



XҒТАР 73.31.41  
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-185-202>

## Ультрадыбыс пен лазерлік сәулеленудің біріктірілген әсері кезінде тазалауды эксперименттік зерттеу

М.С.Исабаев<sup>1</sup> , Б.К.Сарсембеков\*<sup>1</sup> , Н.Б.Жаркенов<sup>1</sup> ,  
А.Т.Умбетжанова<sup>1</sup> , Е.К.Сарсембеков<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды,  
Қазақстан

<sup>2</sup>«Жолаушылар тасымалы» АҚ, Астана, Қазақстан

*E mail: <sup>1</sup>m.isabaev@ktu.edu.kz, \*b.sarsembekov@ktu.edu.kz, <sup>1</sup>n.zharkenov@ktu.edu.kz,  
<sup>1</sup>a.umbetzhanova@ktu.edu.kz, <sup>2</sup>yerzhansk2309@mail.ru*

**Аңдатпа.** Бұл жұмыста іштен жану қозғалтқышының шығарындылары газдарының уыттылығын ультрадыбыстық толқындар мен инфрақызыл лазерлік сәулелену көмегімен төмендетуге арналған эксперименттік зерттеу ұсынылады. Әсерсіз режимде, ультрадыбыстық әсер кезінде, лазерлік әсер кезінде және олардың біріктірілген жағдайында қозғалтқыштың бос жүрісінде және жоғарылатылған айналымдарында шығарындылардың негізгі компоненттерінің концентрациялары (жанбай қалған көмірсутектер СН, көміртек тотығы СО, көмірқышқыл газы СО<sub>2</sub>, оттегі О<sub>2</sub>) және газ температурасы өлшенді. Алынған нәтижелер ультрадыбыс пен лазердің жекелей түрде әртүрлі компоненттерге селективті әсер ететінін көрсетті: ультрадыбыстық әсер жоғары айналымдарда СО мөлшерін бақылау режимімен салыстырғанда 60%-ға дейін төмендетсе, лазерлік сәулелену СН концентрациясын 35–40% аралығында азайтты. Ультрадыбыстық және лазерлік әсерді біріктіріп қолдану зиянды заттардың концентрациясын кешенді түрде төмендетуге мүмкіндік берді (СН және СО мөлшерінің сәйкесінше 38% және 43%-ға дейін азаюы), сонымен қатар шығарындылардағы О<sub>2</sub> құрамының төмендеуі және СО<sub>2</sub> үлесінің артуы байқалды, бұл жану өнімдерінің тиімді жануын және ұсталуын көрсетеді. Зерттеу нәтижелері шығарындылар газдарын тазалау үшін ультрадыбыс пен инфрақызыл лазерлерді кешенді қолданудың перспективалылығын растайды.

**Түйін сөздер:** шығарындылар газдары, ультрадыбыстық тазалау, инфрақызыл лазер, акустикалық агломерация, кавитация, фотодиссоциация, улы шығарындылар

## **Кіріспе**

Қалалық агломерациялар мен магистральдық бағыттарда автокөлік ағынының өсуі атмосфералық ауаның сапасына тікелей әсер етеді. Іштен жану қозғалтқыштарының шығарындылары құрамындағы көміртек тотығы (СО) және жанбай қалған көмірсутектер (СН) ауада фотохимиялық тұманның түзілуін күшейтіп, адам денсаулығына қауіпті болып табылады. Қатты бөлшектер мен күйе (РМ) тыныс алу жолдарының терең бөлімдеріне өтіп, созылмалы қабыну процестерін туындатуы мүмкін. Осыған байланысты Еуро және өзге де экологиялық нормалардың қатаюы дәстүрлі бейтараптандырғыш жүйелерінің тиімділігін арттыруды немесе оларды жаңа физикалық-техникалық тәсілдермен толықтыруды талап етеді [1].

Қазіргі техникада каталитикалық бейтараптандырғыштар, күйе сүзгілер, рециркуляция жүйелері және термиялық күйдіргіштер кең қолданылады. Алайда бұл шешімдер күрделі, қымбат және техникалық қызмет көрсетуді талап етеді, ал кейбір жағдайда (қысқа қашықтықтағы жүріс, төмен температура, отын сапасының ауытқуы) тиімділігі төмендеуі мүмкін. Сондықтан белсенді физикалық әсерлерге негізделген әдістерге қызығушылық артып келеді [2].

Ультрадыбыстық әсер газ-ағын ішінде акустикалық қысым градиенттерін және радиациялық күштерді қалыптастырады. Бұл күштер дисперстік бөлшектерді бір-біріне жақындатып, акустикалық агломерацияны жеделдетеді, ал іріленген бөлшектердің тұнуы немесе ұсталып қалуы жеңілдейді. Егер ортада ылғал және микроамшылар болса, кавитациялық құбылыстар пайда болып, қысқа уақыт ішінде жоғары температура мен қысымға ие микроаймақтар түзіледі; мұнда радикалдар пайда болып, СО және көмірсутектердің тотығу реакциялары күшеюі ықтимал. Инфрақызыл лазер сәулеленуі күйе бөлшектерімен жақсы жұтылады және олардың беткі температурасын көтереді, бұл беткі тотығу реакцияларын, көмірсутектердің ыдырауын және фототермиялық әсерді күшейтеді. Сәйкесінше, ультрадыбыс пен лазердің біріккен әсері әртүрлі механизмдер арқылы шығарындыларды кешенді төмендетуге бағытталған [3, 4].

Осы жұмыстың ерекшелігі – ультрадыбыстық сәулелендіргіш пен инфрақызыл лазер диодтарын дыбыс өшіргіш корпусына интеграциялап, бірдей қозғалтқыш және өлшеу шарттарында төрт режимді салыстыру арқылы тазалау тиімділігін сандық бағалау. Негізгі назар СН, СО, СО<sub>2</sub> және О<sub>2</sub> сияқты көрсеткіштерге аударылды, өйткені олар жану толықтығын, токсикологиялық қауіпін және жүйедегі тотығу-тотықсыздану процестерін түсіндіруге мүмкіндік береді.

**Зерттеудің мақсаты, міндеттері және ғылыми жаңалығы**

Зерттеудің мақсаты – бензинді қозғалтқыштың шығарындылар газдарына ультрадыбыстық, лазерлік және біріктірілген ультрадыбыстық-лазерлік әсердің ықпалын эксперимент жүзінде бағалап, СО мен СН концентрацияларын төмендету мүмкіндігін дәлелдеу. Гипотеза бойынша, дыбыс өшіргіш ішкі қуысында ультрадыбыс пен инфрақызыл лазер әсерінен акустикалық агломерация, кавитациялық тотығу, фотодиссоциация және фототермиялық белсендіру жүріп, токсикалық компоненттердің мөлшері төмендейді.

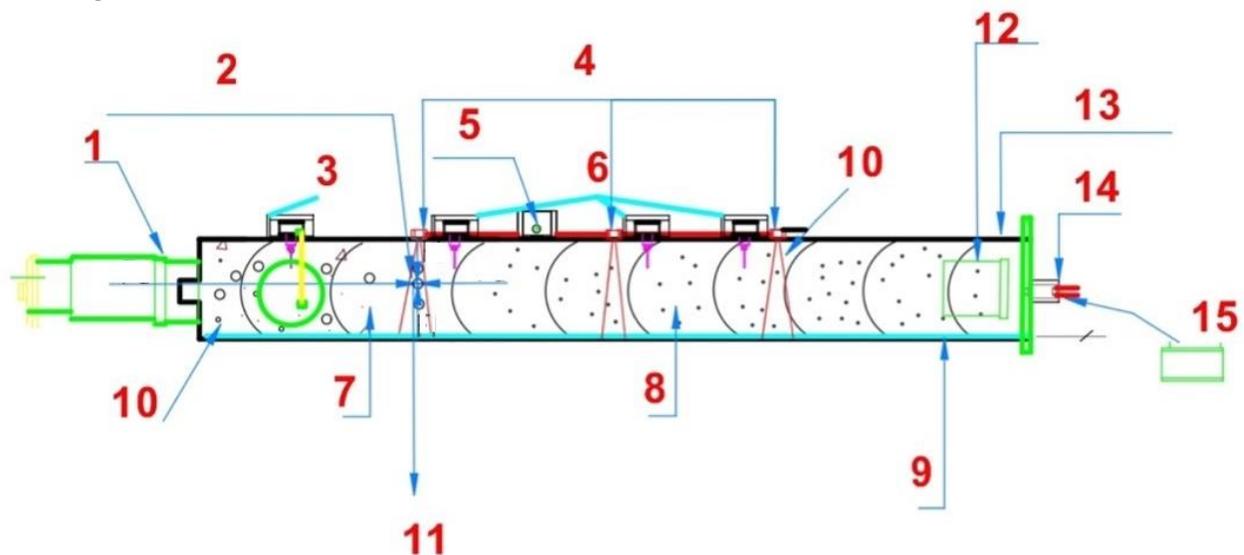
Міндеттер ретінде келесі жұмыстар орындалды. Ультрадыбыс және лазер модульдері бар тәжірибелік дыбыс өшіргіш құрастырылды және көлік шығару жүйесіне қосылды. Үш айналым режимінде (850, 1400, 3000 айн/мин) төрт әсер режимі (әсерсіз бақылау, тек ультрадыбыс, тек лазер, біріктірілген әсер) бойынша газ құрамының өлшемдері алынды.

Өлшеулер қайталанып, орташа мәндер және вариация көрсеткіштері есептелді, сондай-ақ бақылаумен салыстырғандағы салыстырмалы төмендеу (тиімділік) анықталды.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы бірнеше аспектіден тұрады. Біріншіден, ультрадыбыстық сәулелендіргіш пен инфрақызыл лазер диодтарын бір дыбыс өшіргіш корпусына біріктіретін конструкциялық шешім ұсынылды. Екіншіден, бірдей өлшеу әдістемесімен төрт режимді қатар салыстыратын тәжірибелік деректер алынды. Үшіншіден, нәтижелер компоненттер бойынша селективті әсерді және жоғары айналымда біріктірілген әсердің кешенді тиімділігін көрсетті. Практикалық маңыздылығы белсенді «ақылды» дыбыс өшіргішті дамытуда және каталитикалық материалдарды пайдаланбай-ақ шығарындыларды төмендетудің баламалы жолын негіздеуде көрінеді [5, 6].

### Әдіснама

Эксперимент жүргізу барысында шығатын газдардың көзі ретінде Volkswagen Golf III 1.8 (ADZ) инжекторлы бензинді қозғалтқышы пайдаланылды. Каталитикалық бейтараптандырғыш ықпалын болдырмау үшін тәжірибе кезінде штаттық бейтараптандырғыш ажыратылды. Отын ретінде АИ-92 маркалы этилденбеген бензин қолданылды (МЕСТ 32513-2013). Әрбір өлшеу циклі алдында қозғалтқыш жұмыс температурасына дейін қыздырылды, салқындатқыш сұйықтықтың температурасы 90 °С деңгейінде ұсталды. Бұл тәсіл суық іске қосу кезеңіндегі жанудың тұрақсыздығын және өлшеулердің ауытқуын азайтады. Эксперименттік гибриді қондырғының сұлбасы 1-суретте көрсетілген.



1-сурет. Эксперименттік гибриді қондырғының сұлбалық диаграммасы.

1 — шығатын газдардың кіріс келтеқұбыры; 2 — фотодиссоциация аймағы; 3 — ылғалдылық датчигі; 4 — лазерлік диодтар; 5 — лазерді басқару модулі; 6 — температура датчигі; 7 — күйе бөлшектерінің коагуляция аймағы; 8 — жанбайтын бөлшектердің коагуляция аймағы; 9 — күйе жиналу аймағы; 10 — газ сынамасын алу нүктелері  $m_1$  және  $m_2$  (ағынның жоғарғы бөлігінде); 11 — әсер етуші күштердің қозғалыс бағыты; 12 — шығатын газдардың шығу келтеқұбыры; 13 — эксперименттік гибриді қондырғының

корпусы; 14 — ультрадыбыстық сәуле шығарғыш; 15 — ультрадыбыстық генератор.

Құрамдастырылған қондырғының негізгі элементі ретінде түзу ағынды дыбыс өшіргіш қолданылды. Корпус ұзындығы 1000 мм, диаметрі 110 мм, кіріс және шығыс құбырларының диаметрі 32 мм. дыбыс өшіргіш ішінде ультрадыбыстық сәулелендіргіш бойлық толқын тудыратындай орналастырылды. Бұл конфигурация газ ағынының бойымен қысым пульсацияларын таратуға және акустикалық агломерация аймағын қалыптастыруға мүмкіндік береді. Күйе бөлшектерін жинауға арналған алынбалы науа қарастырылды; тәжірибе барысында ультрадыбыстық режимде науада тұнба пайда болуы байқалды.

Лазер модулі үш инфрақызыл диодтан тұрады. Диодтар дыбыс өшіргішіне газ көлемі арқылы сәуле өтетіндей бағдарланған. 810 нм диапазоны күйе бөлшектері үшін жұтылуы жоғары аймаққа жатады, сондықтан фототермиялық әсер күшеюі ықтимал. Лазер диодтары Arduino негізіндегі контроллермен басқарылып, 12 В тұрақты ток көзінен қоректендірілді. Ультрадыбыстық генератор 40 кГц жиілікте жұмыс істеді. Қондырғының модульдік құрылымы параметрлерді өзгертуге және қосымша сенсорларды интеграциялауға мүмкіндік береді.

Қауіпсіздік тұрғысынан лазер сәулесінің сыртқа шығуын болдырмайтын қорғаныс шешімдері қарастырылды, ал ультрадыбыстық модуль жоғары температуралы аймақтан оқшауланып орнатылды. Бұл талаптар тәжірибе барысында тұрақты жұмыс істеуге және өлшеулердің қайталанғыштығына әсер етеді. Жұмыс режимдері ретінде 850 айн/мин (бос жүріс), 1400 айн/мин (ішінара жүктеме, қалалық режимге жақын), 3000 айн/мин (жоғары айналым) таңдалды. Әрбір айналымда төрт әсер режимі орындалды. Бірінші режимде қондырғылар өшіріліп, бақылау өлшемі алынды. Екінші режимде ультрадыбыстық генератор қосылып, 40 кГц жиілікте тұрақты режимде жұмыс істеді. Үшінші режимде үш инфрақызыл диодты лазер қосылды; әр лазердің қуаты 10 мВт, толқын ұзындығы шамамен 810 нм, басқару Arduino контроллері арқылы орындалды. Төртінші режимде ультрадыбыс пен лазер бір мезгілде қосылып, біріктірілген әсер берілді. Әсер режимдері арасында жүйені тұрақтандыру және шығару трактының желдетілуі үшін қысқа үзіліс жасалды.

Газ құрамын өлшеу үшін төрт компонентті газоанализатор қолданылды, ол СН (ppm, СН<sub>4</sub> эквиваленті), СО (%), СО<sub>2</sub> (%) және О<sub>2</sub> (%) көрсеткіштерін тіркейді. Температура термодатчикпен өлшенді, салыстырмалы ылғалдылық термогигрометр арқылы бақыланды. Әрбір режим үшін өлшеулер кемінде бес рет қайталанып, орташа мәндер есептелді ( $n=5$ ). Статистикалық өңдеу кезінде орташа мән  $\bar{x}$ , стандарттық ауытқу  $s$ , вариация коэффициенті  $v$  және 95% сенімділік интервалдары қолданылды. Тазалау тиімділігі  $\eta$  бақылауға қатысты салыстырмалы төмендеу арқылы анықталды (1):

$$\eta = (C_0 - C_1) / C_0 \times 100\% \quad (1)$$

мұндағы,  $C_0$  – бақылаудағы концентрация,  $C_1$  – әсер кезіндегі концентрация.

### Нәтижелер мен талқылау

Өлшеу нәтижелері 1-кестеде жинақталған және 2-суретте көрсетілген. Кестеде үш айналым және төрт әсер режимі бойынша СН, СО, СО<sub>2</sub>, О<sub>2</sub>, газ температурасы және ылғалдылықтың орташа мәндері берілген. Бақылау режимінде айналым өскен сайын СО

және СН жалпы тенденция бойынша артады, бұл жану толықтығының төмендеуімен және қоспаның байытылуымен түсіндіріледі. Әсер режимдерінде көрсеткіштердің өзгеруі компоненттің табиғатына және әсер механизмінің басымдығына байланысты болды.

Нәтижелердің графикалық көрінісі 3-7-суреттерде келтірілген.



2-сурет. "Инфракар М-1.01" автомобиль 4-компонентті газ анализаторының көрсеткіштері

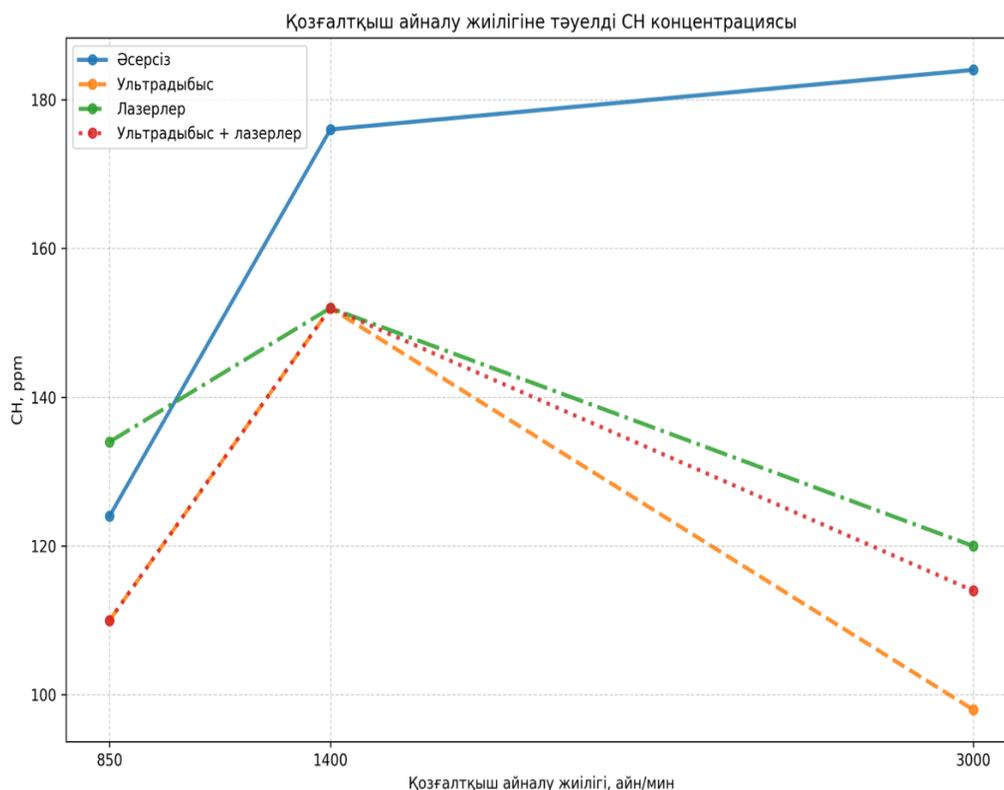
Төменде нәтижелерді компоненттер бойынша жеке талқылап, ықтимал механизмдермен байланыстырамыз. Сонымен қатар, алынған сандарды практикалық тұрғыдан интерпретациялау үшін салыстырмалы төмендеу пайыздары келтіріледі.

1-Кесте. Әртүрлі әсер режимдеріндегі шығарындылар газдарының құрамы

Кезең	Режим айн/мин	СН (ppm)	СО (%)	СО <sub>2</sub> (%)	О <sub>2</sub> (%)	Т газа (°С)	Ылғалд. (%)
Әсерсіз	850	124	2,48	9,56	5,87	37	39
Ультрадыбыс	850	110	2,39	9,56	6,17	37	39
Лазер	850	134	2,24	9,95	5,61	44	39
Біріктірілген	850	110	2,39	9,73	6,07	44	39
Әсерсіз	1400	176	2,74	9,85	5,2	49	39

Ультрадыбыс	1400	152	2,62	9,97	5,21	49	39
Лазер	1400	152	2,58	10,1	5,03	52	39
Біріктірілген	1400	152	2,62	9,97	5,21	52	39
Әсерсіз	3000	184	3,83	8,09	8,07	60	39
Ультрадыбыс	3000	98	1,5	9,5	5,68	60	39
Лазер	3000	120	2,24	9,95	11,94	60	39
Біріктірілген	3000	114	2,18	10,92	2,6	60	39

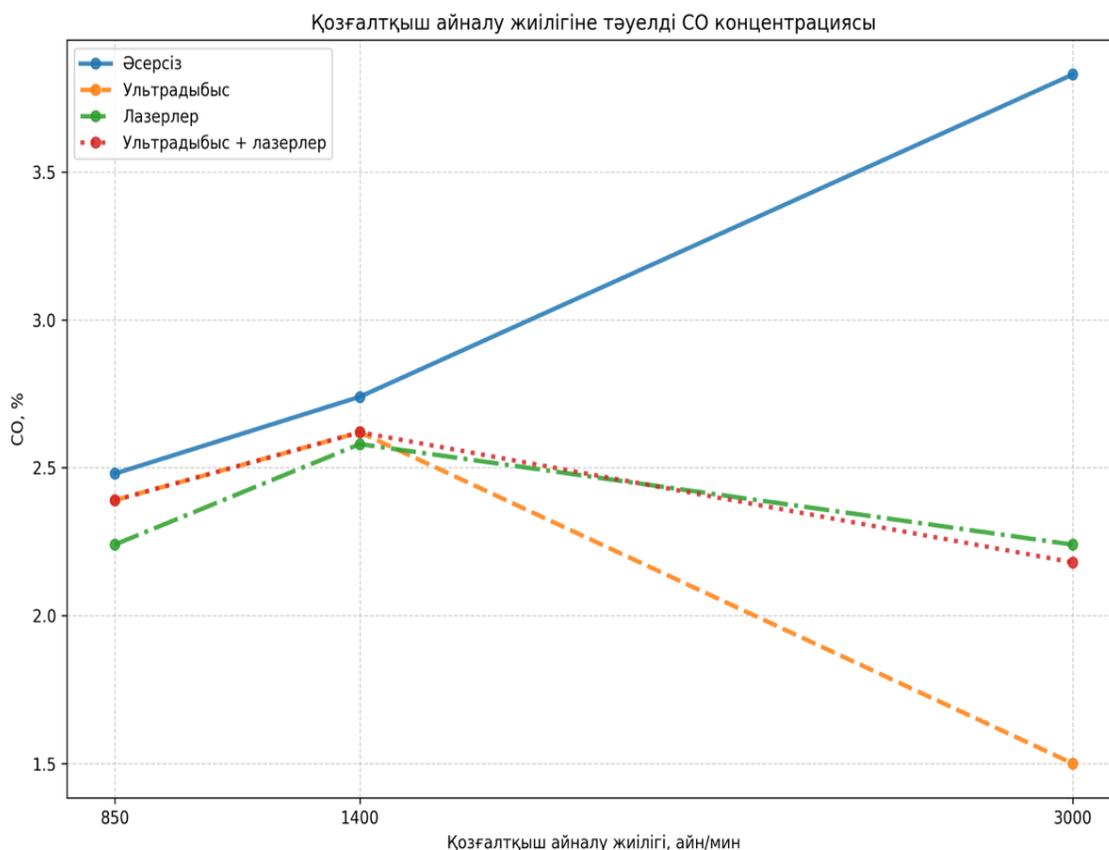
СН көрсеткіші жанудың толық еместігін және шығару жүйесіне түскен жанбай қалған көмірсутектердің мөлшерін сипаттайды. Бақылауда СН 850 айн/мин кезінде 124 ppm болып, 1400 айн/мин кезінде 176 ppm және 3000 айн/мин кезінде 184 ppm болды. 850 айн/мин кезінде ультрадыбыстық әсер СН-ты 110 ppm дейін төмендетіп, шамамен 11% төмендеу берді. Бұл ультрадыбыстың ағынды микродеңгейде араластыруы және радикалдық тотығуды күшейтуі арқылы түсіндірілуі мүмкін.



3-сурет. СН концентрациясының өзгеруі

Лазер әсері 850 айн/мин кезінде СН-ты 134 ррм дейін өсірді. Бұл құбылыс ауыр көмірсутектердің қысқа уақыт ішінде фрагментацияланып, газоанализаторда  $\text{CH}_4$  эквиваленті ретінде тіркелетін жеңіл фракциялардың артуымен байланысты болуы ықтимал. Біріктірілген режимде 850 айн/мин кезінде СН қайтадан 110 ррм деңгейіне түсті, яғни бұл режимде ультрадыбыстың әсері басым болды.

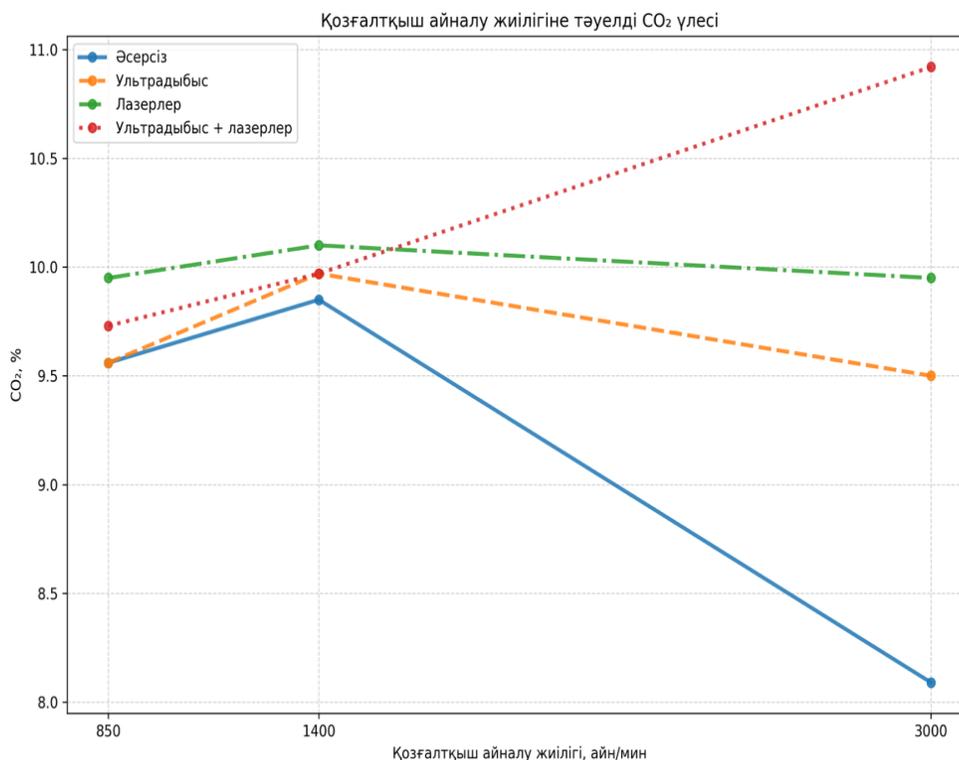
Іштен жану қозғалтқышының 1400 айн/мин кезінде ультрадыбыс, лазер және біріктірілген режимдердің барлығында СН 152 ррм деңгейіне төмендеді. Бұл шамамен 14% жақсару және қалалық режимге жақын айналымда технологияның тұрақты әсер ете алатынын көрсетеді. 3000 айн/мин кезінде лазер СН-ты 120 ррм дейін төмендетіп, 35% төмендеу берді, ал біріктірілген режим 114 ррм дейін төмендетіп, 38% шамасында нәтижеге жеткізді. Бұл жерде лазердің селективті әсері айқын көрінеді, ал ультрадыбыспен бірге қолдану ағын ішіндегі массалмасуды күшейтіп, фототермиялық және фотохимиялық әсердің «көлемдік» тиімділігін арттырған болуы ықтимал.



4-сурет. СО концентрациясының өзгеруі

СО көміртектің толық жанбауының негізгі индикаторларының бірі болып табылады және токсикологиялық тұрғыдан аса маңызды. 850 айн/мин кезінде бақылауда СО 2,48% болса, ультрадыбыс әсерінде 2,39% дейін төмендеп, шамамен 4% жақсару берді. Лазер әсері СО-ны 2,24% дейін төмендетіп, бос жүрісте лазердің ықпалы салыстырмалы түрде жоғары екенін көрсетті. 1400 айн/мин кезінде СО 2,74%-дан 2,58–2,62% аралығына түсті, бұл режимде екі әсердің ықпалы шамалы екенін байқатады.

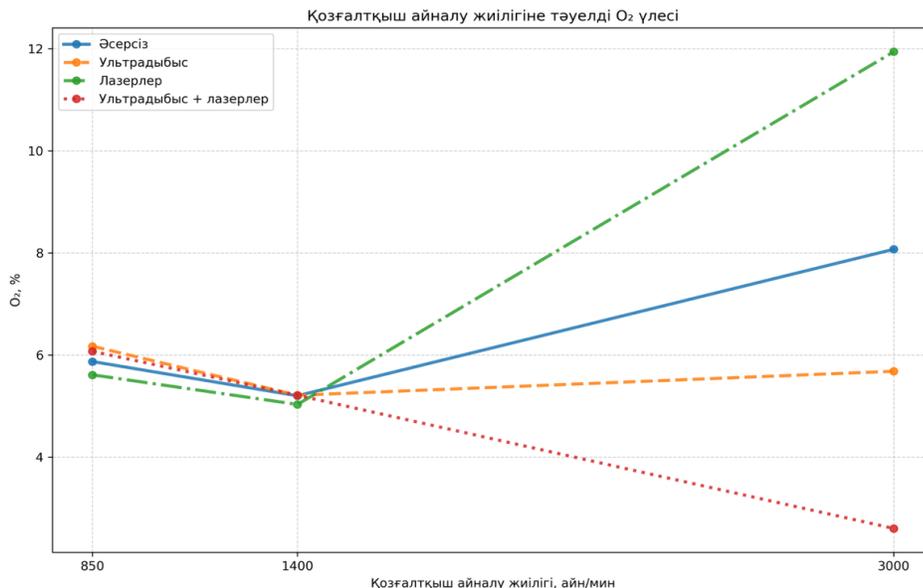
Ең күшті әсер 3000 айн/мин кезінде байқалды. Бақылауда CO 3,83% болды, ал ультрадыбыс әсерінде 1,50% дейін төмендеп, шамамен 61% төмендеу тіркелді. Мұндай айқын өзгеріс ультрадыбыстық өрістің CO тотығуын интенсификациялау әлеуетін көрсетеді. Мүмкін механизмдер ретінде ағынның турбуленттенуі, шекаралық қабаттардың бұзылуы, оттектен араласудың күшеюі және ультрадыбыстың қысым пульсациялары нәтижесінде реакция жылдамдығының артуы қарастырылады. Лазер 3000 айн/мин кезінде CO-ны 2,24% дейін төмендетіп, шамамен 42% төмендеу берді. Біріктірілген режимде CO 2,18% болды, яғни 43% төмендеу. Бұл мән ультрадыбыстың жеке режиміндегі ең төмен мәннен жоғары, алайда біріктірілген режимнің артықшылығы CO-мен қатар CN-ты да едәуір төмендетуімен анықталады. Сондықтан практикалық қолдануда екі компонентті бірге төмендету маңызды болған жағдайда біріктірілген режим тиімді компромисс ретінде қарастырылуы мүмкін. CO<sub>2</sub> жанудың толық өнімдерінің үлесін көрсетеді және CO мен CN тотығуы күшейген жағдайда CO<sub>2</sub> өседі. 850 және 1400 айн/мин кезінде CO<sub>2</sub> өзгерісі шағын болды: ультрадыбыс кезінде мәндер негізінен бақылауға жақын, лазер кезінде CO<sub>2</sub> аздап жоғарылады. 3000 айн/мин кезінде бақылауда CO<sub>2</sub> 8,09% болып, ультрадыбыспен 9,50% және лазермен 9,95% деңгейіне дейін көтерілді. Біріктірілген режимде CO<sub>2</sub> 10,92% дейін өсті, бұл жоғары айналымда жану процестерінің күшейгенін және көміртектік компоненттердің толық тотығуға ауысқанын көрсетеді.



5-сурет. CO<sub>2</sub> концентрациясының өзгеруі

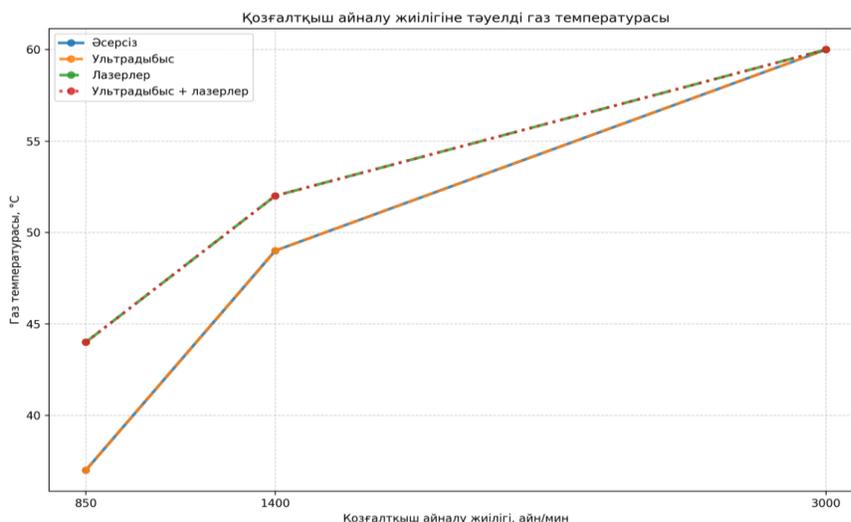
O<sub>2</sub> үлесінің өзгерісі жану мен кейінгі тотығудың ерекшелігін көрсетеді. 850 айн/мин кезінде O<sub>2</sub> 5,87%-дан ультрадыбыста 6,17% дейін көтерілді, бұл ағын құрылымының өзгеруі немесе жану тұрақтылығының аздап ауытқуы мүмкін екенін меңзейді. 1400 айн/мин кезінде айырмашылық өте аз 3000 айн/мин кезінде лазер әсерінде O<sub>2</sub> 11,94%

дейін өсуі байқалды; мұны жоғары айналымда лазердің жанама әсерінен қоспаның құрамы өзгеруімен немесе оттектің толық пайдаланылмай шығуы арқылы түсіндіруге болады.



6-сурет. O<sub>2</sub> концентрациясының өзгеруі

Біріктірілген режимде O<sub>2</sub> 2,60% дейін төмендеді, бұл оттектің СО және көмірсутектердің жануына неғұрлым толық жұмсалғанын көрсетеді. Нәтижелер жиынтығы біріктірілген әсерде тотығу реакцияларының жалпы қарқындылығы артатынын көрсетеді.



7-сурет. Эксперименттік гибриді қондырғының ішіндегі температураның өзгерісі мен қозғалтқыштың айналу жиілігінің тәуелділігі

Газ температурасы қозғалтқыш айналымы артқан сайын 37 °С-тан 60 °С-қа дейін өсті, бұл жылу бөлінуінің артуымен байланысты. Ультрадыбыстық әсер температураға айқын ықпал етпеді. Лазер әсерінде 850 және 1400 айн/мин кезінде температура 44–52 °С дейін

көтерілді. Бұл көрсеткіш дыбыс өшіргіштің көлемі бойынша орташа температура болғандықтан, лазер сәулесі бойындағы локальды аймақтарда бөлшектердің қызуы әлдеқайда жоғары болуы ықтимал; дәл осы локальды қызу беткі тотығуды күшейтетін факторлардың бірі ретінде қарастырылады. Салыстырмалы ылғалдылық барлық режимдерде шамамен 39% деңгейінде сақталды, бұл тәжірибе шарттарының тұрақты болғанын көрсетеді және кавитациялық әсерді салыстырмалы түрде бірдей ортада бағалауға мүмкіндік береді.

Статистикалық талдау және тиімділік көрсеткіштері

Өлшеулер бірнеше рет қайталанғандықтан, нәтижелердің тұрақтылығы вариация коэффициенті арқылы бағаланды. Газ компоненттері бойынша вариация коэффициенті әдетте 4–8% аралығында болды, бұл далалық стенд жағдайындағы өлшеулер үшін қабылдауға болатын деңгей. Температура бойынша шашырау 1% шамасында болды. Тиімділік көрсеткіштері бақылауға қатысты салыстырмалы төмендеу ретінде есептелді.

Мысалы, 3000 айн/мин кезінде СО үшін ультрадыбыстық режимдегі тиімділік  $\eta_{CO} = (3,83 - 1,50) / 3,83 \times 100\% \approx 60,8\%$  құрады. Сол режимде лазер үшін  $\eta_{CO} \approx 41,5\%$ , ал біріктірілген режим үшін  $\eta_{CO} \approx 43,1\%$ . СН бойынша 3000 айн/мин кезінде лазер  $\eta_{CH} \approx (184 - 120) / 184 \times 100\% \approx 34,8\%$ , ал біріктірілген режим  $\eta_{CH} \approx 38,0\%$  болды. Бұл есептер лазердің СН бойынша, ал ультрадыбыстың СО бойынша басым екенін сандық түрде растайды.

Қажет болған жағдайда 95% сенімділік интервалдары Стьюдент үлестірімі арқылы есептелді және негізгі айырмашылықтар өлшеу қателіктерінен жоғары деңгейде екенін көрсетті. Сонымен қатар, айналым мен концентрациялар арасындағы байланыстарды сапалық бағалау үшін Пирсон корреляциясы қолданылуы мүмкін; бақылауда СО айналыммен бірге өсетін тенденция көрсетсе, ультрадыбыстық режимде жоғары айналымда СО төмендеу бағытын көрсетті, бұл әсердің режимдік сипатын дәлелдейді [7].

Тазалау механизмдерінің физикалық интерпретациясы

Нәтижелерді түсіндіру үшін әсер механизмдері компоненттер бойынша қарастырылды. Ультрадыбыстық өріс қатты бөлшектерге акустикалық радиациялық күш түсіріп, олардың салыстырмалы жылдамдығын арттырады; бұл агломерацияға әкеледі. Іріленген бөлшектер тұнбаға оңай түседі және ағынның оптикалық тығыздығын төмендетеді. Сонымен бірге ультрадыбыс шекаралық қабаттарды бұзып, массалмасуды күшейтеді; бұл газ фазасындағы СО тотығу реакцияларының жылдамдығын арттыруы ықтимал. Кавитациялық әсер ылғал бар ортада радикалдардың пайда болуын күшейтіп, тотығу тізбекті реакцияларын жандандырады.

Инфрақызыл лазер сәулеленуі негізінен күйе бөлшектері арқылы жұтылып, фототермиялық қыздыруды туындатады. Қызған бөлшектер бетінде СО тотығуы және көмірсутектердің ыдырауы жүруі мүмкін. Фотодиссоциация механизмі инфрақызыл аймақта тікелей бірфотондық ыдыраудан гөрі көпфотондық жұтылу және термиялық әсер арқылы іске асуы ықтимал. Дәл осы себептен лазер әсері көмірсутектерге қатысты селективті көрінеді және жоғары айналымда СН айқын төмендеді.

Біріктірілген режимде ультрадыбыс ағынды араластырып, лазер энергиясының көлем бойынша таралуын жақсартады деп пайымдауға болады. Бұл СН бойынша синергиялық нәтижемен үйлеседі. СО бойынша синергия әрдайым байқалмауы мүмкін, өйткені СО тотығуы оттегі мөлшеріне, температураға және араласу уақытына сезімтал. Қондырғы

параметрлерін оңтайландыру арқылы (ультрадыбыс қуаты, сәуле жолы ұзындығы, лазер диодтарының орналасуы) СО және СН үшін бір мезгілде жоғары тиімділікке жетуге болады.

Ұсынылған әдістің маңызды артықшылығы – катализаторларды, адсорбенттерді немесе күрделі реагенттерді пайдаланбай, физикалық өрістер арқылы тазалау әсеріне қол жеткізу мүмкіндігі. Бұл экономикалық және экологиялық тұрғыдан тартымды, әсіресе техникалық қызмет көрсетуі қиын жағдайларда немесе ауыр техникада. Дегенмен тәжірибелік деректер бір ғана қозғалтқыш моделі мен шектеулі параметрлер жиынтығында алынғанын атап өткен жөн. Сондықтан қорытындыларды кең ауқымды паркке тарату үшін қосымша сынақтар қажет.

Шектеулердің бірі – NO<sub>x</sub> және қатты бөлшектер (PM) бойынша кеңейтілген өлшеулердің бұл жұмыста толық қамтылмауы. Келесі зерттеулерде NO<sub>x</sub> анализаторын, бөлшектер санын өлшейтін құралдарды және түтіндік көрсеткіштерді бір уақытта тіркеп, кешенді экологиялық әсерді бағалау ұсынылады. Сонымен қатар, энергия тұтыну мәселесі де маңызды. Ультрадыбыстық генератор мен лазер диодтарының қуаты салыстырмалы түрде төмен болғанымен, нақты көлікте үздіксіз қолдану кезінде электржүйеге түсетін жүктеме, жылулық режим және ұзақ мерзімді сенімділік есептелуі керек.

Қолданбалы тұрғыдан технологияны «ақылды» режимде басқару перспективалы: қозғалтқыш айналымына, жүктемесіне және газ құрамына қарай ультрадыбыс пен лазерді жеке немесе біріктіріп қосу арқылы тиімділікті арттыруға болады. Мысалы, жоғары айналымда СО төмендету үшін ультрадыбыс басым режимде, ал көмірсутектер көбейгенде лазер немесе біріктірілген режим іске қосылуы мүмкін. Мұндай басқару стратегиясы энергияны үнемдеп, тұрақты экологиялық әсер береді.

Шығарындыларды төмендетудің кең таралған тәсілі ретінде үшжолалы каталитикалық бейтараптандырғыштар СО мен көмірсутектерді СО<sub>2</sub> және Н<sub>2</sub>О дейін тотығуға, ал NO<sub>x</sub>-ты азотқа дейін тотықсыздануға бағыттайды. Бұл жүйелер тиімді болғанымен, асыл металдарға тәуелді, жұмыс температурасына сезімтал және отын қоспасының стехиометриясына қатаң талап қояды. Сонымен бірге техникалық қызмет көрсету, сапасыз отын және қысқа жүріс режимдері катализатордың улануына немесе толық қызбауына әкеліп, нақты тиімділікті төмендетеді. Сол себепті катализаторсыз немесе катализаторды толықтыратын белсенді физикалық әдістерге қызығушылық сақталады.

Қатты бөлшектерді ұстап қалуда күйе сүзгілер (DPF) кең қолданылады, бірақ оларда қарсы қысым өседі, регенерация қажеттілігі туады және пайдалану шығындары артады. Физикалық өрістерге негізделген әдістердің бір артықшылығы ағын құрылымын өзгерту арқылы бөлшектерді ірілендіру және тұндыру мүмкіндігі болып табылады. Ультрадыбыстық агломерация туралы жұмыстарда ылғалдылықтың рөлі, бөлшек өлшемдерінің таралуы және акустикалық өрістің интенсивтілігі негізгі факторлар ретінде қарастырылады. Біздің экспериментте ылғалдылық тұрақты ұсталғандықтан, ультрадыбыстың СО бойынша айқын әсері ең алдымен араласу мен тотығудың жеделдеуімен байланыстырылды, ал бөлшектердің нақты өлшемдік өзгерісін бағалау болашақта жеке міндет ретінде қарастырылады [8, 9].

Лазерлік және плазмалық технологиялар тұрғысынан шығарындыларды өңдеудің бір бағыты ретінде бейтарап емес плазма, сәулеленумен белсендіру және фотокаталитикалық қабаттар арқылы тотығу реакцияларын күшейту қарастырылады. Дегенмен мұндай

жүйелер әдетте күрделі, энергия тұтынуы жоғары немесе жоғары кернеу талап етеді. Инфрақызыл диодты лазерлердің артықшылығы олардың ықшамдылығы, басқарылуы және қауіпсіз қуат деңгейінде жұмыс істей алуы. Осы зерттеуде лазердің СН бойынша селективті әсері байқалып, инфрақызыл аймақта фототермиялық және көпфотондық әсерлердің ықтималдығы жанама түрде көрсетілді.

### **Қорытынды**

Жүргізілген эксперименттік зерттеу іштен жану қозғалтқышының шығарындылар газдарының уыттылығын төмендетуде ультрадыбыстық және инфрақызыл лазерлік әсерлерді жеке және біріктіріп қолданудың тиімділігін көрсетті. Дыбыс өшіргіш корпусына интеграцияланған құрамдастырылған қондырғы бірдей қозғалтқыш және өлшеу шарттарында әртүрлі физикалық әсерлердің ықпалын сандық түрде салыстыруға мүмкіндік берді.

Нәтижелер ультрадыбыстық әсердің, әсіресе жоғары айналым режимінде (3000 айн/мин), көміртек тотығының (СО) концентрациясын айқын төмендететінін дәлелдеді: СО мөлшері бақылаумен салыстырғанда шамамен 60–61% азайды. Бұл ультрадыбыстың ағынды турбуленттендіруі, массалмасуды күшейтуі және тотығу реакцияларын интенсификациялауымен түсіндіріледі. Инфрақызыл лазерлік сәулелену жанбай қалған көмірсутектерге (СН) қатысты селективті әсер көрсетіп, жоғары айналымда СН концентрациясын 35%-ға дейін төмендетті, бұл фототермиялық қыздыру және көмірсутектердің ыдырау механизмдерімен байланысты.

Ультрадыбыстық және лазерлік әсерлерді біріктіріп қолдану шығарындыларды кешенді түрде төмендетуге мүмкіндік берді: 3000 айн/мин кезінде СН шамамен 38%, ал СО шамамен 43% азайды. Сонымен қатар, СО<sub>2</sub> үлесінің артуы және О<sub>2</sub> концентрациясының төмендеуі жану және кейінгі тотығу процестерінің күшейгенін, яғни жану өнімдерінің неғұрлым толық өңделгенін көрсетті. Бұл біріктірілген режимде әртүрлі физикалық механизмдердің (акустикалық агломерация, кавитациялық тотығу, фототермиялық және фотохимиялық әсерлер) бірін-бірі толықтырып, синергиялық нәтиже беретінін растайды.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы ультрадыбыстық сәулелендіргіш пен инфрақызыл лазер диодтарын бір дыбыс өшіргіш корпусына біріктіретін конструкциялық шешімді ұсынуда және төрт әсер режимін бірдей әдістемемен салыстыратын эксперименттік деректерді алуда көрініс тапты. Практикалық тұрғыдан алынған нәтижелер каталитикалық материалдарды қолданбай-ақ, физикалық өрістер арқылы шығарындыларды төмендетудің баламалы және перспективалы бағытын көрсетеді.

### **Мүдделер қақтығысы**

Авторлар осы зерттеуге қатысты ешқандай мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

### **Авторлардың қосқан үлесі**

**М.С. Исабаев** – қолжазба мәтінін жазу, зерттеу әдістемесін әзірлеу, эксперименттік зерттеудің дизайнын әзірлеу, эксперименттік деректерді талдау және жүйелеу.

**Б.К. Сарсембеков** – қолжазба мәтінін жазу, зерттеу әдістемесін әзірлеу, эксперименттік зерттеудің дизайнын әзірлеу.

**Н.Б. Жаркенов** – әдеби деректерді талдау және жинақтау.

**А.Т. Умбетжанова** – графикалық материалдармен жұмыс.

**Е.К. Сарсембеков** – қолжазба мәтінін жазу, қорытындыларды тұжырымдау.

### Әдебиеттер тізімі

1. Sarsembekov, B.K.; Kadyrov, A.S.; Kunayev, V.A.; Issabayev, M.S.; Kukesheva, A.B. Experimental Comparison of Methods for Cleaning Car Exhaust Gas by Exposure Using Ultrasound and Laser Radiation. *Mater. Mech. Eng. Technol.* 2024, 3. [https://doi.org/10.52209/2706-977X\\_2024\\_3\\_44](https://doi.org/10.52209/2706-977X_2024_3_44). - ағылшын тіліндегі журнал
2. Raj, B.; Rajendran, V.; Palanichamy, P. *Science and Technology of Ultrasonics*; Alpha Science International: Oxford, UK, 2004; ISBN 978-1-84265-066-0. - ағылшын тіліндегі журнал
3. Özyalcin, C.; Sterlepper, S.; Roiser, S.; Eichlseder, H.; Pischinger, S. Exhaust gas aftertreatment to minimize NOX emissions from hydrogen-fueled internal combustion engines. *Appl. Energy* 2024, 353, 122045. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122045>. - ағылшын тіліндегі журнал
4. Sinha, D.N. *Gas Separation Using Ultrasound and Light Absorption*; Triad National Security, LLC: Los Alamos, New Mexico, 2010. - ағылшын тіліндегі журнал
5. Fujii, T. Decomposition Method for Nitrogen Oxide in Gas Mixture Containing Nitrogen Oxide. Patent JPS63267423A, 4 November 1988. Available online: <https://patents.google.com/patent/JPS63267423A/en?q=Patent+JPS63267423A> (accessed on 12 January 2026). - патент
6. Khmelev, V.N.; Shalunov, A.V.; Golykh, R.N. Increasing the Efficiency of Coagulation of Submicron Particles under Ultrasonic Action. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2020, 54, 539–550. <https://doi.org/10.1134/S0040579520030069>. - ағылшын тіліндегі журнал
7. Kumar, A. Three-Way Catalyst (TWC): The Key to Cleaner Gasoline Engine Emissions. LinkedIn Pulse. 2025. Available online: <https://www.linkedin.com/pulse/three-way-catalyst-twc-key-cleaner-gasoline-engine-emissions-kumar-ady0c> (accessed on 12 January 2026). - ағылшын тіліндегі журнал
8. Khoa, N.X.; Lim, O. A Review of the External and Internal Residual Exhaust Gas in the Internal Combustion Engine. *Energies* 2022, 15, 1208. <https://doi.org/10.3390/en15031208>. - ағылшын тіліндегі журнал
9. Lu, C.; Chen, W.; Zuo, Q.; Zhu, G.; Zhang, Y.; Liu, Z. Review of Combustion Performance Improvement and Nitrogen-Containing Pollutant Control in the Pure Hydrogen Internal Combustion Engine. *Int. J. Automot. Manuf. Mater.* 2022, 1, 7. <https://doi.org/10.53941/ijamm0101007>. - ағылшын тіліндегі журнал
10. Shamim, T. Effect of engine exhaust gas modulation on the cold start emissions. *Int. J. Automot. Technol.* 2011, 12, 475–487. <https://doi.org/10.1007/s12239-011-0056-2>.
11. Edmonds, P.D.; Sancier, K.M. Evidence for free radical production by ultrasonic cavitation in biological media. *Ultrasound Med. Biol.* 1983, 9, 635–639. [https://doi.org/10.1016/0301-5629\(83\)90009-1](https://doi.org/10.1016/0301-5629(83)90009-1).
12. Kang, I.-S.; Xi, J.; Hu, H.-Y. Photolysis and photooxidation of typical gaseous VOCs by UV Irradiation: Removal performance and mechanisms. *Front. Environ. Sci. Eng.* 2018, 12, 8. <https://doi.org/10.1007/s11783-018-1032-0>.

13. Liu, J.; Wang, J.; Zhang, G.; Zhou, J.; Cen, K. Frequency comparative study of coal-fired fly ash acoustic agglomeration. *J. Environ. Sci.* 2011, 23, 1845–1851. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(10\)60652-3](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(10)60652-3).
14. Mazyan, W.I.; Ahmadi, A.; Ahmed, H.; Hoorfar, M. Increasing efficiency of natural gas cyclones through addition of tangential chambers. *J. Aerosol Sci.* 2017, 110, 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.05.007>.
15. Gallego-Juarez, J.A.; Graff, K.F. *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2014.
16. Bergmann, L. *Der Ultraschall und Seine Anwendung in Wissenschaft und Technik*; S. Hirzel: Stuttgart, Germany, 1954.
17. Sarsembekov, B.; Issabayev, M.; Zharkenov, N.; Kaukarov, A.; Utebayev, I.; Murzagaliyev, A.; Zhamanbayev, B. Ultrasonic–Laser Hybrid Treatment for Cleaning Gasoline Engine Exhaust: An Experimental Study. *Vehicles* 2026, 8, 22. <https://doi.org/10.3390/vehicles8010022>. - ағылшын тіліндегі журнал

**М.С. Исабаев<sup>1</sup>, Б.К. Сарсембеков<sup>\*1</sup>, Н.Б. Жаркенов<sup>1</sup>,  
А.Т. Умбетжанова<sup>1</sup>, Е.К. Сарсембеков<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Қарағандинский технический университет имени Абылқаса Сағинова, Қарағанда,  
Қазақстан*

*<sup>2</sup>АО «Пассажирские перевозки», Астана, Қазақстан*

### **Экспериментальное исследование очистки выхлопных газов бензиновых двигателей при комбинированном воздействии ультразвука и лазерного излучения**

**Аннотация.** В данной работе представлено экспериментальное исследование, направленное на снижение токсичности выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания с использованием ультразвуковых волн и инфракрасного лазерного излучения. Разработана и испытана оригинальная комбинированная установка, объединяющая ультразвуковой излучатель и инфракрасный лазер, размещённые в корпусе автомобильного глушителя. В режиме без воздействия, ультразвукового воздействия, лазерного воздействия и их комбинированном применении были измерены концентрации основных компонентов выхлопных газов (несгоревшие углеводороды СН, оксид углерода СО, диоксид углерода СО<sub>2</sub>, кислород О<sub>2</sub>), а также температура газа при работе двигателя на холостом ходу и при повышенных оборотах. По отдельности данные воздействия оказывают селективное влияние на различные компоненты: ультразвук снижает концентрацию СО до 60% по сравнению с контрольным режимом при повышенных оборотах, лазерное излучение уменьшает концентрацию СН на 35–40 %. Совместное применение обеспечивает комплексное снижение концентрации вредных веществ (уменьшение СН и СО соответственно до 38 % и 43 %). Одновременно наблюдается снижение содержания О<sub>2</sub> и увеличение доли СО<sub>2</sub>, что свидетельствует о более эффективном сгорании топлива и удержании продуктов реакции. Полученные результаты подтверждают перспективность комплексного применения ультразвука и инфракрасных лазеров для очистки выхлопных газов.

**Ключевые слова:** очистка выхлопных газов, ультразвуковая очистка, инфракрасный лазер, акустическая коагуляция, фотодиссоциация, токсичные выбросы

**M.S. Issabayev<sup>1</sup>, B.K. Sarsembekov<sup>\*1</sup>, N.B. Zharkenov<sup>1</sup>, A.T. Umbetzhanova<sup>1</sup>, Y.K. Sarsembekov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan;*

<sup>2</sup>*JSC "Passenger Transportation", Astana, Kazakhstan*

### **Experimental Study of Exhaust Gas Purification from a Gasoline Engine under Combined Ultrasonic and Laser Radiation Effects**

**Abstract.** This paper presents an experimental study aimed at reducing the toxicity of internal combustion engine exhaust gases using ultrasonic waves and infrared laser radiation. An original combined device integrating an ultrasonic emitter and an infrared laser into the housing of an automobile muffler was developed and tested. Under no-treatment conditions, as well as under ultrasonic, laser, and combined exposure, the concentrations of the main exhaust gas components, including unburned hydrocarbons (CH), carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), and oxygen (O<sub>2</sub>), together with gas temperature, were measured at engine idle and at increased engine speeds. The results showed that ultrasound and laser radiation exert selective effects on different exhaust components. At higher engine speeds, ultrasonic treatment reduced CO concentration by up to 60% compared with the control mode, whereas laser radiation decreased CH concentration by 35–40%. Their combined application provided a complex reduction in harmful emissions, with CH and CO decreasing by 38% and 43%, respectively. The findings confirm the potential of the integrated use of ultrasound and infrared lasers for exhaust gas purification.

**Keywords:** Exhaust gas cleaning, ultrasonic cleaning, infrared laser, acoustic coagulation, photodissociation, toxic emissions

### **References**

1. Sarsembekov, B.K.; Kadyrov, A.S.; Kunayev, V.A.; Issabayev, M.S.; Kukesheva, A.B. Experimental Comparison of Methods for Cleaning Car Exhaust Gas by Exposure Using Ultrasound and Laser Radiation. *Mater. Mech. Eng. Technol.* 2024, 3. [https://doi.org/10.52209/2706-977X\\_2024\\_3\\_44](https://doi.org/10.52209/2706-977X_2024_3_44). - English language magazine
2. Raj, B.; Rajendran, V.; Palanichamy, P. *Science and Technology of Ultrasonics*; Alpha Science International: Oxford, UK, 2004; ISBN 978-1-84265-066-0. - English language magazine
3. Özyalcin, C.; Sterlepper, S.; Roiser, S.; Eichlseder, H.; Pischinger, S. Exhaust gas aftertreatment to minimize NOX emissions from hydrogen-fueled internal combustion engines. *Appl. Energy* 2024, 353, 122045. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122045>. - English language magazine
4. Sinha, D.N. *Gas Separation Using Ultrasound and Light Absorption*; Triad National Security, LLC: Los Alamos, New Mexico, 2010. - English language magazine
5. Fujii, T. Decomposition Method for Nitrogen Oxide in Gas Mixture Containing Nitrogen Oxide. Patent JPS63267423A, 4 November 1988. Available online:

- <https://patents.google.com/patent/JPS63267423A/en?oq=Patent+JPS63267423A> (accessed on 12 January 2026). - Patent
6. Khmelev, V.N.; Shalunov, A.V.; Golykh, R.N. Increasing the Efficiency of Coagulation of Submicron Particles under Ultrasonic Action. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2020, 54, 539–550. <https://doi.org/10.1134/S0040579520030069>. - English language magazine
  7. Kumar, A. Three-Way Catalyst (TWC): The Key to Cleaner Gasoline Engine Emissions. LinkedIn Pulse. 2025. Available online: <https://www.linkedin.com/pulse/three-way-catalyst-twc-key-cleaner-gasoline-engine-emissions-kumar-ady0c> (accessed on 12 January 2026).
  8. Khoa, N.X.; Lim, O. A Review of the External and Internal Residual Exhaust Gas in the Internal Combustion Engine. *Energies* 2022, 15, 1208. <https://doi.org/10.3390/en15031208>. - English language magazine
  9. Lu, C.; Chen, W.; Zuo, Q.; Zhu, G.; Zhang, Y.; Liu, Z. Review of Combustion Performance Improvement and Nitrogen-Containing Pollutant Control in the Pure Hydrogen Internal Combustion Engine. *Int. J. Automot. Manuf. Mater.* 2022, 1, 7. <https://doi.org/10.53941/ijamm0101007>. - English language magazine
  10. Shamim, T. Effect of engine exhaust gas modulation on the cold start emissions. *Int. J. Automot. Technol.* 2011, 12, 475–487. <https://doi.org/10.1007/s12239-011-0056-2>.
  11. Edmonds, P.D.; Sancier, K.M. Evidence for free radical production by ultrasonic cavitation in biological media. *Ultrasound Med. Biol.* 1983, 9, 635–639. [https://doi.org/10.1016/0301-5629\(83\)90009-1](https://doi.org/10.1016/0301-5629(83)90009-1).
  12. Kang, I.-S.; Xi, J.; Hu, H.-Y. Photolysis and photooxidation of typical gaseous VOCs by UV Irradiation: Removal performance and mechanisms. *Front. Environ. Sci. Eng.* 2018, 12, 8. <https://doi.org/10.1007/s11783-018-1032-0>.
  13. Liu, J.; Wang, J.; Zhang, G.; Zhou, J.; Cen, K. Frequency comparative study of coal-fired fly ash acoustic agglomeration. *J. Environ. Sci.* 2011, 23, 1845–1851. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(10\)60652-3](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(10)60652-3).
  14. Mazyan, W.I.; Ahmadi, A.; Ahmed, H.; Hoorfar, M. Increasing efficiency of natural gas cyclones through addition of tangential chambers. *J. Aerosol Sci.* 2017, 110, 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.05.007>.
  15. Gallego-Juarez, J.A.; Graff, K.F. *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2014.
  16. Bergmann, L. *Der Ultraschall und Seine Anwendung in Wissenschaft und Technik*; S. Hirzel: Stuttgart, Germany, 1954.
  17. Sarsembekov, B.; Issabayev, M.; Zharkenov, N.; Kaukarov, A.; Utebayev, I.; Murzagaliyev, A.; Zhamanbayev, B. Ultrasonic–Laser Hybrid Treatment for Cleaning Gasoline Engine Exhaust: An Experimental Study. *Vehicles* 2026, 8, 22. <https://doi.org/10.3390/vehicles8010022>. - English language magazine

#### **Авторлар туралы мәлімет:**

Исабаев М.С. – 8D07102 «Көлік, көлік техникасы және технологиялары» білім беру бағдарламасының докторанты, «Көлік техникасы және логистикалық жүйелер» кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Нұрсұлтан Назарбаев көш., 56, Бірінші ғимарат, 100027, Қарағанды, Қазақстан

Сарсембеков Б.К. – Ph.D., хат-хабар үшін автор, ассистент-профессор, «Көлік техникасы және логистикалық жүйелер» кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Нұрсұлтан Назарбаев көш., 56, Бірінші ғимарат, 100027, Қарағанды, Қазақстан

Жаркенов Н.Б. – Ph.D., қауымдастырылған профессор (доцент), кафедра меңгерушісі, «Көлік техникасы және логистикалық жүйелер» кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Нұрсұлтан Назарбаев көш., 56, Бірінші ғимарат, 100027, Қарағанды, Қазақстан

Умбетжанова А.Т. – аға оқытушы, «Көлік техникасы және логистикалық жүйелер» кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Нұрсұлтан Назарбаев көш., 56, Бірінші ғимарат, 100027, Қарағанды, Қазақстан

Сарсембеков Е.К. – жетекші инженер, «Жолаушылар тасымалы» АҚ «Солтүстік» аймақтық жолаушылар тасымалы филиалы, Мұхамеджан Тынышпаев көш., 8, Алматы ауданы, 010000, Астана, Қазақстан

Исабаев М.С. – докторант кафедрасы «Транспортная техника и логистические системы», образовательная программа 8D07102 «Транспорт, транспортное техника и технологии», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, проспект Н. Назарбаева, 56, 100027, Караганда, Казахстан

Сарсембеков Б.К. – PhD, автор для корреспонденции, ассистент профессора кафедрасы «Транспортная техника и логистические системы», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, проспект Н. Назарбаева, 56, 100027, Караганда, Казахстан

Жаркенов Н.Б. – PhD, ассоциированный профессор (доцент) кафедрасы «Транспортная техника и логистические системы», заведующий кафедрой, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, проспект Н. Назарбаева, 56, 100027, Караганда, Казахстан

Умбетжанова А.Т. – старший преподаватель кафедрасы «Транспортная техника и логистические системы», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, проспект Н. Назарбаева, 56, 100027, Караганда, Казахстан,

Сарсембеков Е.К. – ведущий инженер сектора по сервисному обслуживанию регионального филиала по пассажирским перевозкам «Северный» АО «Пассажирские перевозки», ул. Мухамеджана Тынышпаева, 8, 010000, Астана, Казахстан

Issabayev M.S. – NJSC "Abylkas Saginov Karaganda Technical University", doctoral student of the educational program 8D07102 "Transport, transport equipment and technology", Department of "Transport Technology and Logistics Systems", Nursultan Nazarbayev Avenue, 56 - Building 1, 100027, Karaganda, Kazakhstan.

Sarsembekov B.K. – PhD, Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Transport Engineering and Logistics Systems, NJSC "Abylkas Saginov Karaganda Technical University", 56 Nursultan Nazarbayev Avenue, Academic Building No. 1, 100027, Karaganda, Kazakhstan.

Zharkenov N.B. – PhD, Associate Professor (Docent), Department of Transport Engineering

and Logistics Systems, Head of the Department, NJSC "Abylkas Saginov Karaganda Technical University", 56 Nursultan Nazarbayev Avenue, Academic Building No. 1, 100027, Karaganda, Kazakhstan.

Umbetzhanova A.T. – Senior Lecturer, Department of Transport Engineering and Logistics Systems, NJSC "Abylkas Saginov Karaganda Technical University", 56 Nursultan Nazarbayev Avenue, Academic Building No. 1, 100027, Karaganda, Kazakhstan.

Sarsembekov E.K. – Lead Engineer, Service Maintenance Sector, "Northern" Regional Branch for Passenger Transportation, JSC "Passenger Transportation", 8 Mukhamedzhan Tynyshpaev Street (Almaty District), 010000, Kazakhstan.



**Copyright:** © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/>)