

FRI- 20.21-1-TMS-13

INVESTIGATION OF SPARK-IGNITION ENGINE EMISSIONS CHARACTERISTICS  
WORKING WITH ISOPROPANOL-N-BUTANOL-ETHANOL (IBE)<sup>13</sup>

**Eng. Plamen Kotsev, PhD Student**  
Department of Engines and Vehicles,  
“Angel Kanchev” Univesity of Ruse  
Tel.: (+359) 0887 028 263  
E-mail: [pkotsev@uni-ruse.bg](mailto:pkotsev@uni-ruse.bg)

**Assoc. Prof. Simeon Iliev, PhD**  
Department of Engines and Vehicles,  
“Angel Kanchev” Univesity of Ruse  
Phone: (+359) 082 888 331  
E-mail: [spi@uni-ruse.bg](mailto:spi@uni-ruse.bg)

**Abstract:** *The paper reviews the emissions characteristics of a spark ignition (acronym-SI) engine fuelled with gasoline port injection and isopropanol-n-butanol-ethanol (acronym IBE) direct injection. The intermediate fermentation product IBE is considered as a potential candidate for alternative fuel to be blended with gasoline. In order to achieve maximum efficiency, highest power output and lowest exhaust emissions different mixture ratios between IBE and gasoline have to be used according to different engine working conditions (load, rpm range and temperature). Via using dual fuel injection method, different fuel mixture ratios can be achieved directly by the fuel injection system and premixing of fuels can be avoided. Using a dual fuel inection system can reduce some of the components of the harmful exhaust emissions.*

**Keywords:** *isopropanol, bio-n-butanol, ethanol, gasoline port injection, IBE direct injection.*

## ВЪВЕДЕНИЕ

С прилагането на политиката за въглеродна неутралност по целия свят, производителите на двигатели с вътрешно горене (ДВГ) ще се сблъскват с все повече предизвикателства. Въпреки, че насърчаването на електрическите превозни средства с батерии и електрически превозни средства с горивни клетки е свързано намаляване на въглеродните емисии, все още има много проблеми за решаване. Електрическите превозни средства с батерии могат да достигнат нулеви локални въглеродни емисии поради използването на електрическа енергия при шофиране, но все още се отделят голямо количество въглеродни емисии по време на процеса на производство на батерии. Освен това, е важно по какъв начин се произвежда електрическата енергия за зареждане на батериите. Използването на изкопаеми горива за производство на електрическа енергия допринася за общото количество отделени въглеродни емисии при използване на електрически превозни средства. Дали електрическите превозни средства с батерии могат да намалят въглеродните емисии, трябва да се измерва от целия жизнен цикъл на превозното средство (Iliev S. 2021).

Електрическите превозни средства с горивни клетки привлякоха много внимание, тъй като емисиите им съдържат само вода. Въпреки това, разходите за използване на електрически превозни средства с горивни клетки са високи поради високите им производствени разходи и високите изисквания за чистота на водорода. Следователно, ДВГ ще продължи да бъде основният източник на енергия за дълго време в областта на транспорта и намирането на методи, чрез които ДВГ да достигнат въглеродна неутралност е от важно значение. За да се постигне целта за въглеродна неутралност, възобновяемите горива се превърнаха важна точка на изследванията в областта на

<sup>13</sup> Докладът е представен на студентската научна сесия на 24 октомври 2025 г. в секция Транспорт и Машинознание с оригинално заглавие на български език: Изследване На Характеристиките На Емисиите На Двигателите С Искрово Запалване, Работещи С Изопропанол-N-Бутанол-Етанол.

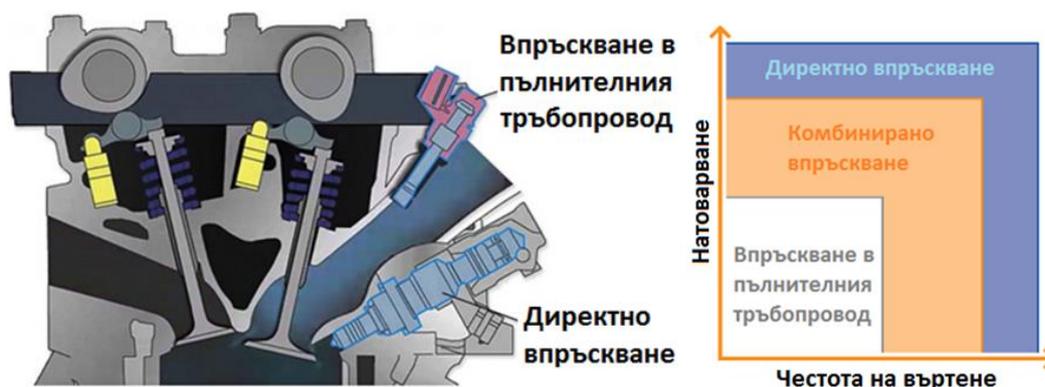
ДВГ. Водородът е конкурентен на пазара на възобновяеми горива, защото двигател работещ с водород няма въглеродни емисии. Транспортирането, съхранението и зареждането с водород обаче са проблеми, които трябва да бъдат решени спешно. В същото време, поради особеностите на водорода, двигателя работещ с водород трябва да бъде преработен, за да се избегнат проблеми като детонация, обратно запалване и ниска енергийна плътност. В същото време биоалкохолът показва предимства за въглеродна неутралност. Биоалкохолът може да се произвежда чрез ферментация на слама, целулоза и селскостопански отпадъци и въглеродът в суровините идва от  $\text{CO}_2$ , фиксиран от културите чрез фотосинтеза. Приложението на алкохоли в двигателите с вътрешно горене има много предимства: енергийната плътност на алкохола е много по-висока от тази на водорода и двигателят може директно да използва алкохол без прекалено много модификации. Междувременно, бензиностанциите могат също да се използват за зареждане с алкохол след модификации, а цената е много по-ниска от тази за изграждане на станции за зареждане на водород. Следователно, използването на възобновяеми алкохоли е приложимо. Приложението на алкохол в двигател с принудително възпламеняване може да се раздели на два случая, единият е едновременно захранване с алкохол и бензин, а другият е захранване с чист алкохол. Съществува проблем за чистия алкохол при студен старт на двигателя поради по-високата скрита топлина на изпаряване на алкохола. Освен това, поради ниската енергийна плътност на алкохола, специфичният разход на гориво се увеличава и пробегът се намалява за превозно средство с чист алкохол. Следователно е трудно чистият алкохол да бъде широко използван в двигатели с вътрешно горене и двигателите, работещи едновременно с алкохол и бензин, са по-често срещани. В момента метанолът, етанолът и бутанолът са основните използвани алкохоли в двигателите с вътрешно горене (Yoro, K., Daramola, M. 2020).

В двигателите с принудително възпламеняване, бутанолът е по конкурентоспособен поради високата си енергийна плътност и ниската корозия на горивната система.

## **ИЗЛОЖЕНИЕ**

### **Двигатели с принудително възпламеняване и комбинирано впръскване на горивото.**

Във връзка с нарастващите изисквания за висока икономичност и висока литрова мощност, двигателите с принудително възпламеняване все по-често използват горивна уредба за директно впръскване на горивото в цилиндри на двигателя. От друга страна нарастват и екологичните изисквания към двигателя, за изпълняването на които, някои производители добавят допълнително впръскване на гориво в пълнителния тръбопровод на двигателя. Комбинирана система за впръскване позволява да се използват предимствата на всеки тип впръскване на гориво. Всяка от двете системи работи в зависимост от режима на работа на двигателя. В настоящия момент алкохолите като алтернативни биогорива за двигателите с принудително възпламеняване се добавят и смесват към основното гориво бензин предварително. При комбиниран тип горивна уредба би могло да се реализира подаване на две различни горива, като в случая впръскването на бензин е в пълнителния тръбопровод, а алкохолното гориво се впръсква директно в цилиндъра. По този начин смесването на алкохола и бензина се осъществява непосредствено по време на приготвяне на горивната смес. В настоящия доклад разглеждаме отделението на вредни емисии при работата на двигател с директно впръскване на алтернативно гориво - смес от изопропанол-бутанол-етанол (IBE) и впръскване на бензин в пълнителния тръбопровод.



Фиг. 1. Схема на комбинирано впръскване на горивото.

### Предимства на комбинирано впръскване на ИВЕ и бензин

Двигателите с принудително възпламеняване и директно впръскване на бензин отделят по-голямо количество твърди частици в отработените газове и също така по-голямо количество азотни оксиди в сравнение с двигателите с впръскване в пълнителния колектор. Причина за образуването на твърди частици е намаленото време за смесообразуване в цилиндъра, а за увеличеното количество азотни оксиди е работата с бедни горивни смеси с излишък на въздух и повишена температура в горивната камера. За покриване на стандарт за вредни емисии **Euro 6d** е необходимо прилагане на филтър за твърди частици. Директното впръскване на алкохолно гориво (ИВЕ) намалява количеството на твърди частици поради по-пълното изгаряне вследствие от наличието на кислород в самото гориво. Също така при определено въздушно отношение се намалява и количеството на азотните оксиди поради охлаждащото действие на алкохолното гориво по време на смесообразуването (Huang, Gu, Cai, X., Gong, Z., Wu, J., Lee, C.-F. 2012).



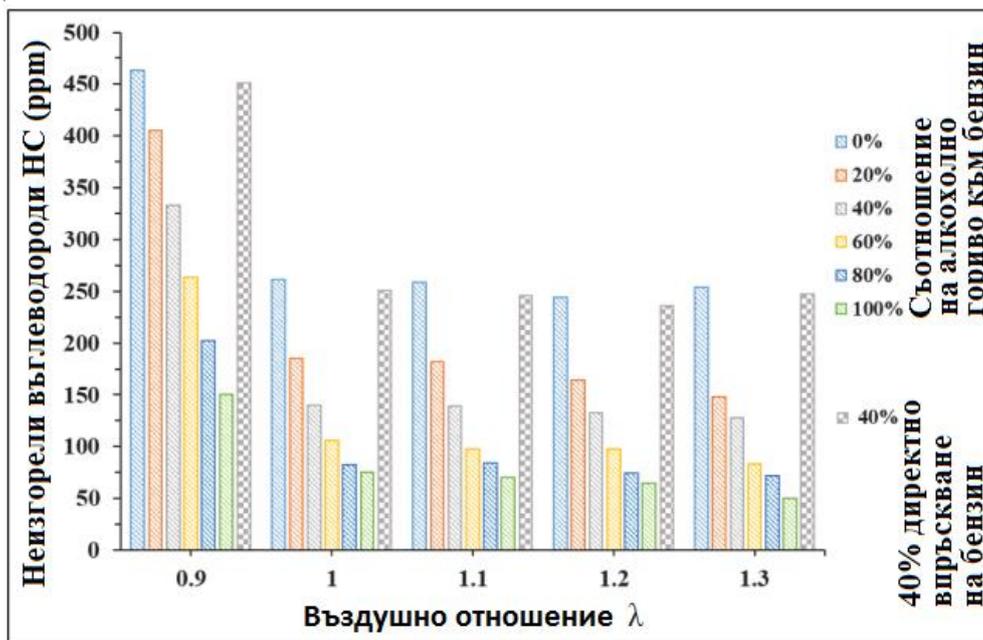
Фиг. 2 Стандарти за вредни емисии в отработените газове.

### Емисии на неизгорели въглеводороди (НС)

Фиг. 3 илюстрира ефектите на съотношението на алкохолно гориво бензин върху емисиите на неизгорели въглеводороди (НС) при различни стойности на въздушното отношение  $\lambda$ . Експерименталните резултати показват, че с увеличаване на  $\lambda$  емисиите на неизгорели НС от режим само на впръскване на гориво в пълнителния колектор първо намаляват и след това се увеличават, достигайки най-малката стойност при  $\lambda = 1.2$ . В сравнение с работния режим на впръскване само в пълнителния, емисиите на неизгорели НС на тестовия двигател намаляват, когато процентното съотношение на директно впръскване на бензин е 40%, тъй като налягането на директно впръскване е по-високо от налягането на впръскване в пълнителния колектор, което позволява по-добро раздробяване на капките и смесване на бензин и въздух, намалявайки диаметъра на капките бензин и увеличавайки относителната повърхност за изпарение между бензина и въздуха и по този начин намалявайки емисиите на неизгорели НС. Законът на промяна на емисиите на неизгорели НС се променя след добавяне на алкохолно гориво, като колкото по-високо е  $\lambda$ , толкова по-ниски са емисиите на неизгорели НС. Емисии на неизгорели НС идват главно от частичното изгаряне на

горива. Когато  $\lambda$  се повиши, общото количество гориво намалява. Това помага за намаляване на съдържанието на неизгорели НС. При по-нататъшно увеличаване на  $\lambda$ , над  $\lambda = 1.3$ , емисиите на неизгорели въглеводороди се увеличават. Тъй като сместа е толкова бедна, пламъкът се разпространява бавно и нестабилно, което прави невъзможно част от бензина да изгори напълно.

Междувременно добавянето на алкохолна смес намалява емисиите на неизгорели въглеводороди при всички стойности на  $\lambda$ ; с увеличаване на съотношението на алкохолно гориво, емисиите на неизгорели въглеводороди намаляват. В сравнение с чист бензин, когато  $\lambda$  е 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3, използването на единствено на чиста алкохолна смес намалява емисиите на неизгорели въглеводороди съответно с 67.5%, 71.1%, 72.9%, 73.4% и 80.3%. Промяната в режима на впръскване и състава на горивото в цилиндъра повлияват едновременно на емисиите на неизгорели въглеводороди.



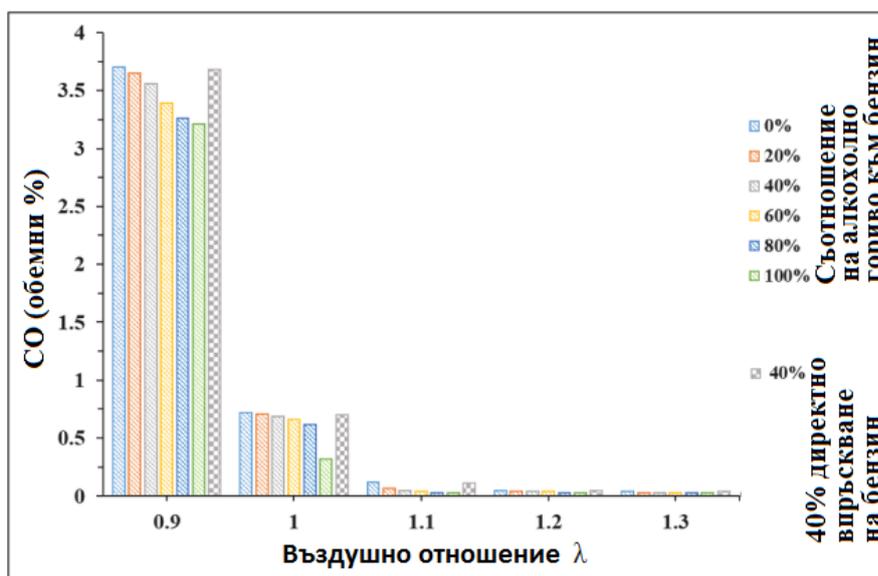
Фиг. 3. Влияние на процентното съотношение на алкохолно гориво към бензин върху съдържанието на неизгорели въглеводороди при различни въздушни отношения.

При комбиниран режим на впръскване, увеличаването на съотношението на директно впръскване на алкохолно гориво означава намаляване на масата на впръскваното гориво бензин в пълнителния тръбопровод, така че повече гориво постъпва в цилиндъра чрез директно впръскване под високо налягане, което подобрява атомизацията и изпарението на горивата и намали хетерогенността на сместа. Хомогенната смес благоприятства пълното изгаряне на горивото, като по този начин намалява емисиите на неизгорели въглеводороди. Въпреки това, в сравнение при процентното съотношение на директно впръскване на бензин 40% когато  $\lambda$  е 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3, и при процентното съотношение на директно впръскване на алкохолно гориво 40% намаляват емисиите на неизгорели въглеводороди съответно с 26.2%, 44.2%, 43.5%, 43.8% и 48.2%, резултатът показва, че увеличаването на съотношението алкохолно гориво все още може да намали емисиите на неизгорели въглеводороди при същия режим на впръскване.

### Емисии на въглероден оксид (CO)

Фиг. 4 илюстрира ефектите на алкохолното гориво върху емисиите на CO при различни стойности на въздушното отношение  $\lambda$ . Експерименталните резултати показват, че емисиите на CO намаляват значително с повишаването на  $\lambda$ . CO е продукт на непълното изгаряне на горивата поради липса на кислород, неговото генериране се влияе от  $\lambda$  и е много чувствително към съдържанието на кислород. По-голямото  $\lambda$  води до относително повишаване на съдържанието на кислород, което

ефективно би намалило генерирането на CO, особено в случай на условия на горене на бедна смес. Подобренията в емисиите на CO, благодарение на алкоолното гориво, са концентрирани главно при  $\lambda = 0,9$  и  $\lambda = 1$ . По това време емисиите на CO намаляват с увеличаване на съотношението на алкохолно гориво. Когато тестовият двигател работи в условия на бедна смес, емисиите на CO са ниски поради високото съдържание на кислород, така че добавянето на алкохолно гориво не подобрява значително емисиите на CO. Когато стойностите на  $\lambda$  са 0,9 и 1, емисиите на CO са намалени с 13,2% и 55,6%, когато тестовият двигател използва само директно впръскване на смес от алкохолно гориво, отколкото съответно само впръскване на бензин в пълнителния тръбопровод. Режимът на впръскване се променя от впръскване само на бензин в пълнителния тръбопровод в режим на комбинирано впръскване след добавянето на алкохолно гориво, горивата и въздухът се смесват по-добре и локалните зони с липса на кислород в цилиндъра намаляват. Когато стойностите на  $\lambda$  са 0,9 и 1, в сравнение с директно впръскване на бензин в съотношение 40%, емисиите на CO са намалени съответно с 3,3% и 1,4% при директно впръскване на алкохолно гориво в съотношение 40%. Това означава, че след изключване на ефектите от режима на впръскване върху емисиите на CO, самото алкохолно гориво има способността да намалява емисиите на CO. Като гориво, съдържащо кислород, добавянето на алкохол кара молекулите на горивата и кислородните молекули да се смесват по-равномерно.



Фиг. 4. Влияние на процентното съотношение на алкохолно гориво към бензин върху съдържанието на неизгорели въглеводороди при различни въздушни отношения.

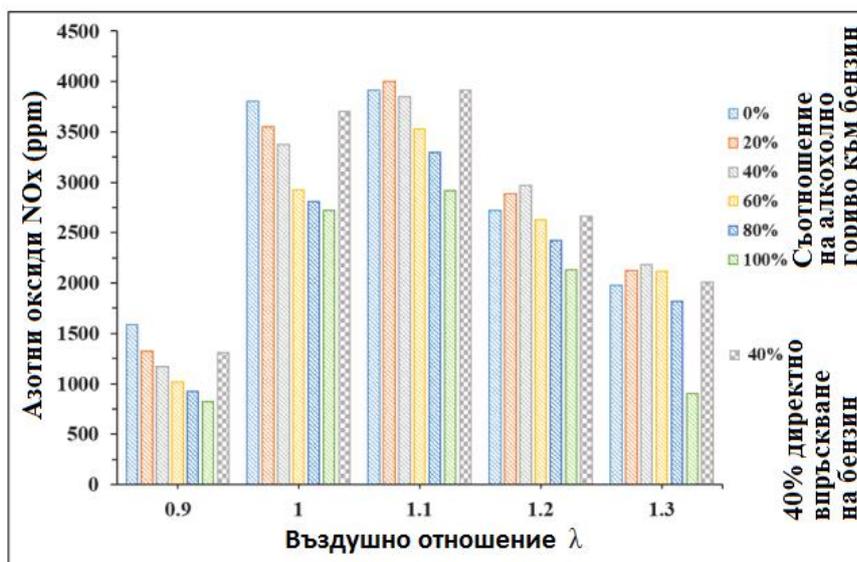
По този начин, добавянето на алкохолно гориво намалява емисиите на CO от непълно горене поради липса на кислород. От друга страна, алкохолното гориво генерира повече OH радикали във верижната реакция, което е благоприятно за по-адекватно превръщане на CO в CO<sub>2</sub>, като по този начин се намаляват емисиите на CO. В допълнение, добавянето на алкохолно гориво намалява емисиите на неизгорели HC, така че добавянето на алкохолно гориво също би намалило емисиите на CO, причинени от непълното окисление на неизгорелите HC емисии по време на процеса на изпускане на отработените газове (Пиев, S. 2017).

#### Емисии на азотни оксиди (NOx)

Фиг. 5 илюстрира влиянието на различните съотношения на алкохолно гориво върху емисиите на NOx при различни стойности на  $\lambda$ . Емисиите на NOx от горивата при съотношение на директно впръскване на алкохолно гориво 40% или директно впръскване на бензин 40% първо се увеличават и след това намаляват с увеличаване на  $\lambda$  от 0,9 до 1,3; емисиите на NOx достигат най-високата стойност, когато  $\lambda$  е 1,1. Високите температури, високото съдържание на кислород и

дългото време на престой при високи температури са основните фактори за увеличаване на образуването на NOx. Когато  $\lambda$  се увеличи от 0,9 до 1,1, въздействието на намаляването на температурата върху образуването на NOx е по-малко от това на увеличаването на съдържанието на кислород, така че емисиите на NOx продължават да се увеличават.

Когато  $\lambda$  се увеличи от 1,1 до 1,3, въздействието на намаляването на температурата върху NOx е по-голямо от повишаването на съдържанието на кислород, така че емисиите на NOx започват да намаляват. В сравнение с режим на впръскване на бензин само в пълнителния тръбопровод, емисиите на NOx от директно впръскване на бензин в съотношение 40% са по-ниски, тъй като директното впръскване на бензин може по-добре да използва енталпията на изпарението на бензина и намалява температурата в цилиндъра. Освен това, тенденцията на промяна на емисиите на NOx с използване на алкохолно гориво е различна при различни стойности на  $\lambda$ . Алкохолното гориво има два противоположни ефекта върху образуването на NOx. Добавянето на алкохолно гориво може да подобри горенето в цилиндъра, да ускори разпространението на пламъка на сместа, да увеличи максималната скорост на отделяне на топлина, като по този начин температурата в цилиндъра се повиши. Високата температура е важно условие за генерирането на NOx, така че добавянето на алкохолно гориво може да увеличи образуването на NOx. В същото време алкохолите имат голяма топлина на изпарение. Изпаряването и поглъщането на топлина от алкохолното гориво биха намалили температурата в цилиндъра, като по този начин подтискат образуването на NOx. Увеличаването на алкохолното гориво би увеличило масата на продуктите от горенето (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) и повече продукти от горенето биха разширили средния специфичен топлинен капацитет на веществата в цилиндъра, ограничавайки повишаването на температурата. Следователно, дали емисиите на NOx ще се увеличат след добавянето на алкохолното гориво зависи от взаимодействието между двата ефекта, описани по-горе.



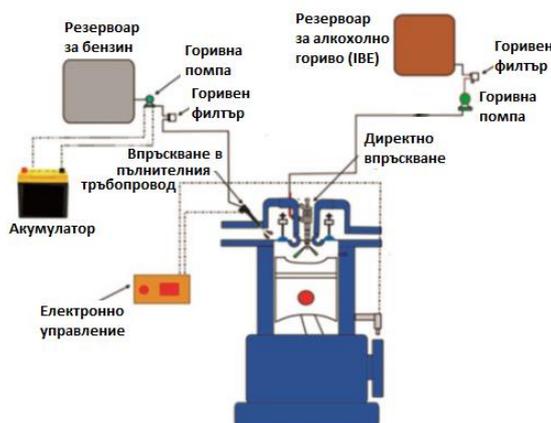
Фиг. 5. Влияние на процентното съотношение на алкохолно гориво към бензин върху съдържанието на азотни оксиди при различни въздушни отношения.

Процесът на горене в цилиндъра е добър, когато тестовият двигател работи както при обогатени, така и при стехиометрични смеси. Алкохолната смес има малък стимулиращ ефект върху генерирането на NOx, но голям подтискащ ефект също така. Следователно, емисиите на NOx намаляват с повишаване на алкохолното гориво, когато стойностите на  $\lambda$  са 0,9 и 1. Когато тестовият двигател работи при условия на бедна смес, емисиите на NOx първо се увеличават и след това намаляват с повишаване на съотношението на алкохолното гориво; емисиите на NOx са най-високи, когато съотношението на алкохолното гориво е между 20% и 40%. Причината е, че процесът на горене на бензиновата смес при условия на бедна смес е лош, добавянето на малко количество алкохолна смес (< 40%) може значително да подобри горенето на сместа, а стимулиращият ефект

от добавянето на алкохолна смес върху генерирането на NO<sub>x</sub> е по-очевиден от подтискащия ефект в същия момент. Когато алкохолното гориво се увеличава допълнително (съотношение на алкохолно гориво по-голямо от 40%), изпаряването на алкохола има по-силен охлаждащ ефект в цилиндъра и подтискащите ефекти от добавянето на алкохолно гориво върху образуването на NO<sub>x</sub> са по-големи от стимулиращите ефекти. Въпреки, че влиянието на добавяне на алкохолно гориво върху емисиите на NO<sub>x</sub> при различни стойности на  $\lambda$  са сложни, емисиите на NO<sub>x</sub> от работа само с алкохолна смес все още са по-ниски от тези на при работа само с бензин при всички стойности на  $\lambda$ . Когато стойностите на  $\lambda$  са 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3, емисиите на NO<sub>x</sub> от работа само с алкохолна смес в сравнение с само с бензин са намаляват съответно с 48.3%, 28.4%, 25.5%, 21.8% и 54.4%. Сложният механизъм на ефектите на алкохолната смес върху емисиите на NO<sub>x</sub> от двигателя прави зависимостите за емисии на NO<sub>x</sub> при директно впръскване на бензин в съотношение 40% и директно впръскване на алкохолна смес в съотношение 40% различни при различни стойности на  $\lambda$ . Когато стойностите на  $\lambda$  са 0.9, 1, 1.1, емисиите на NO<sub>x</sub> при директно впръскване на бензин в съотношение 40% са съответно с 11.3%, 9.7% и 1.6% по-високи от тези при директно впръскване на алкохолна смес в съотношение 40%; когато стойностите на  $\lambda$  са 1.2 и 1.3, емисиите на NO<sub>x</sub> при директно впръскване на алкохолна смес в съотношение 40%; са съответно с 11.6% и 8.4% по-високи от тези на при директно впръскване на бензин в съотношение 40% (Decheng Li, Xiumin Yu, Zezhou Guo, Jufang Zhang, Tianqi Wang, Yanwei Li 2022).

### Недостатъци на комбинирано впръскване на алкохолно гориво (IBE) и бензин

За оборудване на превозните средства за работа с два вида гориво едновременно е необходимо наличие на два резервоара за гориво със съответни горивни помпи, нивомери и системи за впръскване. Това би довело до увеличаване на теглото и цената на горивната система. Също така усложняването на горивната система води и до намаляване на нейната надежност.



Фиг. 6 Система за комбинирано впръскване на гориво.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Чрез използване на комбинирано впръскване на алкохолно гориво (IBE) и бензин могат да се постигнат намаляване на отделянето на вредни емисии в отработените газове и конкретно твърдите частици и азотни оксиди. Това би могло да даде възможност за покриване на повишените екологични изисквания без използване на скъпи и сложни системи за третиране на отработените газове като филтър за твърди частици или натрупващи неутрализатори за азотни оксиди. Повишените екологични изисквания биха могли да се постигнат само чрез три-компонентен каталитичен неутрализатор.

Докладът отразява резултати от работата по проект No 2025-ПУ-02, финансиран от фонд „Научни изследвания“ на Русенския университет.“

## REFERENCES

Iliev S. (2021) A Comparison of Ethanol, Methanol, and Butanol Blending with Gasoline and Its Effect on Engine Performance and Emissions Using Engine Simulation. Processes.; 9(8):1322.

Yoro, K., Daramola, M. (2020) CO<sub>2</sub> emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. In *Advances in Carbon Capture*; Woodhead Publishing: Sawston, UK, pp. 3–28

Huang, Gu, Cai, X., Gong, Z., Wu, J., Lee, C.-F. (2012) Emission characteristics of a spark-ignition engine fueled with gasoline-n-butanol blends in combination with EGR. *Fuel* 93, 611–617

Decheng Li, Xiumin Yu, Zezhou Guo, Jufang Zhang, Tianqi Wang, Yanwei Li (2022) Effects of isopropanol ratio at different excess air ratios on combustion and emissions characteristics of an isopropanol/gasoline dual-fuel combined injection SI engine

Iliev, S. (2017). Investigation of N-Butanol Blending with Gasoline using a 1-D Engine Model. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems* - SMS; ISBN 978-989-758-242-4; ISSN 2184-495X