

С.А. Болегенова , А.С. Аскарова ,
Ш.С. Оспанова* , К.А. Болегенова 

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.
*e-mail: Shynar.Ospanova@kaznu.edu.kz

ӘСЕРЛЕСЕТІН ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ ИЗОТЕРМИЯЛЫҚ ЕМЕС СҰЙЫҚ БҮРКУЛЕРДІҢ ҚАЛЫПТАСУЫ МЕН ДАМУ ДИНАМИКАСЫН ЗЕРТТЕУ

Әсерлесетін жүйелер уақыт пен кеңістіктің кең ауқымында бір уақытта болатын бірнеше процестер арасындағы өзара әрекеттесуді қамтиды. Жану барысында химиялық энергияның босап шығуы қысымның, температура мен тығыздықтың градиенттерін тудырады, өз кезегінде соңғылары масса, импульс пен энергия тасымалына алып келетін газдардағы процестердің көзі болып табылады. Сұйықтар мен газдар динамикасы және олардағы химиялық реакциялардың арасындағы орасан зор, әрі біртекті өзара әрекеттесудің салдарынан әсерлесетін ағыстарды тәжірибелік зерттеу және оған қатысты қатаң теорияны қалыптастыру қиынға соғады. Сондықтан осындай тектес күрделі жүйелерді болжау, әрі олардың қасиеттерін зерттеу үшін сандық модельдеу табысты түрде жүзеге асырылады. Тәжірибелік бақылаулар мен жуықталған теориялық модельдер ашық физикалық жүйенің бағынуы тиіс заңдарын ұсынады. Сандық тәжірибелердің көмегімен осы заңдардың орындалуын тексеруге мүмкіндік туады. Берілген жұмыста сұйық отындардың тамшыларының булану, жану және дисперсиясы процестеріне жану камерасындағы газ температурасының әсеріне қатысты есептеу тәжірибелері жүргізілді. Жүргізілген модельдік тәжірибелердің нәтижесінде жану камерасындағы сұйық отын тамшыларының камера биіктігі бойымен дисперсиясы, алау температурасының таралуы мен жану өнімдерінің концентрациясының бастапқы газ температурасына тәуелділік графиктері алынды. Жүргізілген модельдеу тәжірибелері мен жүзеге асатын жылу және масса тасымалы процестерінің ерекшеліктерін зерттеу нәтижесінде тиімді жану режимі анықталды.

Түйін сөздер: жану, температура, булану, бүрку, инжектор, дисперсия, химиялық ауысу.

S.A. Bolegenova, A.S. Askarova, Sh.S. Ospanova*, K.A. Bolegenova
Al-Farabi Kazakh national university, Kazakhstan, Almaty
*e-mail: Shynar.Ospanova@kaznu.edu.kz

Investigation of the formation and development dynamics of nonisothermal liquid injections in reacting systems

Reacting systems involve the interaction between several processes occurring simultaneously over a wide range of time and space scales. The release of chemical energy during combustion generates pressure, temperature, and density gradients, which, in turn, are sources of processes in gases leading to the transfer of mass, momentum, and energy. The strong and ambiguous interaction between the dynamics of liquids and gases and their chemical reactions seriously complicates the experimental study of reacting flows and the creation of any more or less rigorous theory. Therefore, numerical simulation can be successfully used to predict and study the behavior of such complex systems. Experimental observations and approximate theoretical models provide laws that an open physical system must obey. Numerical experiments can be used to verify the fulfillment of these laws. In this paper, computational experiments were carried out on the influence of gas temperature in the combustion chamber on the processes of evaporation, combustion, and dispersion of liquid fuel droplets. As a result of the model experiments, dispersions of liquid fuel droplets along the height of the combustion chamber, the distribution of the temperature plume, and the dependence of the concentration of combustion products on the initial gas temperature were obtained. As a result of the experiments on modeling and studying the features of the implemented heat and mass transfer processes, an effective combustion mode was determined.

Key words: combustion, temperature, evaporation, spray, injector, dispersion, chemical transformation.

С.А. Болегенова, А.С. Аскарова, Ш.С. Оспанова*, К.А. Болегенова
Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы
*e-mail: Shynar.Ospanova@kaznu.edu.kz

Исследование формирования и динамики развития неизотермических жидких впрысков в реагирующих системах

Взаимодействие между технологическими процессами, происходящими попутно в огромном диапазоне масштабов времени и пространства, являются основой реагирующих систем. Под влиянием высвобождаемой химической энергии горения топлив такие физические параметры течения как давление, температура и плотность среды претерпевают изменения, приводящие к переносу массы, импульса и энергии в газах. Существует мощное и многозначное взаимодействие между динамикой газожидкостной среды и физико-химическими реакциями в ней, что серьезно усложняет экспериментальное исследование реактивных потоков и создание, описывающую их строгую теорию. По этой причине компьютерное моделирование может успешно использоваться для прогнозирования и изучения поведения таких сложных технологических систем. Экспериментальные наблюдения и приближительные фундаментальные модели предписывают законы, которым должны следовать открытые физические системы. Численные эксперименты могут послужить подтверждением проверки выполнения предлагаемых законов. В данной работе проведены вычислительные эксперименты по влиянию температуры газа в камере сгорания на процессы испарения, горения и дисперсии капель жидкого топлива. В результате проведенных модельных экспериментов были получены дисперсии капель жидкого топлива по высоте камеры сгорания, распределения температурного факела и зависимости концентрации продуктов сгорания от исходной температуры газа. В результате проведенных экспериментов по моделированию и изучения особенностей реализуемых процессов тепломассопереноса был определен эффективный режим горения.

Ключевые слова: горение, температура, испарение, распыл, инжектор, дисперсия, химическое превращение.

Кіріспе

Көпфазалы ағыстардың жалпы тізімінде гетерогенділіктен басқа химиялық реакциялар мен турбуленттілік сияқты процестермен қоса жүретін ағыстар ерекше орын алады. Біріншіден, мұндай ағындарды модельдеу (көпфазалылық, химиялық реакциялар мен турбуленттіліктің үйлесімі) үлкен ғылыми және практикалық қызығушылық тудырса, екінші жағынан, бұл модельдеу осы ағындарды басқаратын процестердің аса күрделілігі мен көпфакторлы сипатына байланысты айтарлықтай қиындықтарға әкеледі. Мұндай процестердің сипаттық мысалына көптеген энергетикалық қондырғылардағы (іштен жану қозғалтқыштары, газ турбиналы қондырғылар, зымырандық қозғалтқыштар және т.б.) жану құбылысын келтіруге болады. Қазіргі уақытта аталған процестер сандық және компьютерлік модельдеудің көмегімен азды-көпті шешіліп жатыр [1].

Осы орайда жоғарыда аталған турбулентті химиялық жану процестері жүзеге асатын дизельдік және бензиндік іштен жану қозғалтқыштарынан бөлінетін зиянды қалдықтардың әсерін азайту, жану процесін оңтайландыру және экологияландыру сауалдарын барша әлем қатаң бақылауға алып отыр. Сәйкесінше, осы

мақсатта іштен жану қозғалтқышының отын үнемділігін қамтамасыз ететін, әрі бөлінетін зиянды күйе, түтін мен азот тотықтарының деңгейін төмендететін іштен жану қозғалтқыштарының жану жүйелерін құрастыру өзекті тақырыптардың бірі болып отыр.

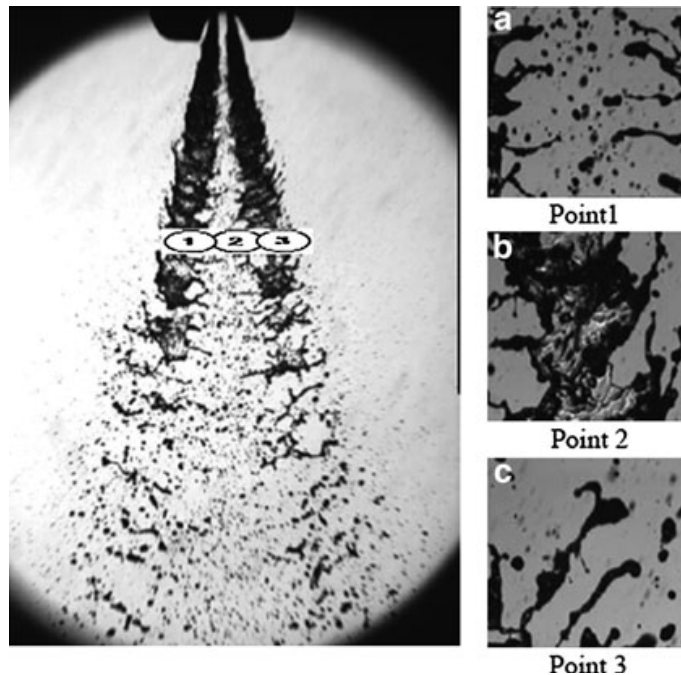
Тәжірибелік тұрғыдан сандық трассерлік визуализацияның көмегімен түрлі бұрку қысымдарына сәйкес серіктес газдың форсунканың шығысында қоспаның түзілуіне әсеріне баса назар аударылып келеді [2]. Бірқатар зерттеулер бұркулердің флуктуацияларының салдарынан болатын серіктес ауа ағынымен қоса жүретін алуан түрлі ағыншаларға да арналған [3]. Көптеген авторлар бұркудің сақиналы ұңғымасын талдау кезінде серіктес ауа ағынының бұркудің құрылымына әсерін сандық, әрі тәжірибелік тұрғыдан зерттеген [4]. Ал [5] жұмыстың авторлары буланатын көпағыншалы бұркуге зерттеу жүргізе отырып, тәжірибелік тұрғыдан бұрку ядросына серіктес ауа ағынының енуі және ондағы отын буының шоғырлануын толық көрсете білген. Дегенмен аталған зерттеулердің нәтижелері серіктес ауа ағынының ілесуі мен оның бұркудің сипатына әсері құбылыстарын түсіндіре алмайды.

Түрлі құрылғыларда бүркілген сұйық отынды жағу барысында жану өнімдерімен араласатын

тотықтырғыш ортасында тамшылардың жану кинетикасы маңызды рөл атқарады. Бүркілген сұйық отын тамшылардың полидисперсті жүйесін құрайды, сондықтан жану процесінің кинетикасы жүйенің үлесу функциялары бойынша орташаланған сипаттамаларымен анықталады [6].

Бүгінгі таңда өндірістегі жолаушылар көліктерінің көпшілігі дәстүрлі карбюраторлық қозғалтқыштарға қарағанда өнімділігі мен сенімділігі жоғары отынды бүрку жүйесі (инжекторлық қозғалтқыштар) бар қозғалтқыштармен жабдықталған. Отынды бүрку жүйелерінің екі түрі кең таралған: орталықтандырылған немесе монобүрку және үлестірілген немесе көпағыншалы бүрку. Бұл жүйелердің жұмыс істеу принциптері бірдей болғанымен, форсуноктарының санымен және олардың жұмыс режимдерімен ерекшеленеді. Инжекторлық қозғалтқышта карбюратордың орнына бір немесе бірнеше отын инжекторлары орнатылады, олар бензинді қабылдау коллекторына немесе тікелей цилиндрлерге бүркиді (отын-ауалы қоспаны қалыптастыру үшін ауа коллекторға дроссель қондырғысы арқылы жеткізіледі). Мұндай шешім жанғыш қоспаның біртектілігі мен жоғары сапасына қол жеткізуге ғана емес, ең бастысы жүктеме мен басқа жағдайларға байланысты қозғалтқыштың жұмыс режимін қарапайым етіп орнатуға мүмкіндік береді

Отынды тікелей бүрку жүйелері (GDI) өзінің құрылысының күрделілігі мен құнының қымбат болуына қарамастан қуат пен үнемділіктің ең жақсы көрсеткіштерін қамтамасыз ете алады. Сондай-ақ, тікелей бүркуге негізделген қозғалтқыштардың жұмыс режимін шапшаң өзгертуге, әрі әр цилиндрге отынды беруді мүмкіндігінше дәл реттеуге болады. Тікелей отынды бүрку жүйелерінде форсуноктар қозғалтқыштың ұшына орнатылып, отынды бірден цилиндрге бүркиді, яғни кіріс коллекторы мен кіріс клапаны сияқты аралық бөлшектері болмайды. Мұндай шешім техникалық тұрғыдан жүзеге асыруға қиынға соғады, өйткені, клапандар мен тұтату шамы орналасқан цилиндрдің басқы тұсына форсунокты да орнату керек болады. Сондықтан тікелей бүрку жүйелерін қуаты жеткілікті жоғары, әрі габаритті қозғалтқыштарда ғана қолдануға болады. Тікелей бүрку жүйелері отын сапасының жоғары болуын, әрі жиі техникалық қызмет көрсетуді қажет етсе де, олар отын мөлшерін айтарлықтай үнемдейді және қозғалтқыштың сенімді және сапалы жұмысын қамтамасыз етеді. Төменде 1 суретте екіағыншалы бүрку жүйесімен жабдықталған тікелей бүркуге негізделген инжектордың ұлғайтылған бейнесі келтірілген [7].



1-сурет – Отынды инжекторлы бүрку жүйелеріндегі екіағыншалы бүркудің үлкейтілген құрылымы

Тәжірибелік мәліметтердің көмегімен инжекторлардың дизайнын жақсартуға қатысты нақты қорытынды жасау мүмкін емес. Дегенмен осы күні жеткілікті шапшаң дамып келе жатқан модельдеу әдістері алға қойылған мәселені тереңінен түсінуге түрткі болмақ.

Аталмыш іштен жану қозғалтқыштарының артықшылықтарына мыналарды жатқызуға болады:

- қоспа түзудің бірнеше түрінде жұмыс істеу мүмкіндігі қарастырылған. Қуатын жоғалтпай, кедейленген отын қоспасында үнемді жұмыс істей алады;

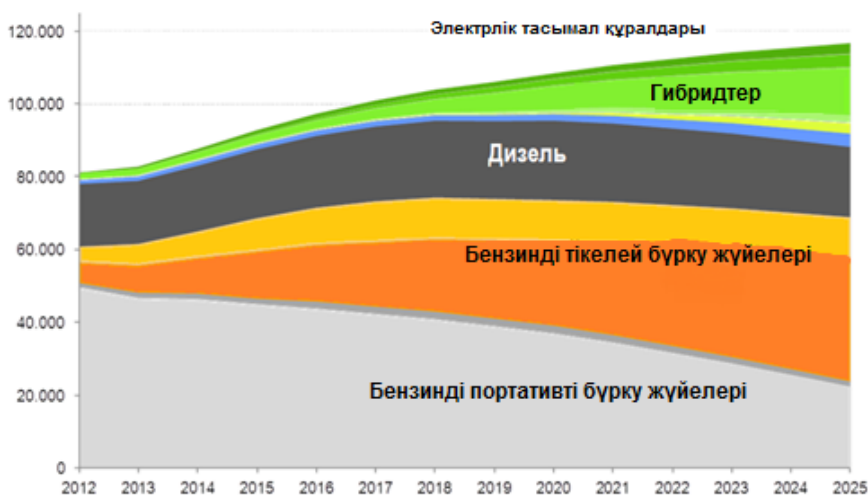
- GDI қозғалтқыштарында отын-ауалы қоспаның сығылу дәрежесі жоғары болады. Бұл қозғалтқыштың өз ресурсын ұлғайту арқылы оқыстан тұтанудан және детонациядан аулақ болуға көмектеседі;

- атмосфераға бөлінетін көмірқышқыл газы мен өзге зиянды бөлшектердің шығысы азаяды. Бұл қоспаның толық жануын қамтамасыз ететін көпқабатты қоспаны қалыптастыру арқылы жүзеге асырылады.

Отынды тікелей бұрку жүйелерінің кемшіліктері де жоқ емес: отынды қабылдау және беру жүйесі күрделі, әрі GDI қозғалтқышы пайдаланылатын отынның сапасына өте сезімтал болады.

Нәтижесінде форсуноктардың кокстелуі мен бітелу мәселесі жүргізуші үшін бірінші орынға шығады, салдарынан қуаттың жоғалуына және отын шығынының артуына әкеледі. 2 суретте іштен жану қозғалтқыштарының әлем бойынша тұтынылу статистикасы келтірілген. Суреттен көрініп тұрғанындай, басқа бұрку жүйелеріне қарағанда тікелей бұрку жүйелерінің өндірісінің болашақта ұлғая түсетіндігін байқауға болады. Ал отынды порт арқылы бұрку жүйелеріне деген сұраныстың төмендеу тенденциясын атап айтқан жөн.

Отынды тікелей бұрку қозғалтқыштарында (GDI немесе DISI) жұмысшы отын цилиндрдің әр түрлі тактілеріне сәйкес қозғалтқыштың жүктеме шарттары бойынша беріледі. Отын жоғары жедел жүктеме шарттарында түсу тактісінде беріліп, іштен жану қозғалтқышы біртекті зарядталған ұшқынды тұтану жүйесі бар стехиометриялық жылулық жүйе ретінде қызмет атқарады. GDI қозғалтқыштары өздерінің бірқатар артықшылықтарының болуына байланысты PFI қозғалтқыштарына қарағанда отынды 15%-ға үнемді тұтынады [8, 9].



2-сурет – Іштен жану қозғалтқыштарындағы бұрку жүйелеріне сұраныс статистикасы

GDI қозғалтқыштарында отын көпсаңылаулы жүйемен қамтылған форсунка арқылы 200 барға тең қысым мәнінде жану камерасына бүркіледі. Отынды тікелей бұрку қозғалтқыштарының көпағыншалы жүйесінен жоғары қысымда шығарылатын бұркудің құрылымы мен пішіні

сұйық жіпшелер мен диаметрлері сан түрлі тамшылардан тұрады.

Сұйық отын бүркілген соң іштен жану қозғалтқышының жану камерасында сақиналы пішіндегі ағыншалар қалыптасады. Қалыпты жағдайда инжектор сопласынан бүркіліп

шыққан сәтте оның кіріс бөлімінде сұйық жіпшелер түзіліп, өз кезегінде олар әрі қарай ағыс бойымен қозғала отырып, серіктес ауа ағынымен әсерлесу салдарынан тамшыларға айналады. Аталмыш процестің салдарынан сұйық отынның бетінде ауа молекулаларының бей-берекет қозғалуының әсерінен орнықсыздық, яғни ағынның үзілу құбылысы орын алады. Ағыс бойымен қозғалып бара жатқан тамшылар бір-бірімен соқтығысуының нәтижесінде бірігіп не бірнеше тамшыларға жіктеле отырып, әсерлесетін ағынның жиегінде буланады (3-сурет) [8].



1 – ине, 2 – клапан, 3 – инжектор корпусы, 4 – отынды беру, 5 – электрлік жалғағыш, 6 – күш жетегі, 7 – сопло

3-сурет – Отынды тікелей бүрку жүйесінің (GDI) көлденең қимасының проекциясы

Әдістер мен нысанның моделі

Берілген жұмыста іштен жану қозғалтқыштарындағы жылулық процестерді сипаттайтын келесі теңдеулер жүйесінен тұратын математикалық модель құрастырылды: үзіліссіздік және қозғалыс теңдеулері, энергияның және отын концентрациясы компоненттерінің сақталу заңдары.

Үзіліссіздік теңдеуінің түрі төмендегідей болады [10, 11]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = S_{mass}, \quad (1)$$

мұндағы u – отын қоспасының жылдамдығы. Екіфазалы газ-сұйық ағысы қарастырылатын жағдайда S_{mass} ағын көзі буланудың немесе конденсация құбылысының есебінен газ тығыздығының локальді өзгерісін білдіреді. Бірфазалы ағыстарда жоғарыдағы массалық ағын көзі нөлге тең болады.

Газ бөлшектерінің қозғалыс теңдеуі төмендегі түрде жазылады [10, 11]:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \text{grad})\vec{u} = \text{div} \vec{\xi} + \rho \vec{g} + S_{mom},$$

$$\vec{\xi} = -P\vec{I} + \vec{\tau}. \quad (2)$$

(2) теңдеудің оң жағы қысым градиентінің, тұтқыр кернеу тензоры мен көлемдік ауырлық күшінің есебінен импульс өзгерісінің салдарынан болатын энергия өсімшесін білдіреді.

Мұндағы $D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ – деформация жылдамдығының тензоры, \vec{I} – бірлік матрица, μ және λ – сәйкесінше, динамикалық және екінші тұтқырлық коэффициенттері.

Газдың бірфазалы ағысы үшін $S_{mom} = 0$; біздің жағдайымызда екіфазалы ағыс қарастырылатындықтан S_{mom} тамшылардың қозғалысы салдарынан газ фазасындағы бөлшектердің импульсінің өзгеруінің локальді жылдамдығын білдіреді.

Ішкі энергияның сақталу заңы былайша жазылады [10, 11]:

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} = \vec{\tau} : \vec{D} - \rho \text{div} \vec{u} - \text{div} \vec{q} + S_{energy}, \quad (3)$$

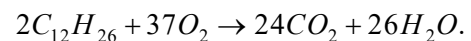
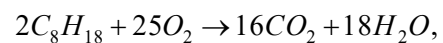
мұндағы q Фурье заңымен сипатталатын меншікті жылу ағынын, $\vec{\tau} : \vec{D}$ шамасы тұтқыр диссипацияның салдарынан болатын ішкі энергияның өсімшесін білдіреді. S_{energy} ағын көзі бүркілген сұйық фазаның есебінен ішкі энергияның өзгерісіне қосылатын өсімшені сипаттайды.

Отын-ауалы қоспа концентрациясының m компоненті үшін сақталу заңы келесідей түрге ие болады [12, 13]:

$$\frac{\partial (\rho c_m)}{\partial t} = - \frac{\partial (\rho c_m u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho \cdot D_{cm} \cdot \frac{\partial c_m}{\partial x_i} \right) + S_{mass}, \quad (4)$$

мұндағы ρ – отын массасының толық тығыздығы.

Жұмыста іштен жану қозғалтқыштарында жиі пайдаланылатын октан және додекан сұйық отындары қолданылды. Олардың химиялық жану реакциясы төмендегідей:



Аталған реакциялардың нәтижесінде көмірқышқыл газы мен су түзіледі.

Жүргізілген есептеу тәжірибелері KIVA-II компьютерлік бағдарламасының негізінде бензиндік және дизельдік іштен жану қозғалтқыштарында жүзеге асырылатын жылулық процестердің химиялық кинетикасын зерттеу үшін бейімделді. Аталмыш бағдарламалық пакет Рейнольдс саны жоғары турбулентті жану камераларындағы сұйық отын тамшыларының дисперсиясы, жану және булану процестерін модельдеу үшін қолданылды. Бағдарламаның көмегімен ағыстың аэродинамикалық, температуралық, химиялық және жану өнімдерінің сипаттамаларын есептеуге болады.

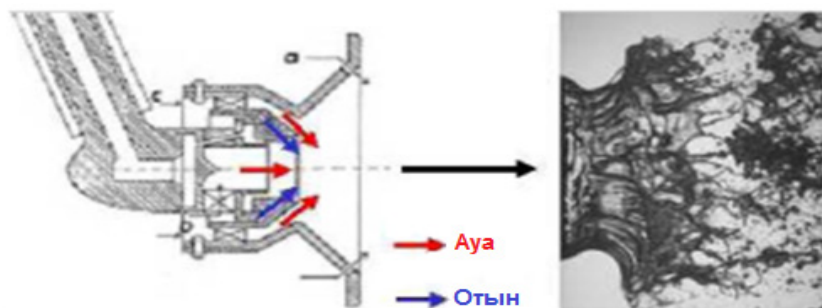
Есептеуіш тәжірибе нәтижелері

Отын ағыншасы авиациялық және зымырандық іштен жану қозғалтқыштарында жоғары жылдамдықтағы инертті газдың серіктес ағынымен параллельді бүркіліп, орағыта жанады. Түзілген отын жіпшелері серіктес газ ағынының әсерінен тамшыларға бөлініп, бұл құбылыс серіктес ауа ағынымен бүрку (АВА) деп аталады. Жоғарыда суреттелген құбылыс

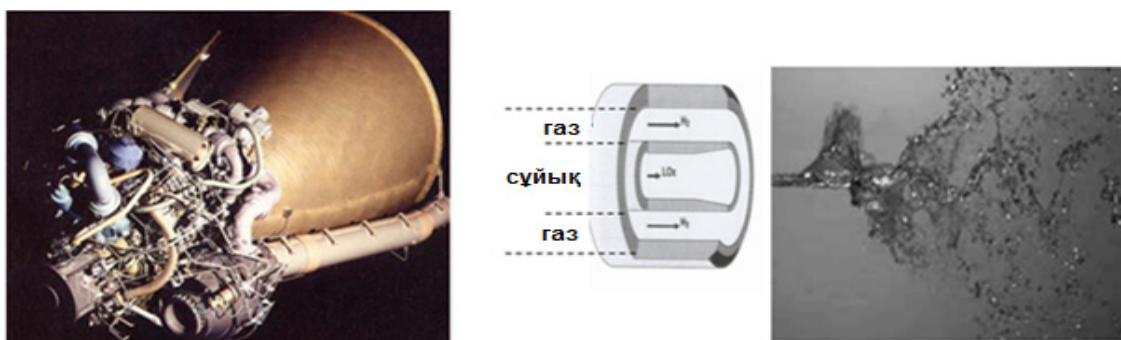
орын алатын авиациялық қозғалтқыштардағы бүрку процесінің құрылымы мен динамикасы төмендегі 4-суретте бейнеленген.

Авиациялық іштен жану жүйелерінде инжектор форсункасынан төменгі қысымда бүркілген сұйық отын ағыншасының пішіні жұқа сақиналы жапырақша түрінде болады. Шапшаң қозғалатын серіктес ауа ағыны отын ағыншасын екі жағынан көмкеріп, энергияның орасан зор үлесін орташаланған ағысқа тасымалдайды. Серіктес газ ағынымен әсерлесу салдарынан сұйық жапырақшалары жіктеліп, ағын бойымен таралады. Салдарынан жіпшелер серіктес ауаның кедергілік әсерінен байланысқан фрагменттер мен ұсақ тамшыларға бөлінеді [14, 16].

Зымырандық іштен жану жүйелеріндегі шарттар бойынша отын қоспасының серіктес ауа ағынымен бүркілу сызбасы 5 суретте бейнеленген [17-19]. Бұл жүйеде төменгі жылдамдықпен қозғалып келе жатқан сұйық оттегінің орталық ағыншасы жоғары жылдамдықтағы газ тәрізді сутегі ағынымен ілеседі. Толқын тәрізді таралатын сұйық отын ағыншасы қозғалыстағы газдың жоғары жылдамдығының әсерінен жіпшелер мен ұсақ тамшыларға бөлініп, таралады.

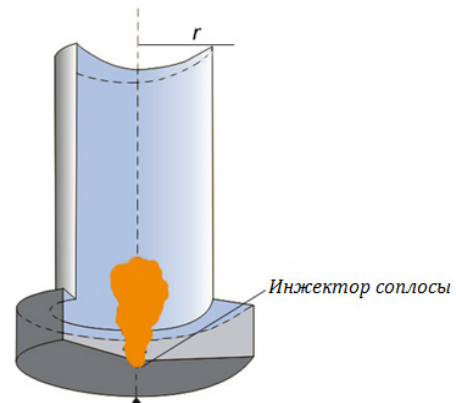


4-сурет – Авиациялық іштен жану жүйесіндегі отын ағыншасының серіктес инертті ортамен әсері



5-сурет – Зымырандық іштен жану жүйесіндегі серіктес ауа ағынымен орай ағу сызбасы

Жұмыста биіктігі 15 см, диаметрі 4 см болатын формасы цилиндр тәрізді іштен жану қозғалтқышының жану камерасының прототипі қолданылды. Құрастырылған модельдік жану камерасының геометриясы 6-суретте бейнеленген. Есептеу тәжірибелері қамтылған бақылаушы ұяшықтардың саны – 650. Сұйық отын жану камерасының төменгі тұсында орналасқан инжектор сопласы арқылы бүркіледі. Инжектор сопласының ауданы $2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ құрайды. Камера қабырғаларының меншікті температурасы 353 К тең болды. Тотықтырғыштың бастапқы температурасы 900 К. Тамшылар бастапқы Саутер радиусы 25 мкм тең мәнінде бүркіліп отырды. Форсунканы бағыттаушы бүрку бұрышы 10° . Сұйық отын бастапқы 350 м/с жылдамдықпен камераның орта тұсына бүркілді.

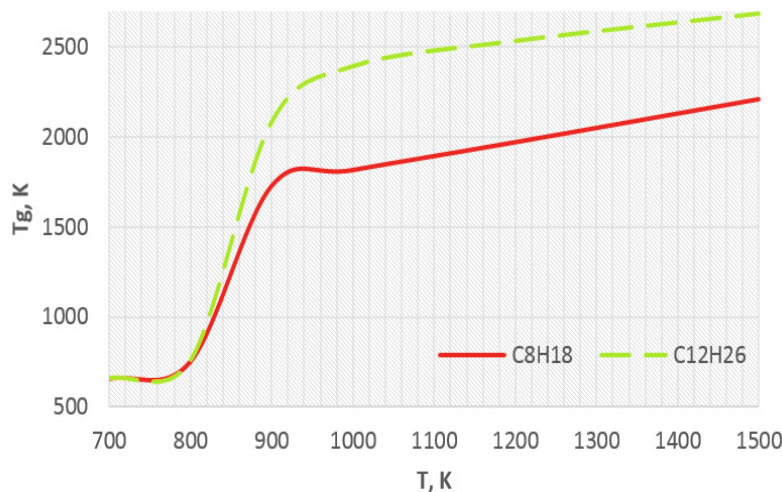


6-сурет – Модельдік жану камерасының жалпы түрі

7-суретті талдау көрсеткендей, жану камерасындағы тотықтырғыш 900 К-нен жоғары температура мәніне ие болса, онда сұйық отын үлкен жылу бөлінуімен және жану камерасының едәуір қыздырылуымен қоса жүреді.

Берілген жұмыста жану камерасындағы температураның мәні 700 К-нен 1500 К-ге дейін өзгеріп отырды. Камерадағы бастапқы қысымның мәні октан үшін 100 бар, ал додекан үшін 80 барға тең етіп алынды [20-23]. Жүргізілген есептеу тәжірибелерінің нәтижесінде 800 К температурадан төменгі мәндерде жану процесі жүзеге аспайтындығы анықталды. Мұны төмендегі газдың максимал температурасының жану камерасындағы тотықтырғыштың бастапқы температурасына тәуелділігін бейнелейтін 7 суреттен көруге болады.

Октанның жануы барысында $T=900 \text{ К}$ мәнінде $T=1726 \text{ К}$ және $T=1500 \text{ К}$ мәнінде $T=2208 \text{ К}$ температура мәндері бөлінеді. Жану камерасындағы бастапқы температура додеканның жану процесіне айтарлықтай әсер ететіндігін температураның мәні 900 К-нен 1500 К-ге дейін ұлғайғанда камерадағы максимал температураның мәні 2080 К-нен 2685 К-ге дейін артатындығымен дәлелдеуге болады.

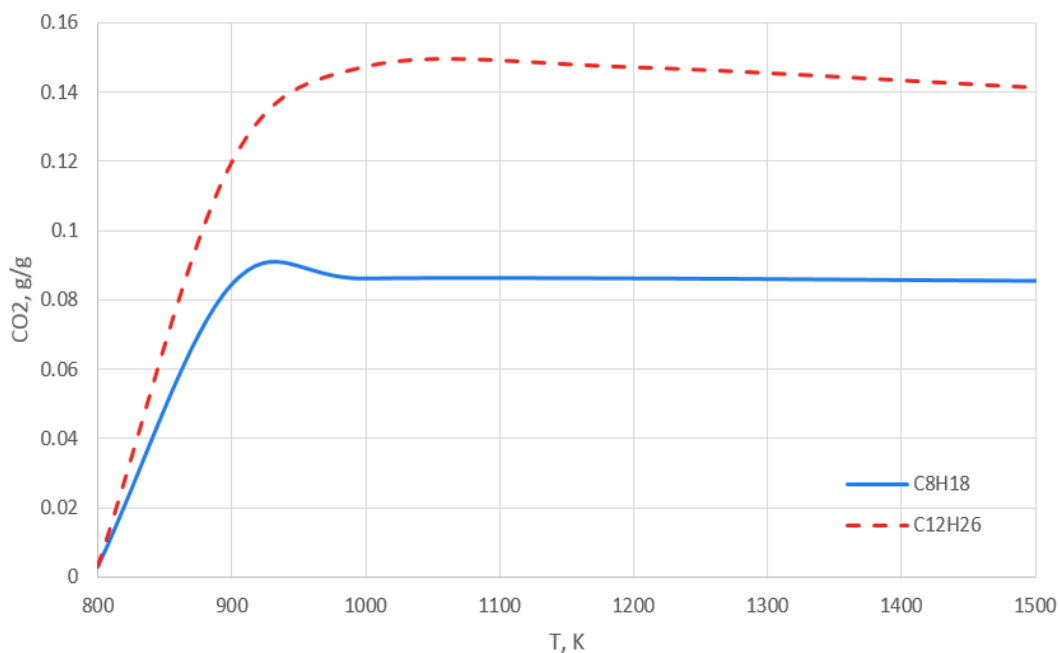


7-сурет – Жану камерасындағы газдың бастапқы температурасына қатысты отындардың максимал жану температурасының таралуы

8-суретте жану камерасындағы газдың бастапқы температурасына қатысты қарастырылып отырған екі отын түрлері үшін көмірқышқыл газының максимал концентрациясының таралуы бейнеленген. Додекан жанғанда түзілетін CO_2 газының концентрациясы бастапқы 1000 К температурада 0,148 г/г құрайды, ал 900 К температурада минимал 0,120 г/г мәнге тең болады.

Октанның жануы кезінде $T=900$ К температурада CO_2 концентрациясы едәуір артатындығы байқалады, яғни 0,085 г/г жетеді.

Келесі суреттерде октан мен додеканның тиімді температура мәнінде жану процесі мен түзілетін жану өнімдерінің таралуын зерттеу бойынша есептеу тәжірибелерінің нәтижелері келтірілген.



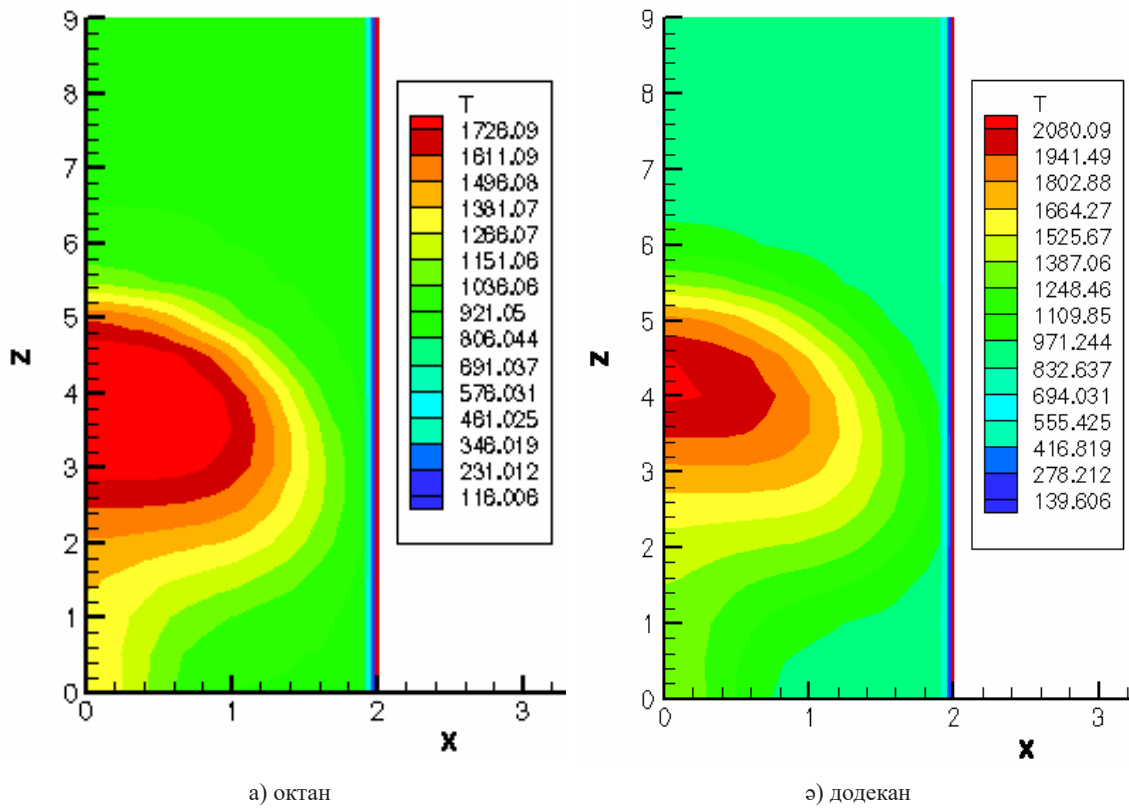
8-сурет – Жану камерасындағы газдың бастапқы температурасына қатысты түзілетін көмірқышқыл газының концентрациялары

9-суретте процестің $t=3$ мс уақыт мезетіндегі октан және додекан сұйық отындарының жануы нәтижесіндегі камера кеңістігіндегі температура профилдері келтірілген. Буланған отын тамшылары тотықтырғышпен араласқан соң қоспаның жылдамдығы артып, шапшаң жану процесі басталады. Алау аядросы жану камерасының ені бойымен үлкен ауданды қамтиды. Суретте көрсетілген температура профилдерін салыстыру арқылы октан тамшыларының жануы нәтижесіндегі ең жоғары температура мәні 1726 К, ал додеканның максимал жану температурасы 2080 К болатындығын көреміз. Осылайша додекан үшін температуралық алаудың мәні камера өсінде жоғары екендігін топшылауға болады.

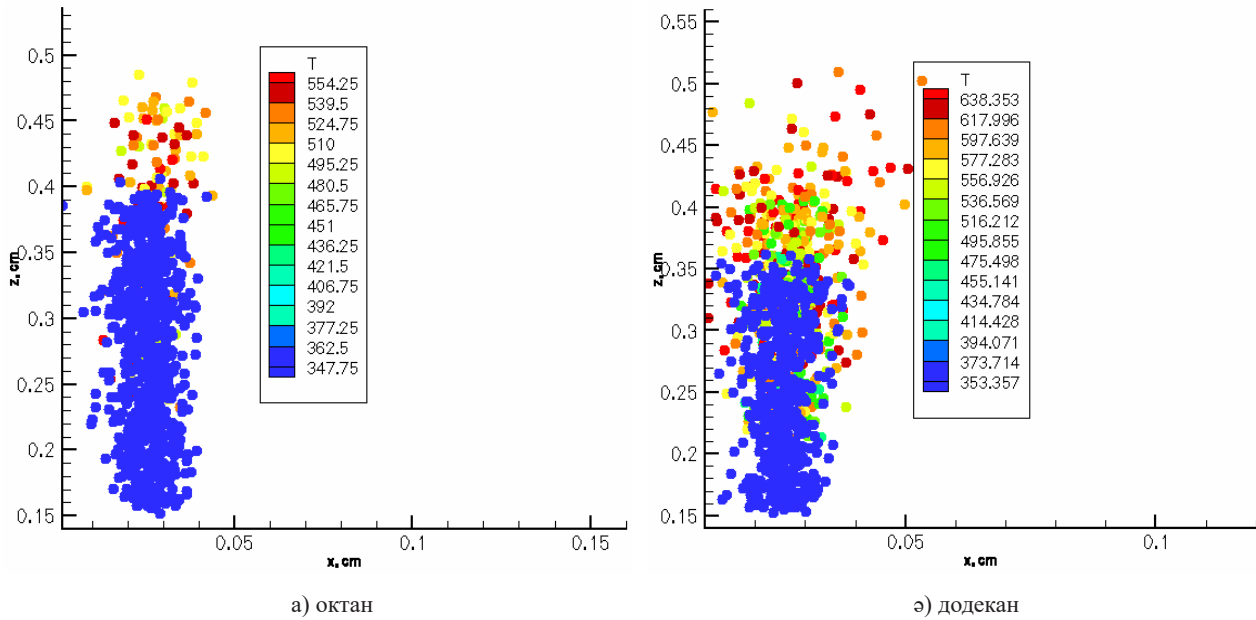
10-суретте тотықтырғыштың тиімді температура мәніндегі екі көмірсутекті сұйық отын (октан және додекан) тамшыларының меншікті температурасы бойынша дисперсиясы бейнеленген. $t=3$

мс уақыт мезетінде октанның жану процесінде температурасы төмен тамшылардың камераның төменгі бөлігіне шоғырлануы байқалады. Октан тамшыларының ең жоғарғы температурасы 554 К-ге (9 а сурет), ал додекан тамшылары үшін аталған шама 638 К-ге тең болды (9 ә сурет).

Жүргізілген есептеу тәжірибелерін, әрі октан мен додекан тамшыларының камера кеңістігіндегі дисперсиясын салыстыра отырып, төмендегідей қорытындыға келеміз: додекан тамшылары октан тамшыларына қарағанда камера биіктігімен жоғары көтеріледі, яғни 3 мс уақыт мезетінде октан тамшылары 0,49 см-ге, ал додекан тамшылары 0,52 см-ге дейін таралады. Екі отын тамшылары жану камерасының барша көлемінде бірыңғай үлеседі. Отынның жоғары беттік керілу сипатының болуына байланысты додекан тамшыларының температурасы октанға қарағанда едәуір жоғары мәнді иеленеді.



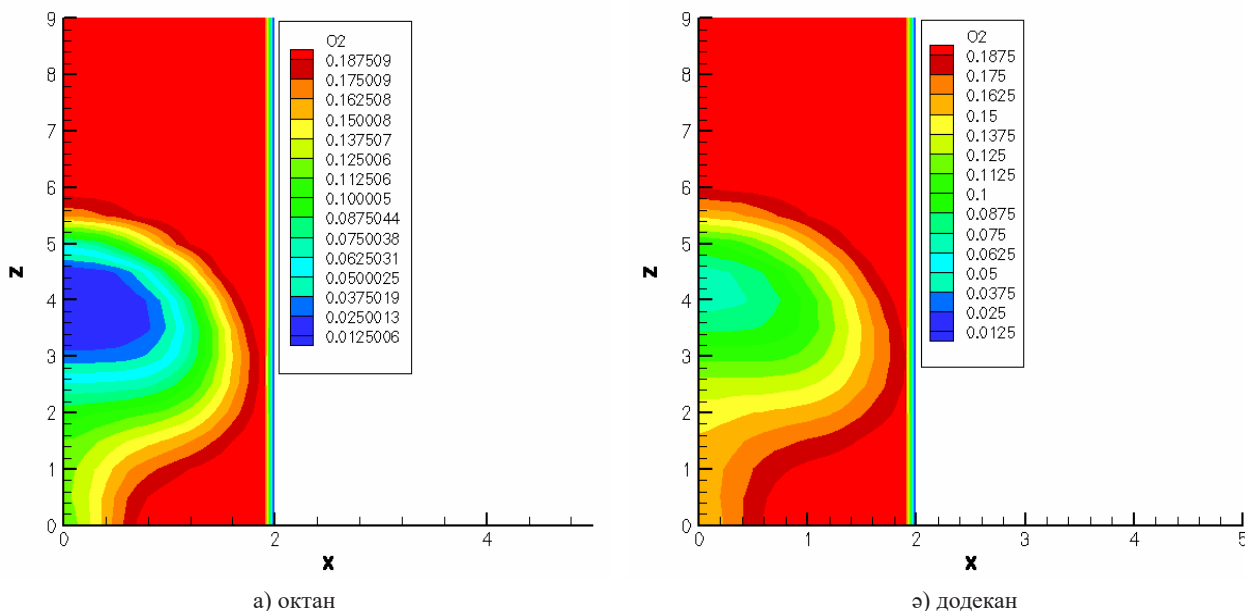
9-сурет – $t = 3$ мс жану режиміндегі октан мен додеканның температура профильдері



10-сурет – $t=3$ мс уақыттағы модельдік жану камерасындағы октан және додекан тамшыларының меншікті температурасы бойынша дисперсиясы

11-суретте камерадағы газдың 900 К-ге тең тиімді температура мәніндегі қос отын түрінің жануы барысындағы оттегінің тұтынылатын концентрациясының таралуы көрсетілген. Октан мен додеканның жану процесіндегі оттегінің таралу сипатын талдай отырып, камераның жалпы көлемінде газдың айтарлықтай жоғары концентрацияда шоғырланғандығын көруге болады. Октан мен додекан тамшылары жану камерасының көлемінде бірдей мөлшерде оттегін тұтынатындығы белгілі болды, яғни, атап айтсақ, оның мәні 0,1875 г/г құрайды. Дегенмен камераның өсіндегі температуралық алау ядросында тотықтырғыш аз шығындалады:

октанның жануы барысындағы оттегінің O_2 ең аз концентрациясы 0,013 г/г тең болса, додекан үшін 0,05 г/г-ға тең тотықтырғыштың салыстырмалы концентрациясы түзіледі. Октан тамшылары камераның 2,9 – 4,8 см тең биіктігінде тотықтырғышпен ең көп әсерлеседі. Додекан тамшылары үшін камераның 3,8 см-ден 4,6 см-ге дейінгі биіктігінде оттегінің максимал концентрациясы шығындалады. Жүргізілген есептеу тәжібелерінің нәтижесінде қол жеткізілген деректерді талдау көрсеткендей, додекан тамшылары жанған уақытта температуралық алау ядросында оттегі ең көп тұтынылады деп айтуға болады.

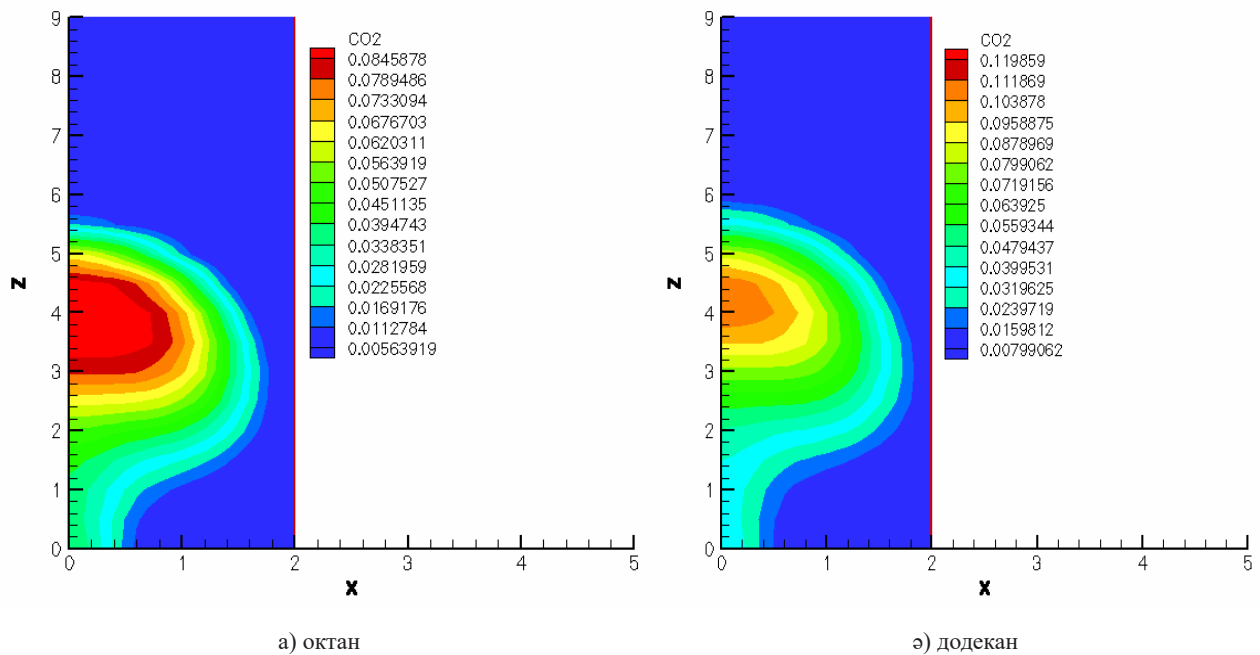


11-сурет – $t=3$ мс уақыт мәніндегі жану камерасының көлеміндегі тотықтырғыштың шығындалу графигі

12-суретте жану камерасындағы газдың 900 К-ге тең тиімді температура мәніндегі октан және додекан тамшыларының жануы нәтижесінде түзілетін көмірқышқыл газының концентрациясының таралу графиктері келтірілген.

Жоғарыда келтірілген модельдеу тәжірибелері нәтижесінде қол жеткізілген суреттерді талдай отырып, октанның жануы барысындағы көмірқышқыл газының ең жоғары 0,085 г/г

мәні ағыстың өсінде түзіледі деп айтуға болады. Ал додекан үшін камераның өсіндегі көмертегінің қос тотығының концентрациясы 0,104 г/г дейін жетеді. Қос отын түрі үшін аталған парникті газдардың концентрациялары жану камерасының шығыс бөлігінде монотонды кеміп, өзінің минимумына жетеді. 900 К бастапқы газ температурасына сәйкес октанның жануы кезіндегі CO_2 мөлшері 0,006 г/г, ал додекан үшін 0,008 г/г құрайды.



12-сурет – $t=3$ мс уақыт мәніндегі CO_2 концентрациясының таралуы

Қорытынды

Бұл жұмыста цилиндрлік жану камерасындағы бастапқы газ температурасының екі түрлі сұйық отындардың (октан және додекан) тұтану, жану және булану процестеріне әсері дербес туындылы дифференциалдық теңдеулерді шешу арқылы компьютерлік модельденді. Жұмыста сұйық отындардың негізгі сипаттамалары мен бүрку әдістері бейнеленді, отынды инжекторлы бүркуге негізделген жүйелерде қолданылатын арнайы құрылғылардың түрлері баяндалды.

Жұмыста есептеуіш тәжірибелер сұйық отындардың дисперсиясы мен жануын ескеретін жылу және масса тасымалының дифференциалдық теңдеулері мен сұйық тамшыларын бүрку негізіндегі сандық модель арқылы жүзеге асырылды.

Жүргізілген есептеу тәжірибелерінің нәтижесінде төмендегідей қорытынды жасалынды.

Жану камерасындағы газдың бастапқы температурасының өзгерісінің октан және додекан тамшыларының бүрку және жану процестеріне ықпалын зерттеу нәтижесі көрсеткендей, қос отын үшін тотықтырғыштың тиімді температура

мәні 900 К-ге тең болды. Аталған температурада жану камерасындағы отын-ауалы қоспаның температурасы октан үшін 1726 К, ал додекан үшін 2080 К-ді құрады. Сәйкесінше, қос отын тамшыларының меншікті температуралары 554 К (октан) және 638 К (додекан) тең болды, яғни берілген температура мәнінде сұйық отын интенсивті түрде тотықтырғышпен араласып, булана бастайды және жану камерасындағы температуралық алау жоғары деңгейге дейін қыздырылып, жылу алмасу процесі қарқындайды.

Жұмыста компьютерлік модельдеу тәжірибелерін жүзеге асыру нәтижесінде қол жеткізілген оңтайлы параметрлерді іштен жану қозғалтқыштарының жану камераларын Еуро-стандарттарға сай жобалауда, ондағы жану процесін оңтайландыруда және жылу машиналарында жүзеге асатын технологиялық процестерге негіз болатын құбылыстарды терең түсінуге қолдануға болады.

Жұмыста жүргізілген зерттеулер Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғарғы білім министрлігінің қаржылай қолдауымен №AP14870834 жүзеге асырылды.

Әдебиеттер

- 1 Befrui B, Corbinelli G, D’Onofrio M Varble D. GDI multi-hole injector internal flow and spray analysis. SAE Technical Paper 2011;8;1-11. <https://doi.org/10.4271/2011-01-1211>
- 2 Desjardins O, Pitsch H A spectrally refined interface approach for simulating multiphase flows. *Journal of Computational Physics* 2009;228;1658–1677. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2008.11.005>
- 3 Lee S, Park S Spray atomization characteristics of a GDI injector equipped with a group-hole nozzle. *Fuel* 2014;137;50-59. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.07.063>
- 4 Wang L, Wang F, Fang T Flash boiling hollow cone spray from a GDI injector under different conditions. *International Journal of Multiphase Flow* 2019;118;50-63. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.05.009>
- 5 Gavaises M, et al. A cavitation aggressiveness index within the Reynolds averaged Navier Stokes methodology for cavitating flows. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B.* 2015;27;579-586. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(15\)60519-4](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(15)60519-4)
- 6 Gorokhovski M, Helie J, Muhammad MK Computational methodology for non-evaporating spray in quiescent chamber using Large Eddy Simulation. *International Journal of Multiphase Flow* 2018;102;102-118. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.01.025>
- 7 Guo H, et al. Numerical investigation on flashing jet behaviors of single-hole GDI injector. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2019;130;50-59. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.10.088>
- 8 Askarova A, et al. 3D modelling of heat and mass transfer processes during the combustion of liquid fuel. *Bulgarian Chemical Communications* 2016;48;229-235.
- 9 Armas O, et al. Impact of Gas To Liquid and diesel fuels on the engine cold start. *Fuel* 2017;203;298-307. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.116>
- 10 Gorokhovski M, Herrmann M Modeling primary atomization. *Annual Review of Fluid Mechanics* 2008;40;343-366. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.40.111406.102200>
- 11 Gorokhovski M The stochastic Lagrangian model of drop breakup in the computation of liquid sprays. *Atomization and Sprays* 2001;1;169-176. <http://dx.doi.org/10.1615/AtomizSpr.v11.i5.20>
- 12 Amsden AA, O’Rourke PJ, Butler TD KIVA-II: A computer program for chemically reactive flows with sprays. Los Alamos, 1989, 160 p.
- 13 Yang SL, Siow YK, Teo CY, Hanjalic K A KIVA code with Reynolds-stress model for engine flow simulation. *Energy* 2005;30;427-445. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.09.004>
- 14 Gao D, Morley NB, Dhir V Numerical simulation of wavy falling film flow using vof method. *Journal of Computational Physics* 2003;192;624-642. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2003.07.013>
- 15 Huang J, Zhao X Numerical simulations of atomization and evaporation in liquid jet flows. *International Journal of Multiphase Flow* 2019;119;180-193. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.07.018>
- 16 Park S, et al. Numerical simulation of high-pressure gas atomization of two-phase flow: Effect of gas pressure on droplet size distribution. *Advanced Powder Technology* 2019;30;2726-2732. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.08.019>
- 17 Salvador FJ, et al. Analysis on the effects of turbulent inflow conditions on spray primary atomization in the near-field by direct numerical simulation. *International Journal of Multiphase Flow* 2018;102;49-63. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.01.019>
- 18 Shao Ch, et al. Detailed numerical simulation of swirling primary atomization using a mass conservative level set method. *International Journal of Multiphase Flow* 2017;89;57-68. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.10.010>
- 19 Askarova AS, et al. Investigation of various types of liquid fuel atomization and combustion processes at high turbulence. *Journal of Engineering and Applied Sciences* 2018;13;4054–4064.
- 20 Askarova AS, et al. Numerical simulation of the oxidant’s temperature and influence on the liquid fuel combustion processes at high pressures. *Journal of Engineering and Applied Sciences* 2015;10;90–95.
- 21 Bolegenova S, et al. Statistical modeling of spray formation, combustion, and evaporation of liquid fuel droplets. *Physical Sciences and Technology* 2022;9;69-82. <https://doi.org/10.26577/phst.2022.v9.i2.09>
- 22 Ospanova Sh, et al. Simulation of non-isothermal liquid sprays under large-scale turbulence. *Physical Sciences and Technology* 2021;8;28-40. <https://doi.org/10.26577/phst.2021.v8.i2.04>
- 23 Bolegenova S, et al. Investigation of the droplet dispersion influence on the atomization of liquid fuel processes in view of large-scale structures formation. *Recent Contributions to Physics* 2022;80;75-86. <https://doi.org/10.26577/RCPH.2022.v80.i1.09>