

С.А. Болегенова , А.С. Аскарова , Ш.С. Оспанова\* , Д.А. Ербосынов ,

А.М. Максутханова , Н.А. Адильбаев 

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

## ЖОҒАРЫ ТУРБУЛЕНТТІЛІКТЕГІ ГЕТЕРОГЕНДІ ЖҮЙЕЛЕРДІҢ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ РЕЖИМДЕРІН ОҢТАЙЛАНДЫРУ

**Аннотация.** Турбулентті ағыстардағы конвективті жылу тасымалы құбылыстары химиялық реакцияларды ескергенде кең тараған және табиғат құбылыстарында, өнеркәсіптің алуан түрлі салаларында маңызды рөл атқарады. Осындай ағыстардың заңдылықтарын білу жану теориясының физикасын қалыптастыруда, жаңа физика-химиялық технологияларды жасап шығаруда, жылуэнергетикасы мен экология мәселелерін шешуде маңызды. Зерттеу барысында жанудың күрделі процесін жану реакциясының көптеген физикалық және химиялық параметрлерінің әсеріне тәуелділігі тұрғысынан талдау жүргізілді. Көпфазалы жүйелердегі құбылыстарды зерттеуде жоғары турбуленттіліктегі сұйық тамшыларының түзілу теориясын дамыту қызығушылық тудырады. Берілген жұмыста гетерогенді екіфазалы ағыстардағы тамшылардың бұрку, тұтану және кеңістікте таралу процестері компьютерлік модельдеу әдістерінің көмегімен зерттелінді. Аталған зерттеулер қазіргі уақыттағы өзектілігі жоғары экологиялық мәселелерге, оның ішінде зиянды улы металдардан, күкірт, азот, қышқылдары, көміртегі тотықтары мен өзге зиянды заттардан тұратын атмосфералық ластану мәселелеріне негізделіп жүзеге асырылды. Жұмыста дербес туынды дифференциалдық тендеулерді шешу негізінде математикалық модельдеу әдістерінің көмегімен жоғары турбуленттіліктегі сұйық отындардың дисперсиясы мен жану процестеріне зерттеу жүргізілді және жану камерасындағы көмірқышқыл газының түзілуін ескеру арқылы тиімді технологиялық жану режимі анықталды.

**Түйін сөздер:** жану, бұрку, тамшылардың дисперсиясы, сандық модельдеу, көмірқышқыл газы.

С.А. Болегенова, А.С. Аскарова, Ш.С. Оспанова, Д.А. Ербосынов,  
А.М. Максутханова, Н.А. Адильбаев

*Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы*  
*e-mail: Shynar.Ospanova@kaznu.edu.kz*

## Оптимизация технологических режимов гетерогенных систем при высокой турбулентности

**Аннотация.** Явления конвективного теплопереноса в турбулентных течениях с учетом химических реакций широко распространены и играют важную роль в природных явлениях, в различных отраслях промышленности. Знание закономерностей таких течений важно при формировании физики теории горения, разработке новых физико-химических технологий, решении проблем теплоэнергетики и экологии. В ходе исследования был проведен анализ сложных процессов горения с точки зрения зависимости от влияния многих физических и химических параметров реакции горения. При изучении явлений в многофазных системах наибольший интерес представляет развитие теории образования капель жидкости при высокой турбулентности. В данной работе изучены процессы распыла, воспламенения и пространственного распределения капель в гетерогенных двухфазных течениях посредством методов компьютерного моделирования. Данные исследования были проведены на основе актуальных в настоящее время экологических проблем, в том числе проблем загрязнения атмосферы, состоящих из вредных токсичных металлов, серной, азотной кислот, оксидов углерода и других вредных веществ. В работе проведено исследование процессов дисперсии и горения жидких топлив при высокой турбулентности посредством методов математического моделирования на основе решения дифференциальных уравнений в частных производных и определен оптимальный технологический режим горения с учетом образования углекислого газа в камере сгорания.

**Ключевые слова:** горение, распыл, дисперсия капель, численное моделирование, углекислый газ.

S.A. Bolegenova, A.S. Askarova, Sh.S. Ospanova, D.A. Yerbosynov,  
A.M. Maxutkhanova, N.A. Adilbayev

*Al-Farabi Kazakh national university, Kazakhstan, Almaty*

### **Optimization of technological modes of heterogeneous systems at high turbulence**

**Annotation.** The phenomena of convective heat and mass transfer in turbulent flows, taking into account chemical reactions, are widespread and play an important role in natural phenomena and in various industries. Knowledge of the regularities of such flows is important in the formation of the theory of combustion physics, the development of new physical and chemical technologies, and the solution of problems of thermal power engineering and ecology. In the course of the study, complex combustion processes have been analyzed from the point of view of dependence on the influence of many physical and chemical parameters of the combustion reaction. In the study of phenomena in multiphase systems, the development of the theory of the formation of liquid droplets at high turbulence is of greatest interest. In this paper, the processes of atomization, ignition, and spatial distribution of droplets in heterogeneous two-phase flows have been studied by means of computer simulation methods. These studies were carried out on the basis of current environmental problems, including the problems of air pollution, consisting of harmful toxic metals, sulfuric, nitric acids, carbon oxides, and other harmful substances. The processes of dispersion and combustion of liquid fuels at high turbulence have been studied by using mathematical modeling methods based on the solution of partial differential equations and the optimal technological combustion mode taking into account the formation of carbon dioxide in the combustion chamber has been determined.

**Keywords:** combustion, atomization, droplet dispersion, numerical simulation, carbon dioxide.

#### **Кіріспе**

Химиялық реакциялардың түзілуімен қоса жүретін турбулентті ағыстардағы конвективті жылу алмасу құбылыстары кең таралуына байланысты табиғат құбылыстарында, өнеркәсіптің алуан түрлі салаларында маңызды рөл атқарады. Осындай ағыстардың заңдылықтарын білу жану теориясының физикасын қалыптастыруда, жаңа физика-химиялық технологияларды жасап шығаруда, сонымен қатар жылуэнергетикасы мен экология мәселелерін шешуде маңызды рөл атқарады. Зерттеу барысында жанудың күрделі процесін жану реакциясының көптеген физикалық және химиялық параметрлерінің әсеріне тәуелділігі тұрғысынан талдауға тура келеді.

Математикалық модельдеу әдістері ғылым мен техниканың сан алуан облыстарында көрініс тапқан. Осы әдістердің құрамына физикалық және математикалық модельдерді, сандық әдістер мен бағдарламалық құралдарды жасау, есептеу техникасының құралдарын жұмылдыра отырып, сандық тәжірибе жүргізу енеді. Ғылым мен техникада компьютерлік модельдеу әдістерінің артықшылықтары айшықтала көрініс тапқан: жобалауды жаңғырту, өңдеуге кететін шығындарды азайту, өнімнің сапасын жақсарту, қолдануға жұмсалатын шығындарды азайту және т.б. Сандық

модельдеу ғылыми зерттеулердің өзіндік сипатын айтарлықтай түрлендіреді, осылайша тәжірибелік және математикалық әдістер арасындағы өзара байланыстың жаңа түрлері тағайындалады [1].

Сұйық отындардың жануы барысында өтетін физика-химиялық процестерді мұқият зерттеу түрлі техникалық құрылғылардың жұмыс істеу тиімділігіне, тұтануды дәл болжауға қойылатын талаптардың және қоршаған ортаны қорғауға қатысты заманауи экологиялық шектеулердің жоғарылауына негізделген. Түрлі техникалық құрылғылардың, оның ішінде іштен жану қозғалтқыштарының жұмыс істеу тиімділігі жану процесінің физика-химиясын іргелі зерттеу нәтижелерімен тікелей байланысты.

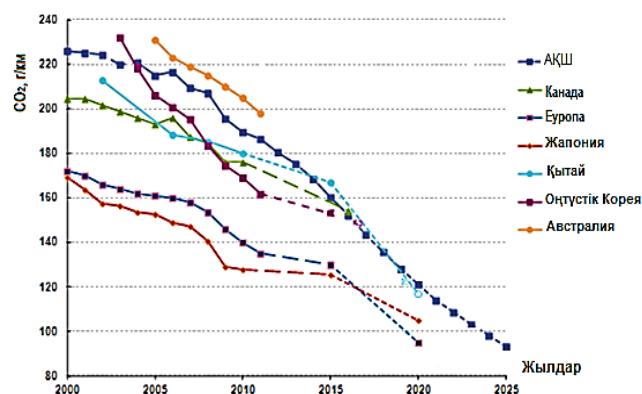
Заманауи жағдайларда және болашақта экологиялық мәселелерді ескеру және шешу ірі отын-энергетикалық кешендерді, ағымдағы техникалық құрылғыларды, оның ішінде іштен жану қозғалтқыштарын қолдану кезінде анықтаушы факторға айналып отыр. Шетелдік және отандық тәжірибе көрсеткендей, жылу энергетикасындағы осы тектес күрделі мәселелерді шешу отындардың жануы кезінде жүзеге асатын физика-химиялық процестерді мұқият зерттеуге тәуелді болып отыр. Аталған жағдайлар отынды қолданудың тиімділігін арттыруға және зиянды қалдықтардың атмосфераға бөлінуін

азайтуға жағдай жасайды. Қазақстан Республикасының өнеркәсібінде сұйық отынды жағудың тиімділігі басым рөлге ие, оны жағу нәтижесінде күйе мен көмірқышқыл газы түзіледі, осыдан қоршаған ортаны қорғау мәселесі отынды үнемді қолданудың шарттарымен тығыз байланысты екендігі туындайды. Отынды жағудың тиімділігі мен техникалық құрылғылардың сенімділігін арттыру, сонымен қатар қоршаған ортаға зиянды қалдықтардың бөлінуін кеміту жылуэнергетикасының алға қойған болашақтың еншісіндегі басты мәселесі болып отыр. Сондықтан осындай отындарды жағу әдістерін жетілдіруге жағдай жасайтын физика-химиялық процестерді зерттеу қазіргі таңда және таяу келешекте де өзекті болып қалатыны күмәнсіз.

Қазіргі таңда энергетикалық және экологиялық қауіпсіздік мәселелерін тиімділігі жоғары технологиялар мен энергетикалық құрылғыларды жасау, сонымен қатар түрлі сұйық отындардың жану процестерінің іргелі заңдылықтарын зерттеу арқылы шешуге болады. Сұйық отынның жануы кезіндегі жылу және масса алмасу процестерін теориялық зерттеу айтарлықтай дәрежеде химия мен физиканың іргелі заңдарына негізделген жылу-масса тасымалы теңдеулерін шешу арқылы жүзеге асырылады. Осындай теңдеулерді заманауи есептеу машиналарының қуатының артуының және оның салдарынан дербес туындылы теңдеулерге арналған есептерді шешу әдістерінің дамуындағы алға жылжудың арқасында сандық модельдеу тәсілдерінің көмегімен ғана бейнелеуге болады. Қолданбалы және есептеу математикасының жетекші орталықтарында жасалынған алгоритмдер мен бағдарламалар кешендері шарттардың кең ауқымында, сонымен қатар жану және химиялық ауысулар болған кезде жылу және масса тасымалы процестерін есептеуге мүмкіндік береді [2, 3].

Ластаушы заттар туралы ережелер уақыт өте келе қатая түсуде, мысалы, 2025 жылға дейін әлем бойынша тағайындалған негізгі ережелерге сәйкес жеңіл автокөліктерден бөлінетін көмірқышқыл

газының (CO<sub>2</sub>) шығыс мөлшерін 100 мг/км мөлшерге дейін азайту көзделуде (1 сурет) [4-7]. Көмірқышқыл газы улы газдардың қатарына жатпағанымен қоршаған ортаға оның парникті әсері салдарынан бірқатар қаупі бар. Бағам бойынша [8-10], адамның әр түрлі қызметінің салдарынан көмірқышқыл газының жыл сайынғы шығысы әлем бойынша 30 млрд. тоннаға жуық мөлшерді құрап отыр. Барша көздерден болған көмірқышқыл газының концентрациясы 1750 жылдан бері 31%-ға артқан.



1 сурет - Көмірқышқыл газының CO<sub>2</sub> бөліну стандарттары

Энергетиканың қазіргі заманғы даму сатысында экология мәселелері басымдылыққа ие. Халықаралық энергетика агенттігінің (IEA) пайымдауымен 2050 жылға дейін энергия тасымалдауыш ретінде жаңғырмалы энергия көздерінің 80%-ға жуығын қолдану және зиянды заттардың эмиссиясының көрсеткіші ретінде көмірқышқыл газының CO<sub>2</sub> атмосфераға бөлінуін екі есеге дейін қысқарту жоспарланып отыр [11]. Сондықтан алуан түрлі отындарды жағуға арналған жүйелер мен құрылғыларды жетілдіру құрылғылардың ПӘК-ін арттыруға және оның салдарынан зиянды заттардың атмосфераға эмиссиясын төмендетуге бағытталған. Бұған, біріншіден, газ және сұйық сияқты отын түрлерін жағуға арналған жанарғыларды жетілдіру, екіншіден, энергетикалық құрылғылардағы жылу алмасуды жандандыру арқылы қол жеткізуге болады.

### Әдістер мен нысанның моделі

Берілген жұмыста массаның, импульстің, энергияның және концентрацияның сақталу теңдеулері негізіндегі сұйық отындардың жануын сипаттайтын математикалық модель құрастырылды.

Массаның сақталу теңдеуі келесі түрде жазылады [12, 13]:

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

мұндағы  $u$  - сұйықтың жылдамдығы. Егер газ-сұйық қоспасы қарастырылатын болса, онда  $S_{mass}$  ағын көзі булану немесе конденсацияның есебінен газ тығыздығының жергілікті өзгерісін білдіреді. Егер газдың бірфазалы ағысы қарастырылатын болса, онда аталған ағын көзі нөлге тең деп қабылданады.

Газ импульсінің сақталу теңдеуі мынадай түрде жазылады [12, 13]:

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

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

(2) теңдеудің оң жағы қысым  $P$  градиентінің, тұтқыр кернеу тензоры  $\vec{\tau} = \lambda \vec{I} \text{div} \vec{u} + 2\mu \vec{D}$  мен көлемдік ауырлық күшінің  $\rho \vec{g}$  есебінен импульстің өзгерісінің қосатын үлесін білдіреді.

Мұндағы  $D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  -

деформация жылдамдығы тензоры,  $\vec{I}$  - бірлік матрица,  $\mu$  және  $\lambda$  - сәйкесінше, динамикалық тұтқырлық коэффициенті мен екінші тұтқырлық коэффициенті. Егер газдың бірфазалы ағысы қарастырылатын болса, онда  $S_{mom} = 0$ ; егер ағыс екіфазалы болса, онда  $S_{mom}$  тамшылардың қозғалысы нәтижесіндегі газ фазасындағы импульс өзгерісінің жергілікті жылдамдығы деп аталады.

Ішкі энергияның сақталу теңдеуі [12, 13]:

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

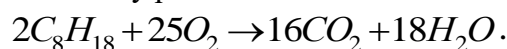
мұндағы  $q$  - жылу тасымалы туралы Фурье заңы негізіндегі меншікті жылу ағыны,  $\vec{\tau} : \vec{D}$  өрнегі тұтқыр диссипация нәтижесіндегі ішкі энергия жылдамдығының өсімшесін білдіреді.  $S_{energy}$  ағын көзі бүркілген сұйық немесе қатты фазаның болуы есебінен ішкі энергияның өзгерісіне қосатын үлесін білдіреді ( $S_{mom}$  күш жұмысы).

Концентрацияның  $m$  компонентінің сақталу теңдеуі мынадай болады [14, 15]:

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

мұндағы  $\rho_m$  -  $m$  компоненттің массалық тығыздығы,  $\rho$  - толық массалық тығыздық.

Жұмыста іштен жану қозғалтқыштарында жиі пайдаланылатын изооктан сұйық отыны қолданылды. Оның химиялық жану реакциясы төмендегідей:



Аталған реакцияның нәтижесінде көмірқышқыл газы мен су түзіледі.

Изооктан автомобиль және авиациялық бензиндердің және олардың компоненттерінің октандық сандарын анықтау кезінде бақылау отындарында және аралық эталондық қоспаларда реактив және эталондық отын ретінде қолданылады.

Әдетте бірнеше саңылаулардан тұратын инжекторлар отынды бүркүдің тиімді тәсілдерін жүзеге асырады. Олар отынды бүрку уақытын, бүркілген отынның ену тереңдігін кемітіп, будың жеткілікті біртектілігімен қоса отын-ауалы қоспаның сапасын арттырады. Аталғанның барлығы процестің ең жағымды шарттары болып табылады. Көп саңылаудан құралатын инжекторлар бүркілетін отын алауларының өзара тым жақын орналасуының салдарынан күрделі болып келеді. Олардың табиғатын әдетте жоғары жүктемелерде болжап-бағдарлау қиынға соғады. Алаулардың осындай жақын орналасатын ерекшелігі серіктес ағыншалардың бір-біріне әсері

құбылысы деп аталады. Оның мәні әлі күнге дейін дұрыс зерттелмеген. Мұнан өзге температура жоғарылаған сайын серіктес ағыншалардың бір-біріне әсерін басқару қиынға соғады, осының салдарынан бүтіндей бір ағынша жіпшелер мен тамшыларға жіктеліп кетуі мүмкін

Жұмыста сандық модельдеу тәжірибелерін жүргізу үшін көпсаңылаулы инжектордың моделі құрастырылды. Оның жалпы бейнесі мен схемалық сызбасы 2 суретте келтірілген. Көпағыншалы бүркудің ерекшелігі бастапқы шарттарда әрбір цилиндрдің кіріс түтікшесіне жеке форсунка орналастырылады, оның әрқайсысы отынды кіріс клапанға беріп отырады. Осылайша отын қоспасы тікелей жану камерасына берілу алдында әзірленеді. Сондықтан ол өзінің құрамы және әрбір цилиндр үшін сапасы бойынша бірдей болады. Нәтижесінде бұл мотордың қуаты мен үнемділігіне, сонымен қатар шығыс газдарының зияндылығына жағымды әсер етеді.

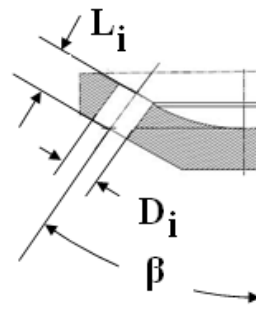
Көпағыншалы инжекторлардың негізгі параметрлеріне мыналар жатады:  $\beta$  параметрі - инжектордың орталық өсінен бағытталатын бүрку бұрышы,  $L_i$  - инжектор саңылауының ұзындығы және  $D_i$  - сопло саңылауының диаметрі.  $L_i/D_i$  қатынасы көпағыншалы инжекторлардың маңызды параметрі болып саналады, өйткені, ол инжектор саңылауынан шығысындағы ішкі ағынның түзілуіне және соңында бүркудің түзілуіне әсер етеді.

Әдетте көпағыншалы инжекторларда  $L_i/D_i$  қатынасы бірге тең деп қабылданады. Лагранж моделінде инжектор саңылауының ұзындығының мәні талап етілмейді.  $Q_s$  - инжектордың берілген түрі үшін 100 бар қысым мәніндегі статикалық массалық шығын, кей жағдайларда изооктанды алмастыруша ретінде мұнда н-гептан қолданылады.

Зерттеулерді жүзеге асыру мақсатында жану камерасында келесідей бастапқы шарттар таңдап алынды: бүрку қысымы 200 бар, отынның бастапқы температурасы

363,15 К, бүрку уақытының ұзақтығы 4 мс, жалпы отын массасы 24,9 мг.

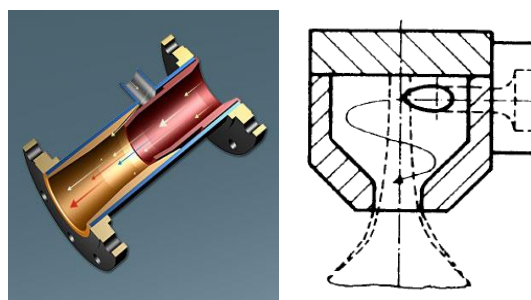
3 суретте іштен жану қозғалтқыштарында жиі пайдаланылатын инжекторлық бүрку жүйесінің негізгі сұлбасы келтірілген.



$\beta$  - инжектордың орталық өсінен бағытталатын

бүрку бұрышы,  $L_i$  - инжектор саңылауының ұзындығы,  $D_i$  - сопло саңылауының диаметрі

**2 сурет** - Іштен жану қозғалтқышының көпағыншалы инжекторының модельдік сұлбасы



**3 сурет** - Жану камерасының төменгі жағында орналасатын форсунканың жалпы түрі мен оның геометриясы

Берілген жұмыста KIVA компьютерлік бағдарламалар пакеті дизельдік және авиациялық қозғалтқыштардағы жану процестерінің химиялық кинетикасын модельдеу үшін жетілдірілді. Берілген бағдарламалар пакеті жоғары турбуленттіліктегі жану камераларындағы сұйық отындардың жануы туралы алға қойылған мәселеге бейімделді. Бұл ағыстың аэродинамикасын, бүрку массаларын, тотықтырғыштың температурасын, қысымның таралуын, ағыстың

турбуленттілік сипаттамаларын, жану өнімдерінің концентрацияларын, отын буы мен жану камерасының барша кеңістігі бойынша сұйық отынды жағудың өзге де сипаттамаларын есептеуге жағдай жасады.

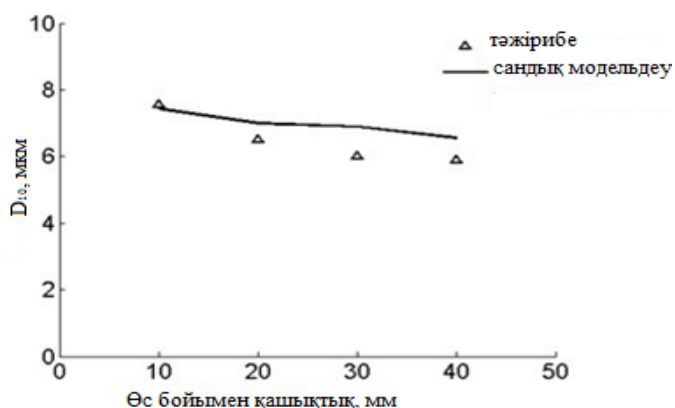
### Есептеуіш тәжірибе нәтижелері

Жұмыстың мақсаты - математикалық модельдеу әдістерінің көмегімен жоғары турбуленттіліктегі сұйық отындардың дисперсиясы мен жану процестерін зерттеу және жану камерасындағы түзілетін жану өнімдерінің концентрациясын тіркеу арқылы, технологиялық тиімді жану режимін анықтау. Жұмыста турбулентті әсерлесетін ағыстарды сипаттайтын дифференциалдық тендеулерді шешу арқылы сұйық отындардың тұтану, бүрку, булану және жану процестеріне зерттеулер жүргізілді. Газ және дисперсті фазалардың ажырау шекарасындағы процестер Лагранж әдісімен жүзеге асырылды [16, 17]. Төменде жүргізілген есептеу тәжірибелерінің нәтижелері келтірілген.

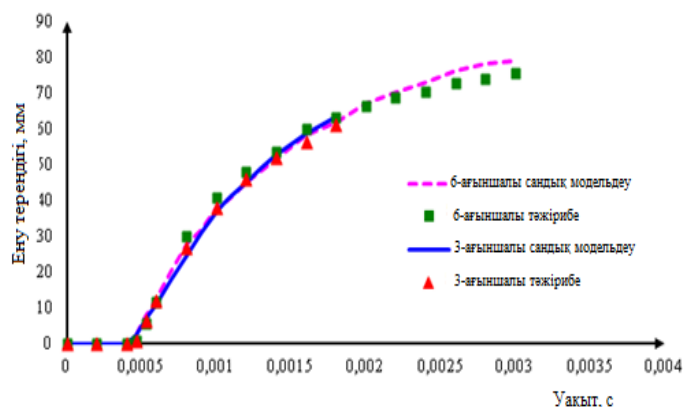
4 суретте булану болмағанда үш ағыншалы бүрку кезіндегі сұйық тамшыларының өлшемдері бойынша таралуын сандық модельдеу нәтижелері мен тәжірибелік деректер келтірілген. Суреттен бір ағыншаның ортасындағы өстердің әр түрлі орналасуына сәйкес әр түрлі 1,6 мс-тан 2 мс-қа дейін уақыт мезеттеріндегі тамшылардың орташа  $D_{10}$  өлшемдері бойынша таралуын көруге болады. Тамшылардың бастапқы орташа өлшемі 10 мкм-ге тең болғанда ағыс бойымен төмен қарай жылжыған сайын ағыншаның орталық бөлігінде тәжірибе кезінде олардың мәні 7,55 мкм-ге жетеді. Ал сандық модельдеу барысында жоғарыда аталған шама 7,43 мкм құрады. Инжектор сопласынан 40 мм қашықтықта ағыс бойымен төмен қарай тамшылардың орташа өлшемі тәжірибе кезінде 5,89 мкм-ге дейін кішірейген болса, ал сандық модельдеу кезінде оның мәні 6,55 мкм құрады.

5 суретте үш ағыншалы және алты ағыншалы бүркулердің қозғалмайтын газ облысына өстік енуінің ұзындығы бейнеленген. Суреттен көрініп тұрғанындай,

үш ағыншалы және алты ағыншалы инжекторлардың соплоларының геометриялары бір-бірінен айтарлықтай ерекше болғанымен екі ағынша да қозғалмайтын ортаға бірдей дәрежеде енеді.



**4 сурет** – Үш ағыншалы бүрку үшін инжектор сопласынан әр түрлі қашықтықтардағы тамшылардың орташа өлшемдері бойынша үлесуі



**5 сурет** - Булану кезіндегі үш ағыншалы және алты ағыншалы бүркулердің тыныштықтағы ортаға ену кысықтарын салыстыру

Натурлық тәжірибе барысында уақыт бойынша кешігу болды. Өйткені, мұнда инжекторды электрлік және физикалық жолмен іске қосып отыруға тура келді. Бұл кешігу уақыттың электрлік және гидравликалық кешігулерінен құралады. Отынды бүрку уақыты тәжірибеге ұқсас болу үшін аталған кешігу сандық модельдеу кезінде де ескерілді.



Әрі қарай компьютерлік зерттеу тәжірибелері сұйық отын тамшыларының дисперсиясы мен шығарылатын зиянды қалдықтардың концентрацияларын анықтаумен жалғасты.

Бүркілетін тамшылардың бастапқы радиустары өзгеріске ұшырағанда олардың жану камерасындағы меншікті жану температурасының таралуы зерттелінді. 6 суретте жану камерасындағы изооктан тамшыларының тиісті температурасы бойынша дисперсиясы бейленген. Мұнда тамшылардың меншікті температурасының максимум мәні 547 К-ді құрайды, тамшылардың қарқынды жану аймағы жану камерасының 0,5-1 см биіктігінде және 0,2 см ені бойымен орнайды. Осылайша, бастапқы радиус артқан сайын тамшылардың температурасы да қоса артып отыратындығы анықталды.

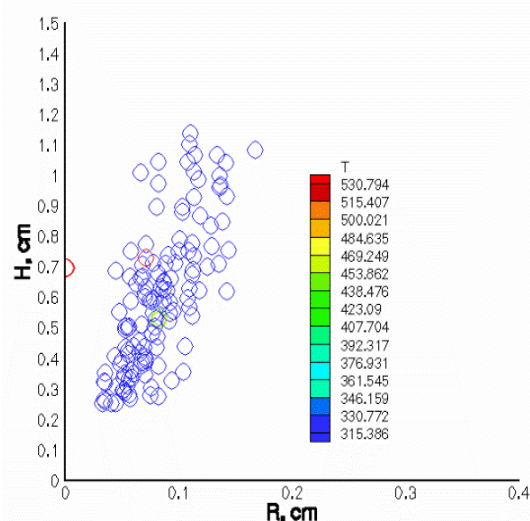
7 суретте изооктанның жануы кезіндегі температуралық алаудың тамшылардың бастапқы радиусына тәуелділігі келтірілген. Суретті талдау көрсеткендей, тамшылардың бастапқы радиусы сұйық отындардың жануының алғашқы кезеңінде кеңінен әсер етеді, яғни форсунка арқылы жану камерасына бүркілген отын ұсақ тамшыларға жіктеліп, әрі қарай буланып, тотықтырғышпен араласып, отын-ауалы қоспа түзеді. Осы кезеңнен соң отынның тұтануы мен жану процесі жүзеге асады.

Көмірқышқыл газының таралуын талдау нәтижесі көрсеткендей,  $\text{CO}_2$  максимал мәні жану камерасының өсінде түзіледі, яғни 4 мс уақыт мезетінде оның мәні 0,085 г/г құрайды (8 сурет).

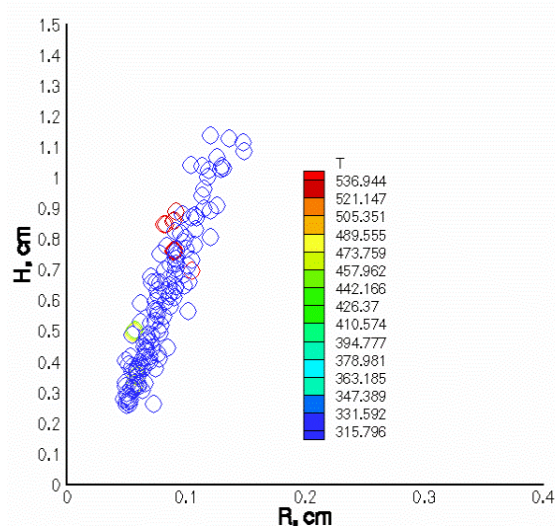
4 мс уақыт мезетінде отын буының концентрациясы нөлге тең болады, өйткені, осы уақыт мезетіне дейін отын тотықтырғышпен тұтастай әрекеттесіп, аталған реакцияның нәтижесінде көмірқышқыл газы мен ылғал түзіледі. 1,8 мс дейінгі процестің бастапқы уақыт мезеттерінде, яғни отынның тұтануына дейін жану реакциясы жүзеге аспайтындықтан жоғарыда келтірілген жану өнімдері түзілмейді.

Изооктанның жануы барысындағы ылғалдың таралуы 9 суретте бейнеленген. 2 мс уақыт мезетіндегі изооктанның

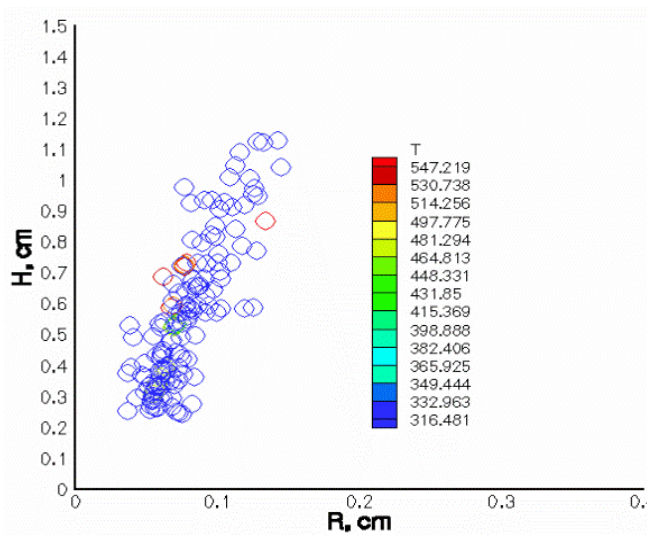
тотықтырғышпен әсерлесуінің химиялық реакциясы нәтижесінде түзілетін судың концентрациясы 0,0023 г/г құрайды. Ал ылғалдың  $\text{H}_2\text{O}$  ең жоғары мәні 4 мс уақыт мезетінде 0,039 г/г дейін жетеді.



а) 5 микрон

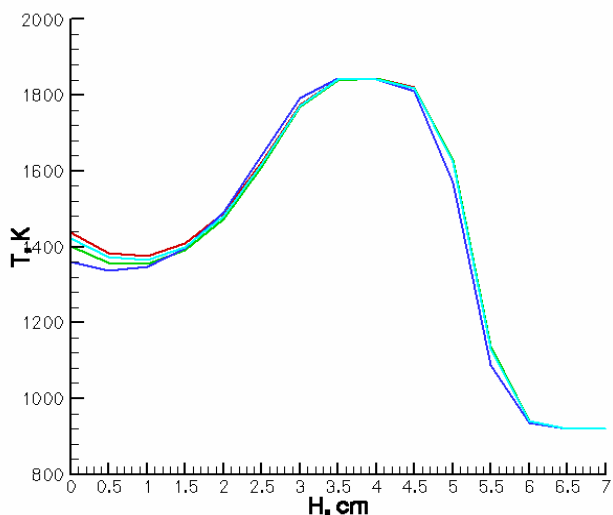


ә) 10 микрон

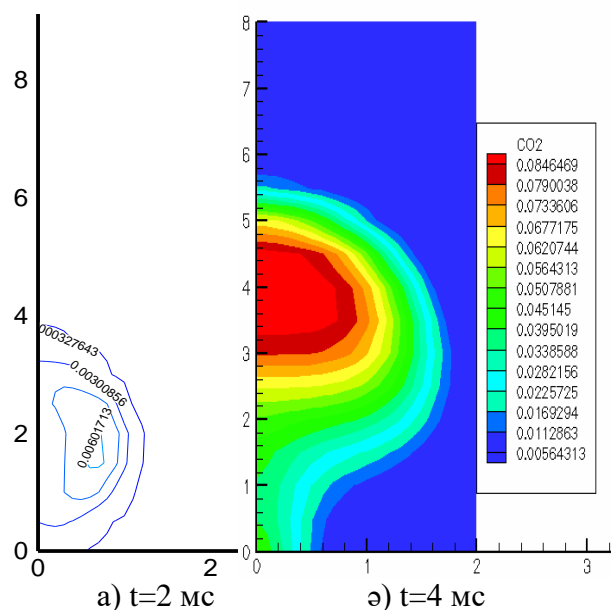


б) 20 микрон

**6 сурет** – Изооктан тамшыларының температура бойынша дисперсиясы



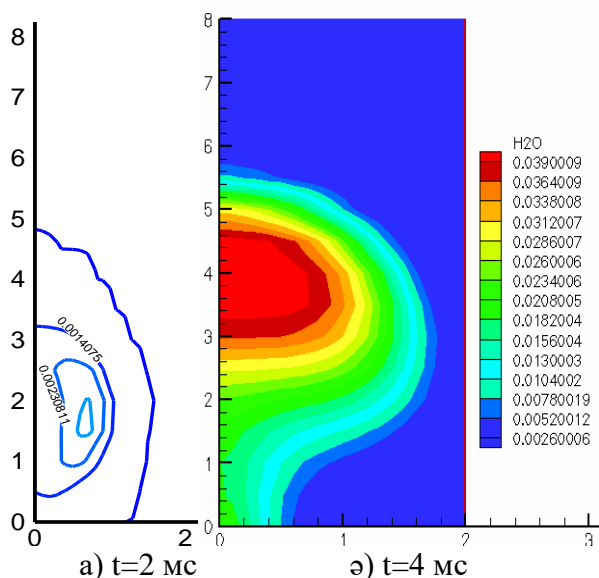
**7 сурет** – Изооктанның жануы кезіндегі температураның камера биіктігі бойымен таралуы



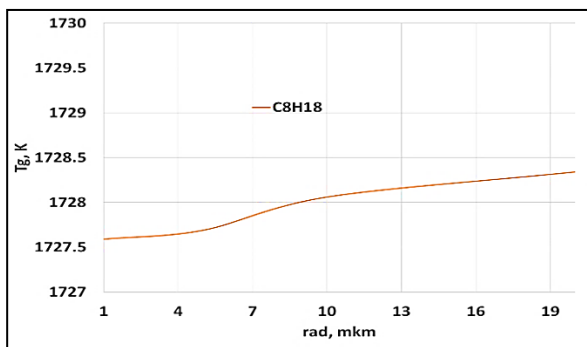
**8 сурет** – Әр түрлі уақыт мезетіндегі жану камерасындағы көміртегінің қос тотығының таралуы

Жүргізілген зерттеулерді жалпыландыру, талдау, әрі саралау арқылы изооктан сұйық отынының жануының технологиялық тиімді режимі анықталды. Осылайша, сұйық отынның тиімді жану процесі тамшылардың бастапқы радиусының 20 мкм тең мәнінде орын алатындығы белгілі болды (10 сурет). Аталған радиус мәнінде жану камерасындағы температура өзінің максимал мәніне жетеді, яғни изооктан үшін 1728 К құрайды. Қорытындысында тамшылардың бастапқы радиустары артқан сайын сұйық отынның жану температурасы да ұлғая береді деп тұжырымдауға болады.





**9 сурет** – Әр түрлі уақыт мезетіндегі жану камерасындағы ылғалдың таралуы



**10 сурет** – Изооктанның жану температурасының тамшылардың бастапқы радиусына тәуелділігі

### Қорытынды

Жұмыста іштен жану қозғалтқыштарының инжекторлық жүйелерінен таралатын әр түрлі көпағыншалы сұйық бұркулердің эволюциясы зерттелініп, технологиялық тұрғыдан тиімді режим анықталды. Инжекторлық бұрку жүйесімен жабдықталған жану камерасының виртуалды прототипі құрастырылды. Іштен жану қозғалтқыштарының жану камерасында жүзеге асатын жылу және масса тасымалы процестерінің физика-математикалық моделі қалыптастырылды.

Үш ағыншалы бұрку үшін булану болмағанда әр түрлі уақыт мезеттеріндегі

тамшылардың өлшемдері бойынша таралуын зерттеу барысында тамшылардың орташа өлшемі 10 мкм құрағанда олар ағыс бойымен төмен қарай жіктеліп, 7,43 мкм тең болатындығы анықталды.

Сұйық отынның үш және алты ағыншаларының тыныштықтағы газ (тотықтырғыш) ортасына ену тереңдіктері бірдей дәрежеде жүзеге асатындығы анықталды.

Изооктан отынының бүркілетін тамшыларының бастапқы радиустарының отынның дисперсиясы, жануы және жану өнімдерінің түзілуіне әсерін зерттеу бойынша технологиялық тиімді режим анықталды. Тамшылардың бастапқы радиусы неғұрлым үлкен болған сайын жану процесі соғұрлым қарқынды түрде өтіп, жану камерасы жоғары температура мәндеріне (1728 K) дейін қыздырылады. Жану реакциясының стехиометрия шартына сәйкес жану өнімдерінің ( $H_2O$  және  $CO_2$ ) максимал мәндері 4 мс уақыт мезетінде түзіледі.

Жұмыс барысында қол жеткізілген ғылыми нәтижелерді сұйық отындардың жану теориясының іргетасын қалыптастыруда қолдануға және жану камерасында өтетін күрделі физика-химиялық құбылыстарды анағұрлым тереңінен түсінуге септігін тигізетін болады.

Жұмыста жүргізілген зерттеулер Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғарғы білім министрлігінің қаржылай қолдауымен №АР14870834 жүзеге асырылды.

### Пайдаланылған әдебиеттер

1 Liu S, Hewson JC, Chen JH Nonpremixed n-heptane autoignition in unsteady counterflow. *Combustion and Flame* 2006;154;730-739.

<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2006.01.011>

2 Vinkovic I, Aguirre C, Simoëns S, Gorokhovski M Large eddy simulation of droplet dispersion for inhomogeneous turbulent wall flow. *International Journal of Multiphase Flow* 2006;32;344-364.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2005.10.005>

3 Kollar LE, Farzaneh M, Karev AR Modeling droplet collision and coalescence in

an icing wind tunnel and the influence of these processes on droplet size distribution. *International Journal of Multiphase Flow* 2005;3;69-92.

<https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2004.08.007>

4 Rotondi R, Bella G Gasoline direct injection spray simulation. *International Journal of Thermal Sciences* 2006;45;168-179.

<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2005.06.001>

5 Sako M The nature and impact of employee «voice» in the European car components industry. *Human Resource Management Journal* 1998;8;5-13.

<https://doi.org/10.1111/j.1748-8583.1998.tb00163.x>

6 Verbeizen K, Donkerbroek AJ, et al. Klein-Douwel RJH, et al. Diesel combustion: In-cylinder NO concentrations in relation to injection timing. *Combustion and Flame* 2007;51;333-346.

<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2007.05.005>

7 Bolegenova S, Ospanova Sh, 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.

<https://medwelljournals.com/abstract/?doi=jeasci.2018.4054.4064>

8 Olivier J, Janssens-Maenhout G, Peters J Trends in global CO<sub>2</sub> emissions. Netherlands, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2012, 40 p.

<https://data.europa.eu/doi/10.2788/33777>

9 Dadach ZE Cost Effective Strategies to Reduce CO<sub>2</sub> Emissions in the UAE: A Literature Review. *Journal of Industrial Engineering and Management* 2013;2;1-9.

<http://dx.doi.org/10.4172/2169-0316.1000116>

10 Smith M, Crotty J Environmental regulation and innovation driving ecological design in the UK automotive industry. *Business Strategy and the Environment* 2008;17;341-349.

<https://doi.org/10.1002/bse.550>

11 Askarova A, Ospanova Sh, et al. 3D modeling of heat and mass transfer during combustion of solid fuel in BKZ-420-140-7C combustion chamber of Kazakhstan. *Journal of Applied Fluid Mechanics* 2016;9;699-709.

<http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jafm.68.225.22881>

12 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>

13 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>

14 Amsden AA, O'Rourke PJ, Butler TD KIVA-II: A computer program for chemically reactive flows with sprays. Los Alamos, 1989, 160 p.

15 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>

16 Ospanova Sh, Berezovskaya I, 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;30-95.

<https://medwelljournals.com/abstract/?doi=jeasci.2015.90.95>

17 Apte SV, Mahesh K, Gorokhovski M, Moin P Stochastic modeling of atomizing spray in a complex swirl injector using large eddy simulation. *Proceedings of the Combustion Institute* 2009;32;257-266.

<https://doi.org/10.1016/j.proci.2008.06.156>

*Принято в печать 10.02.2022*

