеля 2Ч 10,5/12,0 при работе с ДСТ в режиме максимального крутящего момента [Текст] / В.А. Лиханов, В.Н. Копчиков, А.В. Фоминых // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания. Мат. IX междунар. науч.-практ. конф. «Наука-Технология-Ресурсосбережение»: сб. науч. тр. - Киров: Вятская ГСХА, 2016. - Вып. 12. - С. 195 - 198.

15. Тереченко, А. С. Экологическая безопасность автомобильных дизелей в полном жизненном цикле [Текст:] Автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.04.02 / Тереченко Алексей Станиславович. - Москва, 2013. - 20 с.

16. Смирнов, А.Ю. Улучшение эффективных и экологических показателей автотракторных дизелей с наддувом путем подачи метанола на впуске [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Смирнов Артём Юрьевич. - Тверь: ТГСХА, 2009. - 19 с.

17. Кутенёв, В.Ф. Разработка газового двигателя на базе дизеля ЯМЗ – 236НЕ: [Электронный ресурс] / В.Ф. Кутенёв, В.А. Лукшо // Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт – 2007. – Режим доступа к источнику: <http://www.nami.ru/subdivisions/engines/energy-efficient-technologies/development/>

18. Kryshchtopa S. Experimental Research on Diesel Engine Working on a Mixture of Diesel Fuel and Fusel Oils [Text] / S. Kryshchtopa, L. Kryshchtopa, V. Melnyk, I. Prunko, B. Dolishnii, Ya. Demianchuk // Transport Problems. – Poland, Gliwice, 2017. – Volume 12, Issue 2. – p. 53-63.

19. Матиевский, Д.Д. Применение топлива на основе рапсового масла в дизелях [Текст] / Д.Д. Матиевский, С.П. Кулманаков, С.В. Лебедев, А.В. Шашев // Ползуновский вестник. - 2006. - № 4. - С. 118 - 127.

20. Салимзянова, А.А. Снижение загрязнения атмосферы при добавлении спиртов в качестве топлива в ДВС [Текст] / А.А. Салимзянова, Х.М. Ор-Рашид, Н.В. Кострюкова // Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2012): сб. науч. статей IX-й Международной науч.-техн. конф. - Уфа: УГАТУ, 2012. - Том I. - С. 170-175.

21. Iwasaki M. Development and evaluation of catalysts to remove NO_x from diesel engine exhaust gas [Text] / M. Iwasaki [et al.] // SAE Paper. - 1995. - № 950748. - 11 p.

22. Захарчук В. І. Розрахунково-експериментальні дослідження газового двигуна, переобладнаного з дизеля. / Захарчук В. І., Сітовський О. П., Козачук І. С. // Автомобильный транспорт. Сб. научн. тр. – Харьков: ХНАДУ. – 2005. – Вып. 16. – С. 276-278.

23. Парсаданов И. В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия / И. В. Парсаданов. – Харьков: НТУ"ХПИ", 2003. – 244 с.

24. Miller W. The development of urea-SCR technology for US heavy duty trucks / W. Miller, J. Klein, R. Mueller, W. Doelling, J. Zuerbig // SAE technical paper. - 2000. - № 2000-01-0190.

25. Fritz N. On-road demonstration of NO_x emission control for diesel trucks with SINO_x / N. Fritz, W. Mathes, J. Zuerbig, R. Mueller // SAE technical paper. – 1999. - № 1999-01-0111.

26. Bowman C. T. Kinetics of Nitric Oxide Formation in Combustion Processes / C.T. Bowman // 16 - The Symposium Of Combustion. Pittsburgh. - 1998. – P. 243.

27. Bracco F.V. Nitric Oxide Formation in Droplet Diffusion Flames. Proceedings of Fourteenth International Symposium on Combustion [Text] / F.V. Bracco // The Combustion Institute. - 1993. - P. 831 - 838.

28. Wray, K.L. Shock-Tube Study of the Kinetics of Nitric Oxide at High Temperatures [Text] / K.L. Wray, J.D. Teare // Journal of Chemical Physics 36, Vol. 10. - 1992. - S. 2582 - 2596.

29. Matsui, J. Spectroscopic study of prompt nitric oxide formation mechanism in hydrocarbon-air flames [Text] / J. Matsui, T. Nomaguchi // Combustion and Flames. - 1998. - V. 32 - p. 205 - 214.

30. Nagai, T. Reduction of NOx Emission in Medium-speed Diesel engines / T. Nagai, M. Kawakami // SAE Techn. Pap. Ser. - 1999. - № 891917. - P. 1-15.