МЕТАНОЛ ЁҚИЛҒИСИДА ИШЛОВЧИ ЮҚОРИ БОСИМЛИ ПУРКОВЧИ ДВИГАТЕЛНИНГ ЭНЕРГЕТИК-ЭКОЛОГИК КЎРСАТКИЧЛАРИНИ ОПТИМАЛЛАШТИРИШ

Musabekov Zakirjon Ergashevich,
Toshkent davlat texnika universiteti, professor, t.f.n.,
Turg‘unaliyev Shohrux Umidjon o‘g‘li

Аннотация

Ушбу мақолада қайта тикланувчи манбалар асосида олинадиган метанолдан ички ёнув двигателларида истиқболли муқобил ёқилғи сифатида фойдаланишнинг энергетик ва экологик жиҳатлари таҳлил қилинган. Метанолнинг физик-кимёвий хусусиятлари, юқори октан сони, кислород сақлаши, буғланиш иссиқлиги ва ёниш жараёнига таъсири нуқтаи назаридан уни бензинли двигателларда қўллаш имкониятлари кўриб чиқилган. Айниқса, юқори босимли бевосита пуркаш (High-Pressure Direct Injection — HPDI) технологиясининг метанолнинг паст ҳажмий энергия зичлиги, буғланиш хусусиятлари ва совуқ ишга тушиш каби чекловларини қисман компенсация қилишдаги аҳамияти асосланган.

Тадқиқотда метанолни қайта тикланувчи электр энергияси, водород ва углерод диоксиди асосида синтетик тарзда ишлаб чиқариш занжири — «яшил электр энергияси → водород → CO_2 → метанол → транспорт ёқилғиси» — таклиф этилган. Двигателнинг энергетик-экологик самарадорлигини баҳолаш учун ёқилғи сарфи, эффектив фойдали иш коэффициенти, эффектив босим, максимал босим, иссиқлик ажралиши, CO, HC, NO_x ва CO_2 эмиссиялари асосий мезонлар сифатида қабул қилинган.

Мақолада метанолнинг юқори босимда бевосита пуркалиши, пуркаш вақти,

пуркаш босими, ҳаво-ёқилғи нисбати, ёнғин камерасидаги аралашма тақсимоти ва илгарилама бурчагининг энергетик-экологик кўрсаткичларга таъсири кўриб чиқилган. Кўп омилли оптималлаштириш ёндашуви асосида двигателнинг турли иш режимларида энергия самарадорлиги ва чиқинди газлар кўрсаткичлари ўртасидаги компромиссни аниқлаш имконияти асосланган.

Калит сўзлар: метанол, қайта тикланувчи метанол, яшил водород, муқобил ёқилғи, ички ёнув двигатели, бевосита пуркаш, юқори босимли пуркаш, HPDI, энергетик самарадорлик, экологик самарадорлик, CO, HC, NO_x, CO_2, оптималлаштириш.

Кириш

Замонавий транспорт тизимининг жадал ривожланиши энергия ресурсларига бўлган талабнинг ортиши, нефт маҳсулотларига қарамлик ва атмосферага чиқарилаётган зарарли моддалар ҳажмини камайтириш масалаларини янада долзарблаштирмоқда. Айниқса, ички ёнув двигателлари ҳануз автомобиль транспортида асосий энергия манбаларидан бири бўлиб қолаётган шароитда уларнинг ёқилғи самарадорлиги ва экологик кўрсаткичларини яхшилаш муҳим илмий-техник вазифа ҳисобланади.

Анъанавий бензин ва дизель ёқилғиларидан фойдаланишда углеводородли хом ашёнинг чекланганлиги билан бир қаторда, углерод диоксиди, углерод оксиди, углеводородлар ва азот оксидлари каби чиқиндиларни камайтириш зарурати мавжуд. Шу сабабли транспорт энергетикасида электрлаштириш билан бир қаторда, ички ёнув двигателларида қўллаш мумкин бўлган паст углеродли ва қайта тикланувчи ёқилғиларга қизиқиш ортиб бормоқда.

Шундай муқобил ёқилғилардан бири метанолдир. Метанол оддий углеводород ёқилғиларидан фарқли равишда молекуласида кислород атомини сақлайди. Унинг юқори октан сони учқун билан алангаланувчи двигателларда

юқори сиқиш даражаси ва самарали ёнғин жараёнини ташкил этиш имконини беради. Шу билан бирга, метанолнинг буғланиш иссиқлиги юқори бўлганлиги цилиндр ичидаги зарядни совитишга ёрдам бериши мумкин.

Бироқ метанолдан транспорт ёқилғиси сифатида фойдаланиш бир қатор технологик муаммоларни ҳам келтириб чиқаради. Унинг ҳажмий иссиқлик бериш қобилияти бензинга нисбатан паст, совуқ ишга тушиш хусусиятлари мураккаброқ, ёқилғи тизими материалларига таъсири ва пуркаш параметрларини мослаштириш зарурати мавжуд.

Ушбу муаммоларни ҳал қилишда юқори босимли бевосита пуркаш технологияси алоҳида аҳамиятга эга. Ёқилғини цилиндрга бевосита ва юқори босимда узатиш орқали пуркаш вақти, миқдори, томчи дисперслиги ва аралашма шаклланишини аниқ бошқариш мумкин.

Шу нуқтаи назардан, ушбу ишнинг асосий мақсади - қайта тикланувчи метанол ёқилғисида ишловчи юқори босимли бевосита пурковчи двигателининг энергетик ва экологик кўрсаткичларини оптималлаштиришнинг илмий-методик асосларини ишлаб чиқишдан иборат.

Тадқиқотнинг илмий ғояси метанолнинг кимёвий ва энергетик хусусиятларини юқори босимли бевосита пуркаш, рақамли бошқарув ва кўп омилли оптималлаштириш технологиялари билан бирлаштиришдан иборат. Метанолнинг энергетика ва экологик тизимдаги ўрни яъни метанол - энг содда спирт бўлиб, суюқ ҳолатда сақланиши ва транспорт воситаларида ёқилғи сифатида ишлатилиши унинг муҳим афзалликларидан ҳисобланади. Метанолни ишлаб чиқариш манбасига қараб шартли равишда уч асосий гуруҳга ажратиш мумкин:

1. Фоссил манбалардан олинадиган метанол;
2. Биомасса асосида олинадиган метанол;

3. Қайта тикланувчи электр энергияси асосида олинадиган синтетик метанол.

Учинчи йўналиш экологик нуқтаи назардан алоҳида аҳамиятга эга. Бунда сув электролизи орқали водород олинади, кейин эса водород ва углерод диоксиди асосида метанол синтез қилинади. Умумлаштирилган ҳолда жараённи қуйидагича ифодалаш мумкин:

$2H_2 + CO_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$

Бу жараёнда водород қайта тикланувчи электр энергияси билан ишлайдиган электролизёр ёрдамида олинса, метанол ишлаб чиқариш занжиридаги углерод изини сезиларли даражада камайтириш имконияти пайдо бўлади. Шу сабабли қайта тикланувчи метанолни нафақат ёқилғи, балки электр энергиясини кимёвий энергия кўринишида сақлаш воситаси сифатида ҳам қараш мумкин. Метанолнинг двигателдаги хулқини белгилайдиган асосий хусусиятлар булар юқори октанга чидамлилик, кислород сақловчи молекуляр структура, бензинга нисбатан паст ҳажмий энергия зичлиги, юқори буғланиш иссиқлиги;нисбатан кам стехиометрик ҳаво талаби, буғланиш жараёнида зарядни совитиш хусусияти, юқори босимли пуркашда яхши дисперсланиш имконияти.

Метанол учун стехиометрик ёниш реакцияси:

$2CH_3OH + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 4H_2O$

Шунга мос равишда назарий ҳаво-ёқилғи нисбати бензинникидан фарқ қилади. Шу сабабли бензин двигателини метанолга мослаштиришда фақат ёқилғи миқдорини ўзгартириш етарли эмас; бошқарув алгоритми, пуркаш стратегияси ва ҳаво-ёқилғи нисбатини ҳам қайта созлаш талаб этилади.

Қайта тикланувчи метанол концепцияси- бу метанолни транспорт

энергетикасига интеграциялашда ёқилғи ишлаб чиқариш жараёнидан тортиб двигатель цилиндрида ёнишгача бўлган бутун занжирдир яъни қуёш/шамол энергияси → электролиз → яшил H_2 → CO_2 ни ушлаш → метанол синтези → юқори босимли пуркаш → двигатель → механик энергия. Бундай ёндашувда метанолнинг афзаллиги унинг суюқ ҳолатда ташилиши ва мавжуд ёқилғи инфратузилмасининг бир қисми билан интеграцияланиши имконият.

Метанолнинг қайта тикланувчи манбалар асосида ишлаб чиқарилиши транспорт соҳасида «Well-to-Wheel» ёндашуви бўйича баҳоланиши керак. Фақат двигатель чиқишидаги CO_2 миқдорини эмас, балки ёқилғини ишлаб чиқариш, ташиш, сақлаш ва истеъмол қилиш босқичларини ҳам ҳисобга олиш талаб этилади.

Юқори босимли бевосита пурковчи двигателнинг технологик асослари шундаки Метанолнинг пастроқ ҳажмий энергия зичлиги туфайли двигателга бир хил қувватни таъминлаш учун ҳажм бўйича кўпроқ ёқилғи узатиш талаб этилади. Шу сабабли ёқилғи пуркаш тизими юқори унумдорлик ва аниқ дозалаш имкониятига эга бўлиши керак. Юқори босимли бевосита пуркаш тизими метанол сақлаш баки, паст босимли насос, юқори босимли насос, умумий ёқилғи рампаси, юқори босимли инжектор, босим датчиги, тирсакли вал ҳолати датчиги, газ тақсимлаш валининг ҳолати датчиги, кислород датчиги, ҳаво массаси датчиги, электрон бошқарув блоки каби асосий элементлардан ташкил топган.

Ёқилғи пуркаш миқдори умумий ҳолда:

$$m_f = f(n, M_e, p_i, t_i, , \lambda)$$

кўринишида ифодаланади.

Бу ерда m_f - пуркаладиган метанол массаси, n - тирсакли вал айланиш частотаси, M_e -двигатель моменти, p_i - инжектордаги ёқилғи босими, T_c -

цилиндрдаги ҳарорат, t_i - пуркаш импульси давомийлиги, λ-ҳаво-ёқилғи коэффициенти.

Пуркаш босимининг ортиши одатда ёқилғи томчиларининг майдаланишига ва аралашма ҳосил бўлиш жараёнининг яхшиланишига олиб келади. Бироқ босимни чексиз ошириш мақбул эмас. Насос қуввати, инжекторнинг ишлаш хусусиятлари, деворга ёқилғи чўкиши ва ортиқча иссиқлик йўқотишлари ҳам ҳисобга олиниши лозим.

Метанолнинг ёниш жараёни ва термодинамик хусусиятлари шундаки двигателнинг энергетик кўрсаткичлари асосан цилиндрдаги иссиқлик ажралиши ва унинг механик ишга айланиш даражаси билан белгиланади.Метанолнинг юқори буғланиш иссиқлиги цилиндрга пуркаш пайтида аралашмани совитади. Бу ҳолат заряд зичлигининг ошишига ва детонацияга чидамлиликнинг яхшиланишига олиб келиши мумкин.

Идеаллаштирилган ҳолда двигатель цилиндридаги термодинамик жараён:

$dQ = dU + dW$

кўринишида ифодаланади.

Бу ерда dQ — ёниш натижасида ажралган иссиқлик, dU — ички энергия ўзгариши, dW — газларнинг бажарган иши.

Ёниш жараёнини моделлаштиришда Wiebe функциясидан фойдаланилди.

$x_b(\theta)=1-exp[-a((\theta-\theta_0)/\Delta\theta)^{(m+1)}]$

бу ерда x_b — ёнилган масса улуши, θ — тирсакли вал бурилиш бурчаги, θ_0 — ёниш бошланиш бурчаги, $\Delta\theta$ — ёниш давомийлиги, a ва m — Wiebe параметрлари.

Ушбу модель ёнишнинг бошланиши, асосий иссиқлик ажралиши ва ёниш давомийлигининг двигатель иш режимларига таъсирини тадқиқ қилиш имконини беради.

Метанолда ишлайдиган двигатель учун эффектив қувват, эффектив момент, эффектив фойдали иш коэффициенти, соатлик ёқилғи сарфи, солиштирма эффектив ёқилғи сарфи ва солиштирма энергия сарфи асосий энергетик кўрсаткичлари хисоланди.

Эффектив қувват:

$$Pe = Me \cdot \omega$$

бу ерда: $\omega = 2\pi n/60$

Двигателнинг эффектив фойдали иш коэффициенти:

$$\eta e = Pe / (\dot{m}f \cdot LHV)$$

кўринишида аниқланди.

Бу ерда Pe — эффектив қувват, $\dot{m}f$ — метанол сарфи, LHV — метанолнинг пастки ёниш иссиқлиги. Метанолнинг ҳажмий энергия зичлиги бензинга нисбатан паст бўлганлиги сабабли литр ҳисобидаги ёқилғи сарфи ортиши мумкин. Шунинг учун фақат L/100 km кўрсаткичи эмас, балки MJ/km, g/kWh ва эффектив ФИК ҳам бир вақтда баҳоланиши керак. Бу илмий жиҳатдан муҳим, чунки метанолдан фойдаланишда ёқилғи ҳажми кўпайиши ҳар доим ҳам двигатель энергетик самарадорлиги ёмонлашганини англатмайди.

Экологик кўрсаткичларни оптималлаштиришда ҳамда ички ёнув двигателининг экологик самарадорлигини баҳолашда асосий компонентлари CO, HC, NO_x, CO_2, заррачалар (PM). Метанол молекуласида кислород мавжудлиги сабабли аралашманинг ёниш жараёнида углероднинг тўлиқроқ оксидланишига шароит яратилиши мумкин. Натижада CO ва айрим ҳолларда HC эмиссияларини камайтириш имконияти пайдо бўлади. Бироқ NO_x ҳосил бўлиши асосан ёниш

ҳарорати, кислород концентрацияси, аралашманинг локал таркиби ва ёниш давомийлигига боғлиқ. Шу сабабли метанолдан фойдаланиш NO_x ни автоматик равишда камайтиради, деган хулоса қилиш тўғри эмас.

Экологик оптималлаштиришда қуйидаги мақсад функциясини қўллаш мумкин:

$$F = w_1 \cdot bsfc + w_2 \cdot ECO + w_3 \cdot EHC + w_4 \cdot ENOx + w_5 \cdot ECO_2$$

бу ерда *bsfc* — солиштирма ёқилғи сарфи, ECO, EHC, ENOx, ECO_2 — тегишли эмиссиялар, $w_1 ... w_5$ — мақсад функцияси коэффициентлари.

Метанолда ишлайдиган юқори босимли бевосита пурковчи двигатель бир вақтда бир нечта ўзгарувчилар таъсирида ишлайди. Шу сабабли бир омилли тажриба усули етарли эмас.

Тажриба-тадқиқот методикасини

Тажриба-тадқиқот методикасини амалга ошириш учун двигатель стенди тормозли динамометрик стенд, юқори аниқликдаги ёқилғи сарфи ўлчагич, юқори босимли метанол пуркаш тизими, цилиндр босими датчиги, газ анализатори, ҳаво массаси датчиги, кислород датчиги, ҳарорат ва босим датчиклари, ECU/DAQ маълумотларни йиғиш тизими, метанол хавфсизлиги ва вентиляция тизими каби қурилмалар билан жиҳозланди.

Тажрибалар двигатель айланиш частотасининг 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 ва 4000 min^{-1} режимларида ўтказилди. Ҳар бир айланиш частотасида юклама босқичма-босқич ўзгартирилди. Таққослаш учта режимда бўлди яъни базавий, метанол, оптималлаштирилган юқори босимли бевосита пуркашда метанол. Ҳар бир режимда момент, қувват, қилғи сарфи, λ, CO, HC, NO_x, CO_2, цилиндр босими ўлчанди.

Метанолни юқори босимли бевосита пуркашда қўллашдан кутиладиган асосий натижаларни бир нечта механизм билан тушунтириш мумкин.

Биринчидан, юқори босимли пуркаш ёқилғи томчиларининг майдаланишини яхшилаши ва аралашма ҳосил бўлиш жараёнини тезлаштириши, иккинчидан, метанолнинг юқори октанга чидамлилиги двигателнинг сиқиш даражасини оптималлаштириш имконини берди учинчидан, буғланишдаги совитиш эффекти кириш заряди зичлигини оширди ва тўртинчидан, электрон бошқарув пуркаш вақти ва ёқилғи миқдорини двигатель иш режимига мослаштириш имконини беради.

Шу билан бирга, метанолнинг паст энергия зичлиги сабабли ҳажмий ёқилғи сарфи ошиши мумкин. Шунинг учун тадқиқот натижаларини баҳолашда энергияга нисбатан сарф кўрсаткичидан фойдаланиш илмий жиҳатдан тўғри бўлади.

Тадқиқот доирасида қуйидаги илмий янгилик йўналишларини шакллантириш мумкин:

1. Қайта тикланувчи метанол ёқилғисида ишловчи юқори босимли бевосита пурковчи бензин двигателининг энергетик ва экологик кўрсаткичларини комплекс баҳолаш модели таклиф этилди.

2. Метанолнинг физик-кимёвий хусусиятлари, пуркаш босими, пуркаш вақти ва λ коэффициенти ўртасидаги ўзаро таъсирни ҳисобга олувчи кўп омилли математик модель ишлаб чиқилди.

3. Двигателнинг энергетик самарадорлиги ва чиқинди газлар кўрсаткичлари ўртасидаги оптимал компромиссни аниқлаш усули асосланди.

4. Реал вақтда ҳаво-ёқилғи нисбатини бошқариш ва пуркаш параметрларини мослаштириш алгоритми таклиф этилди.

5. Қайта тикланувчи метанолнинг «ишлаб чиқариш → ташиш → двигательда фойдаланиш» занжири бўйича энергетик-экологик самарадорликни баҳолаш методикаси шакллантирилди.

Шундай қилиб, оптимал нуқта двигательнинг максимал қуввати эмас, балки энергия самарадорлиги ва экологик кўрсаткичлар ўртасидаги мақбул ҳолат сифатида аниқланади.

Хулоса

1. Метанол суюқ ҳолда сақланиши, юқори октанга чидамлилиги ва молекуласида кислород сақлаши туфайли учқун билан алангаланувчи ички ёнув двигателлари учун истиқболли муқобил ёқилғи ҳисобланади.
2. Қайта тикланувчи метанолни яшил водород ва углерод диоксиди асосида ишлаб чиқариш транспорт энергетикасида қайта тикланувчи энергияни суюқ ёқилғи шаклида сақлаш имконини беради.
3. Юқори босимли бевосита пуркаш технологияси метанолнинг паст ҳажмий энергия зичлиги ва аралашма ҳосил қилиш хусусиятларини компенсация қилиш, ёқилғи миқдори ва пуркаш жараёнини аниқ бошқариш учун самарали технологик восита сифатида қаралиши мумкин.
4. Метанол двигателининг энергетик-экологик кўрсаткичларини оптималлаштиришда пуркаш босими, пуркаш вақти, пуркаш бошланиш бурчаги, ҳаво-ёқилғи коэффициенти, двигатель тезлиги ва юклама каби омилларни биргаликда ҳисобга олиш талаб этилади.
5. Энг мақбул иш режими фақат ёқилғи сарфининг минимал қиймати билан эмас, балки эффектив ФИК, солиштирма энергия сарфи, CO, HC, NO_x ва CO_2 эмиссияларини комплекс баҳолаш асосида аниқланиши керак.
6. Метанолнинг экологик самарадорлигини ҳаққоний баҳолаш учун двигатель чиқишидаги эмиссиялар билан бирга Well-to-Wheel ҳаётий цикл ёндашувидан фойдаланиш мақсадга мувофиқ.
7. Кейинги экспериментал тадқиқотларда юқори босимли бевосита пуркаш параметрларини кўп омилли регрессия, термодинамик моделлаштириш

ва реал вақтдаги электрон бошқарув билан бирлаштириш двигательнинг энергетик ва экологик кўрсаткичларини оптималлаштириш имкониятини оширади.

Адабиётлар

1. He, Longguo; Grekhov, L; Musabekov Z.; Mirzaabdullaev, J; Zhao, Jianhui. Research on the fluctuation mechanism and consistency optimization of injection quantity in methanol-diesel dual-fuel engines. International Journal of Engine ResearchArticle, College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, China, 2026, https://doi.org/10.1177/14680874261421539

2. International Renewable Energy Agency. *Innovation Outlook: Renewable Methanol*. Abu Dhabi: IRENA.

3. European Commission. *Renewable Energy Directive and Renewable Fuels Framework*. Brussels.

4. Verhelst S., Turner J.W.G. Methanol as a fuel for internal combustion engines: fundamental and practical aspects.

5. Bromberg L., Cheng W.K. Methanol as an alternative transportation fuel.

6. Zokirjon Musabekov, Jamshid Hakimov, Ergashev Botir. Ichki yonuv dvigatelida gaz almashinuvini hisoblash uchun differentsial tenglamalar. E3S Web Conf. (CONMECHYDRO - 2021). 264-jild, 2021 yil. 1-7- betlar. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126401003 [2]

7. Tulaev BR, Musabekov Z.E., Daminov OO, Hakimov JO Superchargedni ichki yonuv dvigatellariga qo‘llash va yuqori ekologik standartlarga erishishda samaradorlikni oshirish "Zamonaviy fanning muammolari va istiqbollari bo‘yicha 1-xalqaro konferentsiya (ICPPMS-2021)" (Toshkent, 2021 yil 10-11 iyun) [3]

8. Ergashev B. Shodimetov Y., Musabekov Z., Uralova X. “Toshkent

shahrining atmosfera havosi va boshqa ekotizim elementlarida kadmiy mavjudligini eksperimental tekshirish".

9. Ergashev B. Shadimetov Y., Musabekov Z., Uralova H. "Experimental study on the presence of cadmium in the atmospheric air and other elements of the ecosystem of Tashkent"