

**Асқарова Ә.С., Бөлегенова С.А., Бөлегенова С.А., Максимов В.Ю.,
Оспанова Ш.С.* , Бекетаева М.Т., Нұғыманова А.О., Байжума Ж.Е.**

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
Алматы қ., Қазақстан, *e-mail: shynarospanova1987@gmail.com

СҰЙЫҚ ОТЫНДАРДЫҢ ЖАНУ ПРОЦЕСІН LEVEL SET ӘДІСІМЕН МОДЕЛЬДЕУ

Сұйық отындардың жануын сандық зерттеу күрделі өзара процестер мен құбылыстарды есепке алуды талап ететіндіктен, жылуфизикадағы маңызды мәселе болып табылады. Сондықтан есептеуіш эксперимент жану процестерін зерттеу мен жану процестерін қолданатын әртүрлі құрылғыларды жобалауда негізгі элемент болып табылады. Осы мақалада жоғары турбуленттіліктегі сұйық отындардың жану процесін сипаттайтын математикалық модель мен негізгі теңдеулер берілген. Гептан үшін жану камерасындағы турбуленттіліктің деңгейіне қатысты бұрқу және дисперсия процестеріне зерттеу жүргізілді. Жану камерасындағы гептанның тамшыларының радиус бойынша таралуы зерттелінді. Бөлшектердің таралу радиустарының мәні бірдей болғанымен, олардың камера ішіндегі сипаты әр түрлі. Қарапайым модельде жану камерасындағы бөлшектердің ең төменгі радиус мәні 5 мкм болса, максимал мәні 50 мкм-ге жетеді. Сонымен қатар бөлшектер камера биіктігі бойынша әр түрлі мәндері бойынша таралад. Жану камерасындағы гептан тамшыларының әр түрлі уақыт мезеттеріндегі температура бойынша таралу графиктері алынды. Аталған нәтижелер стохастты модельді қолдана отырып, алынды. $t = 0,98$ мс уақыт мезетінде камераның төменгі бөлігінде радиустары үлкен бөлшектер шоғырланған, олардың температурасы 400 К тең. Келесі уақыт мезеттерінде бөлшектер ыдырап, камера биіктігі бойынша жоғары қарай жылжиды. $t = 1,49$ мс уақыт мезетінде бөлшектердің температурасы 500 К-ге жетеді.

Түйін сөздер: сандық модельдеу, гептан, жану камерасы, температура, масса, тиімді режим.

Askarova A., Bolegenova S., Bolegenova S., Maximov V.,
Osipova Sh.* , Beketayeva M., Nugymanova A., Baizhuma Zh.

Al-Farabi Kazakh National University,
Almaty, Kazakhstan, *e-mail: shynarospanova1987@gmail.com

Simulation of combustion processes of liquid fuels method the level set

Numerical research of burning of liquid fuels is a complex challenge of thermo physics as demands the accounting of a large number of the difficult interconnected processes and the phenomena. Therefore, computing experiment becomes more and more important element of research of processes of burning and design of various devices using burning process. In this article we propose the mathematical model and the main equations describing process of burning of liquid fuels at high turbulence is stated. Research of processes of disintegration and dispersion depending on pressure and an initial lot of injection in the combustion chamber of liquid fuel is conducted: heptane. A study of the distribution of droplets of heptane the radius in the combustion chamber. Even with the same values of the distribution radius have different description in the combustion chamber. In the basic model of the combustion chamber the minimum value of the radius is 5 μm , and the maximum value is 50 microns. However, particles along the height of the combustion chamber are distributed in different ways. The obtained curves of temperature distribution in different points in time drops of heptane in the combustion chamber. The results obtained using the model stochast. On the lower part of the combustion chamber are large particles. $t = 0,98$ ms and their temperature equal to 400K. In another moment of time the

particles are apart and moving up the height of the combustion chamber. The temperature of the particles is equal to 500 K at time $t = 1,49$ ms.

Key words: numerical modeling, heptane, combustion chamber, temperature, weight, optimum mode.

Аскарова А.С., Болегенова С.А., Болегенова С.А., Максимов В.Ю.,
Оспанова Ш.С.* , Бекетаева М.Т., Нұғыманова А.О., Байжума Ж.Е.
Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
г. Алматы, Казахстан, *e-mail: shynarospanova1987@gmail.com

Моделирование процессов горения жидких топлив методом level set

Численное исследование горения жидких топлив является сложной задачей теплофизики, так как требует учета большого количества сложных взаимосвязанных процессов и явлений. Поэтому вычислительный эксперимент становится все более важным элементом исследования процессов горения и проектирования различных устройств, использующих процесс горения. В данной статье предложена математическая модель и основные уравнения, описывающие процесс горения жидких топлив при высокой турбулентности. Проведено исследование процессов распыла и дисперсии в зависимости степени турбулентности в камере сгорания для жидкого топлива: гептана. Проведено исследование распределения капель гептана по радиусам в камере сгорания. Даже при одинаковых значениях распределения радиусов, они имеют разное описание в камере сгорания. В базовой модели камеры сгорания минимальное значение радиуса равно 5 мкм, а максимальное значение равно 50 мкм. Тем не менее, частицы по высоте камеры сгорания распределяются по разному. Получены графики распределения температуры в различные моменты времени капель гептана в камере сгорания. Результаты получены с помощью модели стохаста. На нижней части камеры сгорания сосредоточены большие частицы при $t = 0,98$ мс и их температура равна 400 К. В другой момент времени частицы распадаются и движутся в вверх по высоте камеры сгорания. Температура частиц равна 500 К в момент времени, равной $t = 1,49$ мс.

Ключевые слова: численное моделирование, гептан, камера сгорания, давление, температура, масса, оптимальный режим.

Кіріспе

Іштен жанатын қозғалтқыштардың жану процесінің сипаттамасы отын-ауа қоспасының тұтану сәтінен бастап, клапанның ашылуына дейінгі орын алатын алуан түрлі күрделі құбылыстар болып табылады. Соңғы уақытта дамығанына карамастан, ішкі-камералық процесінің зерттеу қажеттілігі өте өзекті болып қалуда. Жану процесінде отын жылуының механикалық жұмысқа айналуы негізгі процесс болып табылады. Ол көптеген бағыттар бойынша жүзеге асырылатын, сондай-ақ олардың өзектілігі үздіксіз артып отыратын зерттеулер тақырыбы болды. Оның принципі ғылыми-зерттеу және сандық қорыту негізінде зерттелетін құбылыстардың физикалық моделін құру және дифференциалдық теңдеулер жүйесін пайдалана отырып, оларды сипаттау болып табылады. Компьютерлерді пайдалануға бағытталған сандық модельдеу әдістерін пайдалану, бұрын есепке алынбаған факторларды қамти отырып, математикалық модельдеу мүмкіндіктерін кеңейтеді. Жағу жанар динамикасын тегжейлі талдау, газ және жаңа дайындалған жану өнімдері мен

компоненттер арасындағы конвективті жылу-алмасу процестерін қоса алғанда, барлық физикалық процестерді қатаң есепке алынуын білдіреді [1-4].

Жану қозғалтқышының цилиндрінде конвективті жылуалмасу толығымен шын мәнінде қозғалтқыштың құрылымдық ерекшеліктеріне байланысты жұмыс органының қозғалыс сипаты анықталады. Осыған байланысты жұмыста, түрлі геометриясы бар жану камерасының конвекция арқылы жылу беру процесін зерттеуде ерекше назар аударылады. Ол мынадай аспектілері түрінде жану камерасынан конвективті жылу-алмасу тәуелділігін қарастыру қызықты болып табылады:

- жану камерасы нысанында жылу сипаты мен әкетілген жылу мөлшері әсерін бағалау;
- поршеньді, жең, басшысының беті арқылы жылу бағалау;
- жұмыс циклінің белгілі бір салаларына жылудың әсер ету дәрежесі.

Олардың практикалық маңызы таңдалған салаларда ТЭН анықталады, бетінің бір бөлігі арқылы операциялық циклінің қандай тарапынан сұраққа жауап алғанын білдіреді және ол

жылу алмасуды қалыптастыру есебінен жұмыс істейтін органының оны жою үшін жылу емес пайдалануды қысқарту, барынша тиімділікке қол жеткізу мақсатында поршеньді босатып, қозғалтқыш тиімділігінің индикаторын арттырады.

Сандық нәтижелері 3-4%-ға конвективті жылуалмасу кезінде жылу жоғалтуды орта есеппен 1,5% қысқаруына әкелетінін көрсетті. Конвекция жылуын жоғалту ұшқынмен оталатын қозғалтқыш тиімділігінің қысқаруына әкеп соғады. Көрсеткіш тиімділігінің жылу жоғалту әсерін талдау үшін жылу жоғалтуды ескере отырып сандық эксперименттер жүргізіледі. Нәтижесінде, көптеген сандық эксперименттер келесі үлгіні анықтады: қозғалтқыш

жылдамдығы мен қысу қатынасының өзгеруі шығын сипаты мен тұтану бұрышы тиімділігінің өзгерістеріне елеулі әсер етпейді, тек құнының жоғалуының шамалы өзгеруіне әкеледі [5-7].

Мәселенің математикалық қойылымы

Жану камерасындағы сұйық отынның жануы туралы есептің математикалық моделі тамшылардың булануына негізделген сұйық фазаның қозғалыс теңдеулеріне, сәйкес шекаралық және бастапқы шарттардағы энергия мен масса тасымалы теңдеулеріне негізделеді [8-10].

m компонент үшін үзіліссіздік теңдеуі келесі түрде жазылады:

$$\frac{\partial p_m}{\partial t} + \vec{\nabla}(p_m \vec{u}) = \vec{\nabla} \left[p D \vec{\nabla} \left(\frac{p_m}{p} \right) \right] + p_m^c + p^s \delta_{m1} \quad (1)$$

мұндағы ρ_m – m компонентінің массалық тығыздығы, ρ – толық массалық тығыздығы, u – сұйық жылдамдығы.

Сұйық фазасы үшін импульс тасымалының теңдеуі төмендегідей:

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{u} \vec{u}) = -\frac{1}{\alpha} \vec{\nabla} p - A_0 \vec{\nabla} \left(\frac{2}{3} \rho k \right) + \vec{\nabla} \vec{\sigma} + \vec{F}^s + \rho \vec{g}, \quad (2)$$

мұндағы p – сұйық қысымы.

Ішкі энергия теңдеуі мынадай:

$$\frac{\partial(\rho \vec{I})}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{u} \vec{I}) = -\rho \vec{\nabla} \vec{u} + (1 - A_0) \vec{\nabla} \vec{\sigma} \vec{u} - \vec{\nabla} \vec{J} + A_0 \rho \varepsilon + \dot{Q}^c + \dot{Q}^s. \quad (3)$$

\dot{Q}^c – химиялық реакция нәтижесінде бөлінетін жылуға байланысты көздік мүше, \dot{Q}^s – бүркілетін отын әкелетін жылу мөлшері.

Сұйық тамшысының турбулентті жалындағы қозғалысын зерттеу үшін тұтқыр кернеу тензорларын модельдеуге арналған арнайы заманауи тәсілдер қолданылады. Осы мақсатта пайдаланылатын Рейнольдстің тұйықталмаған теңдеулер жүйесін тұйықтау үшін турбуленттіліктің тұтқырлық коэффициентіне арналған өрнекті шығарып алу қажет. Қазіргі уақытта осы мақсатта қоспараметрлік модельдер жиі қолданылып жүр [11-14]. Мұндай модельдерде турбулентті тұтқырлық екі параметр арқылы анықталады. Олар үшін қосымша дербес туындылы дифференциалдық теңдеулер шешіледі.

Өлшемділіктер теориясы тұрғысынан k/ε қатынасы орташаланған ағыстан алынатын ірі құйындардың қозғалыс энергиясы аса ірі құйындардан ұсақ құйындарға дейінгі барлық масштабтан өтетін спектрге жұмсалатын уақытты білдіреді. Яғни,

$$\tau = \frac{k}{\varepsilon}. \quad (4)$$

Жоғарыдағы өрнекті ескергенде турбулентті тұтқырлық коэффициенті мына теңдеу арқылы анықталады:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (5)$$

Турбуленттіліктің кинетикалық энергиясы үшін $k - \varepsilon$ моделі мынадай тендеулерден k мен оның диссипация жылдамдығы ε құралады:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \bar{u} k) = -\frac{2}{3} \rho k \vec{\nabla} \bar{u} + \sigma \vec{\nabla} \bar{u} + \vec{\nabla} \left[\left(\left(\frac{\mu}{Pr_\varepsilon} \right) \vec{\nabla} k \right) \right] - \rho \varepsilon + \overset{\square}{W}^s, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \bar{u} \varepsilon) = -\left(\frac{2}{3} C_{\varepsilon 1} - C_{\varepsilon 2} \right) \rho \varepsilon \vec{\nabla} \bar{u} + \vec{\nabla} \left[\left(\left(\frac{\mu}{Pr_\varepsilon} \right) \vec{\nabla} \varepsilon \right) \right] + \frac{\varepsilon}{k} [C_{\varepsilon 1} \sigma \bar{u} \vec{\nabla} - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_s W^s]. \quad (7)$$

Газ коспасы үшін күй тендеуін мына түрде жазуға болады:

$$p = R_0 T \sum_m (\rho_m / W_m). \quad (8)$$

Меншікті ішкі энергия үшін тендеу төмендегідей түрге енеді:

$$I(T) = \sum_m (\rho_m / \rho) I_m(T). \quad (9)$$

Қысым тұрақты болғандағы меншікті жылу-сыымдылықтың түрі:

$$c_p(T) = \sum_m (\rho_m / \rho) c_{p,m}(T). \quad (10)$$

Энтальпия үшін тендеу:

$$h_m(T) = I_m(T) + R_0 T / W_m, \quad (11)$$

мұндағы R_0 – универсал газ тұрақтысы, W_m – m компоненттің молярлық массасы. $h_m(T)$ және $c_{p,m}(T)$ шамалары анықтамалық әдебиеттерден алынды [15-17].

m компонент үшін концентрацияның сақталу заңы төмендегідей:

$$\frac{\partial(\rho c_m)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho c_m u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D_{cm} \frac{\partial c_m}{\partial x_i} \right) + S_m. \quad (12)$$

Бұл модель еркін ағыстар үшін кеңінен қолданылады. Алайда, қабырғаға жақын ағыстарды нашар бейнелейді.

Мәселенің физикалық қойылымы

Төмендегі суреттерде гептанның жану процесі барысындағы жылуфизикалық және аэродинамикалық сипаттамалардың таралу графиктері кескінделген.

1-суретте жану камерасындағы гептан тамшыларының инжектор сопласынан 10 және 20 мм қашықтықтағы радиус бойынша таралуы кескінделген. Суреттен көрініп тұрғанындай, бөлшектердің таралу радиустарының мәні бірдей болғанымен, олардың камера ішіндегі сипаты әр түрлі. Камерадан 10 мм қашықтықта жану камерасындағы бөлшектердің ең төменгі радиус мәні 5 мкм болса, максимал мәні 50 мкм-ге жетеді. Сонымен қатар бөлшектер камера биіктігі бойымен әр түрлі мәндері бойынша таралады. 20 мм қашықтықта камера ішіндегі бөлшектердің минимал радиус мәні 20 мкм тең болды. Сәйкесінше ол камераның өсінде байқалады (1-сурет, ә). Ал максимал радиусқа ие бөлшектер камераның шығысында кездеседі.

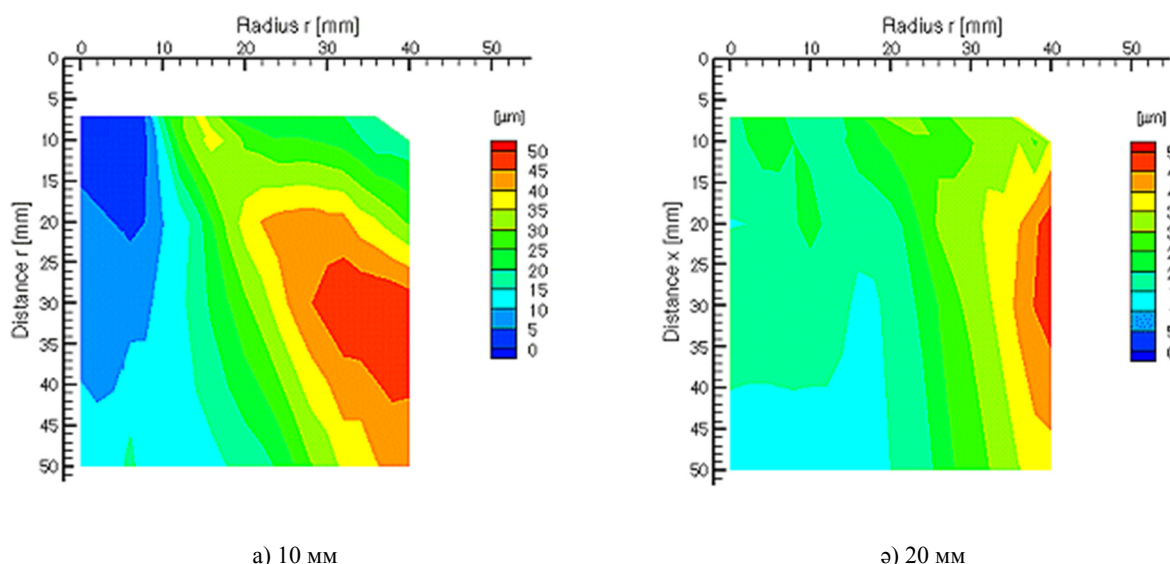
2 суретте жану камерасындағы гептан отынының массалық үлесінің таралу графигі берілген. Суреттен көрініп тұрғанындай, соплодан 10 мм қашықтықта гептанның массалық концентрациясы 0,02 г/см²с тең болды. Жалпы камера ішінде осы мән ұзақ уақыт бойы тұрақты сақталып қалады. Осы суретте сонымен қатар 20 мм қашықтықтағы гексанның массалық үлесі ағыны кескінделген. Бұл жағдайда жану камерасындағы гептан отынының массалық үлесі 0,25 г/см²с тең болды. Ал максимал масса ағыны камераның жоғарғы бөлігінде байқалады.

Келесі 3-суретте жану камерасындағы гексан тамшыларының жылдамдық профилі берілген. Салыстыру үшін сонымен қатар аталған отынның жану жылдамдығының эксперимен-

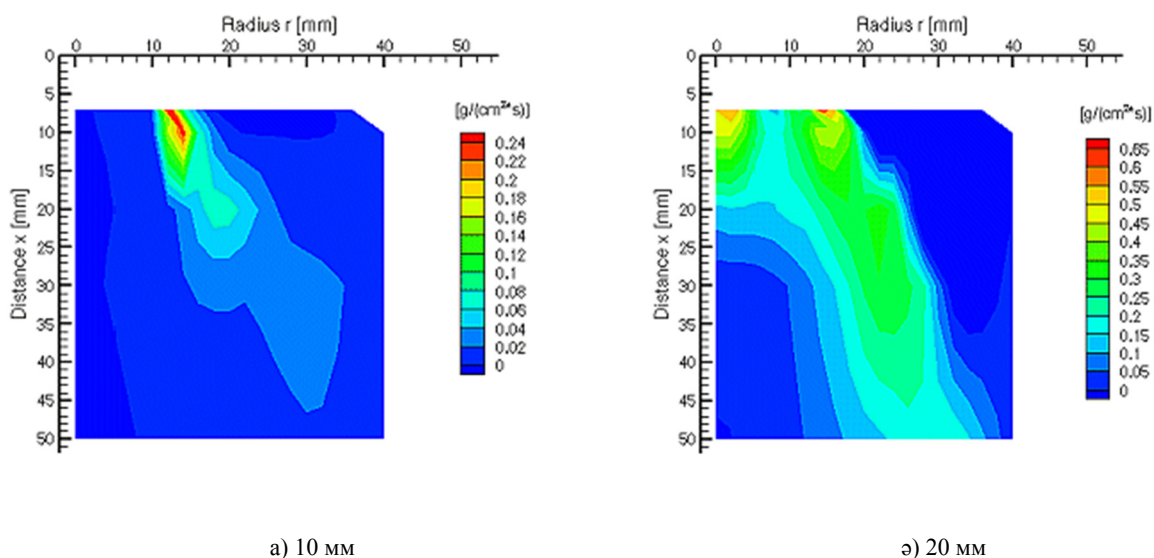
талды нәтижелері де көрсетілген. Аталған экспериментті бірқатар авторлардың еңбектерінде жарияланған [18-20].

Суреттен көрініп тұрғанындай, сандық модельдеу барысында бөлшектердің максимал жылдамдығы экспериментпен бірдей болған,

яғни 120 м/с. Сұйық отын ағыны сандық модельдеу кезінде камераның 3,8 см биіктікке көтеріледі. Ал эксперимент барысында 3,6 см биіктікке дейін жеткен. Көріп отырғанымыздай, сандық модельдеу нәтижелері экспериментпен жақсы сәйкес келеді.



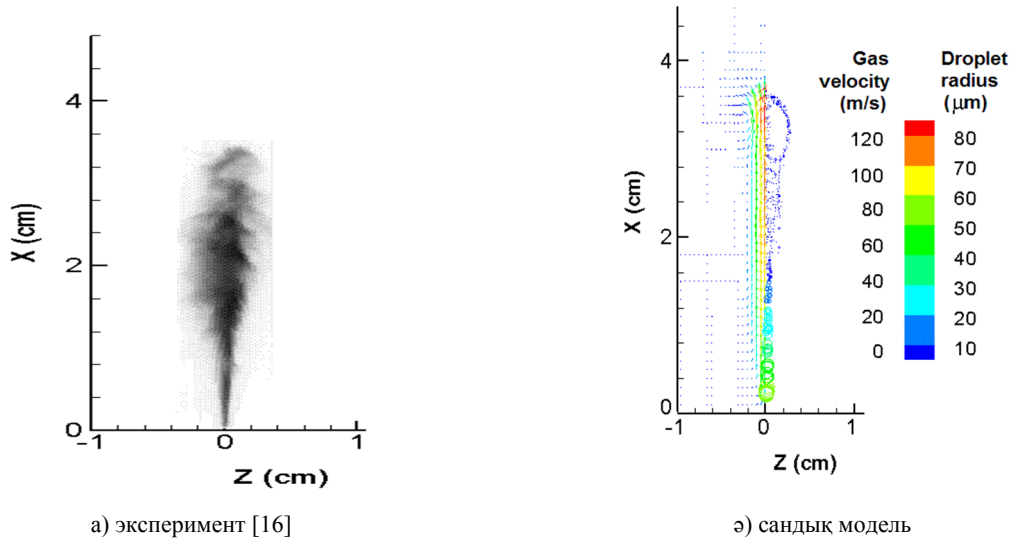
1-сурет – Гептан тамшыларының камера биіктігі бойымен радиус бойынша таралуы



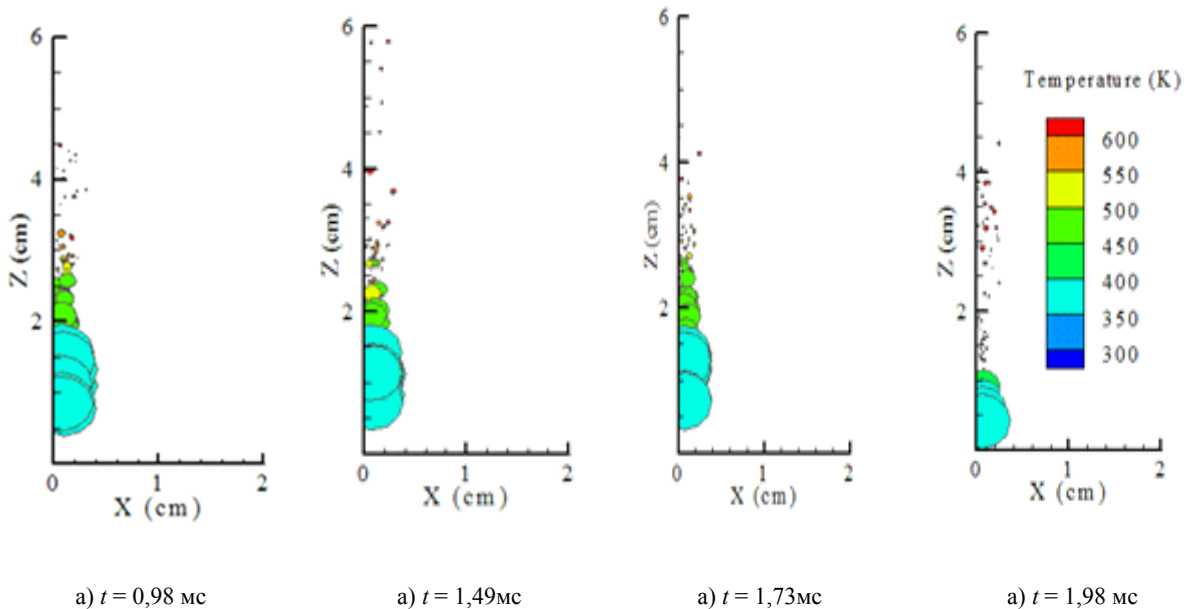
2-сурет – Гептан концентрациясының массалық үлесінің таралуы

4-суретте жану камерасындағы гептан тамшыларының әр түрлі уақыт мезеттеріндегі температура бойынша таралу графиктері кескінделген. Суреттен көрініп тұрғанындай, $t = 0,98$ мс уақыт мезетінде камераның төменгі бөлігінде радиустары үлкен бөлшектер шоғырланған, олардың температурасы 400 К тең. Келесі уақыт мезеттерінде бөлшектер ыдырап, камера биіктігі бойымен жоғары қарай жылжиды. $t = 1,49$ мс

уақыт мезетінде бөлшектердің температурасы 500 К-ге жетеді. Келесі уақыт мезеттерінде радиустары кіші бөлшектер камераның биіктігімен жоғары қарай өрлейді. $t = 1,98$ мс уақыт мезетінде бөлшектердің булануы нәтижесінде олардың саны азайып, камера ішінде салмағы үлкен бөлшектер ғана қалады. Сәйкесінше олардың температурасы 400 – 600 К арасында ауытқиды [21].



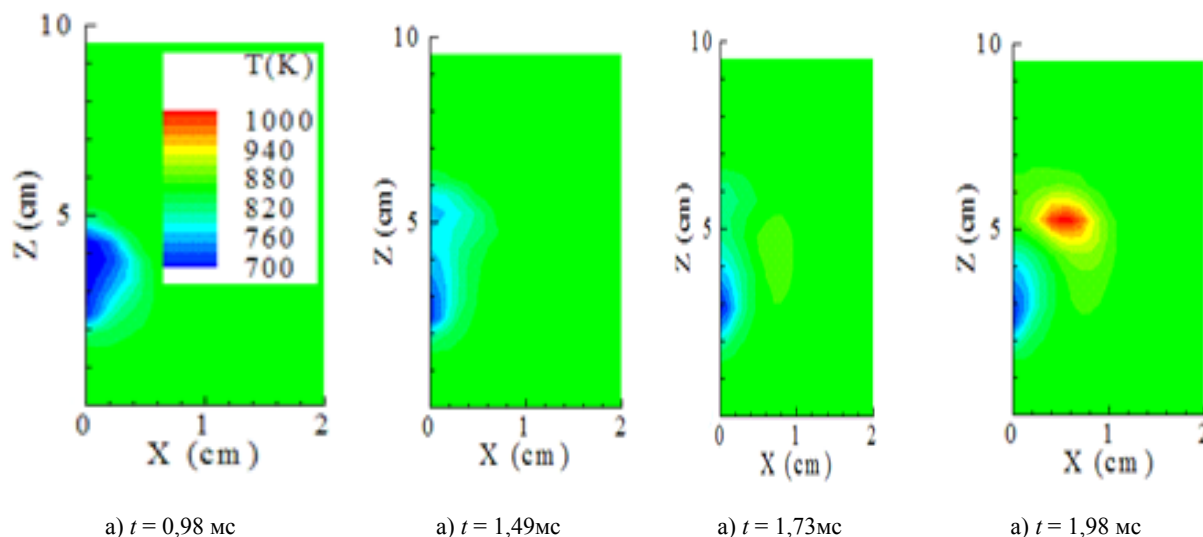
3-сурет – Гептан тамшыларының жылдамдық бойынша таралуы



4-сурет – Әр түрлі уақыт мезеттеріндегі гептан тамшыларының температурасының таралуы

5-суретте жану камерасындағы гексанның жану өнімдерінің температурасының таралуы бейнеленген. Бастапқы уақыт мезетінде температуралық алау камера биіктігі бойымен 5 см биіктікке жетеді (5-сурет, а). Келесі $t = 1,49$ мс уақытта температуралық алаудың ені

кішірейіп, камераның тек ені бойымен тарала бастайды. Сәйкесінше, алаудың ядросындағы температура мәні 760 К құрайды. Ал $t = 1,98$ мс уақытта камераның екінші жақтауында жоғары температура мәндері байқалып, оның мәні 1000 К жетеді.

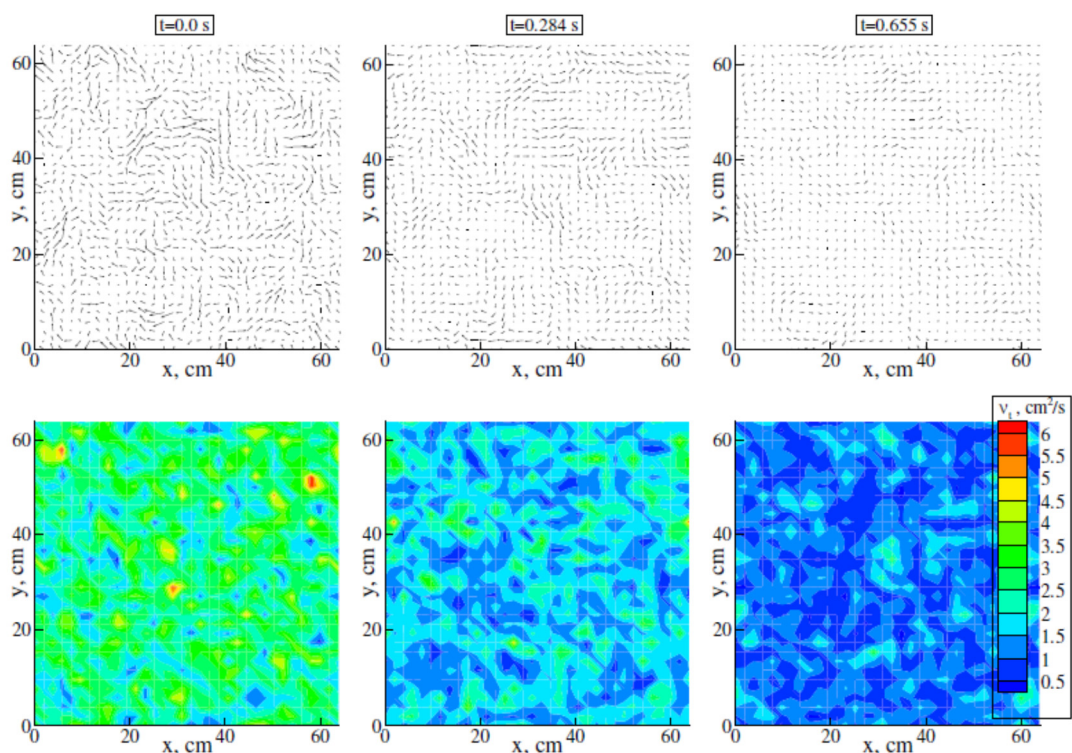


5 сурет – Әр түрлі уақыт мезеттеріндегі гексанның жану температурасының таралуы

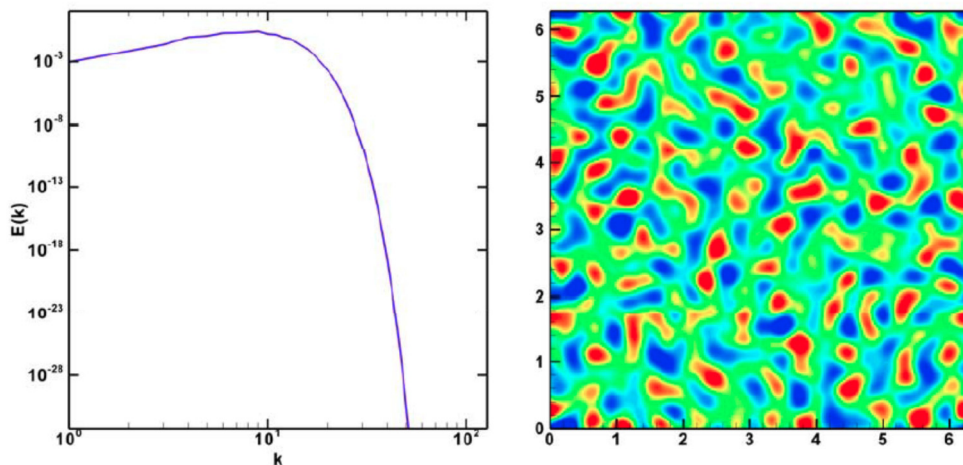
6-суретте жану камерасындағы әр түрлі уақыт мезеттеріндегі гептан тамшыларының жану жылдамдығының таралуы бейнеленген. Бастапқы уақыт мезетінде жылдамдық өрісіндегі тамшылардың қозғалысы 3,5 м/с құрайды. Уақыт өте келе олардың жылдамдықтары 4,5 м/с-қа жетеді. 0,655 мс уақытта бөлшектердің жылдамдығы төмендеп, оның мәні 1,5 м/с-қа жетеді.

7-суретте гептанның жануы нәтижесіндегі турбуленттіліктің кинетикалық энергиясының таралу спектрі және құйынды өрістің визуализациясы бейнеленген. Толқындық сан мәні төменгі мәндерде турбуленттіліктің кинетикалық энергиясы жоғары мәндерге жетеді, сәйкесінше,

толқындық сан артқан сайын оның мәні күрт төмендеп кетеді. Турбуленттіліктің кинетикалық энергиясының максимумы $k = 10$ мәнінде байқалады. Спектрдің инерциялы облысындағы құйынды құрылымдардың өлшемі $L < l < \eta$. Осы облыста тұтқырлықтың әсері болмайды және турбуленттіліктің энергиясы түзілмейді (генерациясы болмайды) және диссипацияға ұшырамайды, тек ірі құйындардан ұсақ құйындарға беріледі. Мұны энергетикалық каскад құбылысы деп атайды. Нәтижесінде II облыстағы энергетикалық спектр универсал деп аталады және Колмогоровтың заңымен сипатталады [22].



6 сурет – Әр түрлі уақыттағы гептанның жану жылдамдығының кеңістікте таралуы:
а) 0 мс; ә) 0,284 мс; б) 0,655 мс



7 сурет – Турбуленттіліктің кинетикалық энергиясының таралу спектрі және құйынды өрістің визуализациясы

Қорытынды

Жұмыста бүрку мәндеріндегі сұйық гептан отынның жануы мен дисперсиясына әсері сандық тұрғыдан зерттелінді. Бастапқы тиімді масса мен температура мәндеріндегі сұйық отынның жану процесі зерттелінді. Тиімді масса 6 мг және бастапқы тиімді температура мәні 900

К құрады. Сандық модельдеу нәтижесінде мынадай нәтижелерге қол жеткізілді:

Жану камерасындағы гептанның тамшыларының радиус бойынша таралуы зерттелінді. Бөлшектердің таралу радиустарының мәні бірдей болғанымен, олардың камера ішіндегі сипаты әр түрлі. Қарапайым модельде жану камерасындағы бөлшектердің ең төменгі радиус мәні

5 мкм болса, максимал мәні 50 мкм-ге жетеді. Сонымен қатар бөлшектер камера биіктігі бойымен әр түрлі мәндері бойынша таралад.

Жану камерасындағы гептан тамшыларының әр түрлі уақыт мезеттеріндегі температура бойынша таралу графиктері алынды. Аталған нәтижелер стохастты модельді қолдана отырып, алынды. $t=0,98$ мс уақыт мезетінде камераның төменгі бөлігінде радиустары үлкен бөлшектер шоғырланған, олардың температурасы 400 К тең.

Келесі уақыт мезеттерінде бөлшектер ыдырап, камера биіктігі бойымен жоғары қарай

жылжиды. $t=1,49$ мс уақыт мезетінде бөлшектердің температурасы 500 К-ге жетед.

Жану камерасындағы гептанның жану өнімдерінің температурасының таралуы қарастырылды. Бастапқы уақыт мезетінде температуралық алау камера биіктігі бойымен 5 см биіктікке жетеді. Келесі $t=1,49$ мс уақытта температуралық алаудың ені кішірейіп, камераның тек ені бойымен тарала бастайды. Сәйкесінше, алаудың ядросындағы температура мәні 760 К құрайды. Ал $t=1,98$ мс уақытта камераның екінші жақтауында жоғары температура мәндері байқалып, оның мәні 1000 К жетеді.

Әдебиеттер

- 1 Askarova A. S., Bolegenova, S.A., Maximov, V.Y., Bekmukhamet, A., Beketayeva M., Gabitova Z. Control of Harmful Emissions Concentration into the Atmosphere of Megacities of Kazakhstan Republic // International Conference on Future Information Engineering (FIE2014), IERI Procedia. – Beijing, Peoples R China. – 2014. – pp. 252-258.
- 2 Askarova, A. S., Maximov, V., Beketayeva, M., Safarik, P., et al. Numerical Modeling of Pulverized Coal Combustion at Thermal Power Plant Boilers // Journal of thermal science. – 2015. – Vol. 24, issue 3. – P. 275-282.
- 3 Askarova A., Bolegenova S., Bolegenova S., Maximov V., Manatbayev R, Yergaliyeva A., Gabitova Z., Maxutkhanova A., Shortanbayeva Zh., Boranbayeva A., Berdikhan K. Application of 3D modelling for solving the problem of combustion coal-dust flame // Bulgarian Chemical Communications. – Special Issue E, 2016. – P. 236-241.
- 4 Askarova A., Bolegenova S., Mazhrenova N., Bolegenova Symbat, Manatbayev R., Berezovskaya I., Maximov V., Ospanova Sh., Nugymanova A., Shortanbayeva Zh. 3D modelling of heat and mass transfer processes during the combustion of liquid fuel // Bulgarian Chemical Communications. – Special Issue E, 2016. – P. 229-235.
- 5 Askarova A.S., Heierle E.I., Bolegenova S.A., Maximov V.Ju., Bolegenova S.A., Manatbayev R.M., Beketaeva T., Ergalieva A.B. CFD study of harmful substances production in coal-fired power plant of Kazakhstan // Bulgarian Chemical Communications. – Special Issue E, 2016. – P. 260-265.
- 6 Askarova A.S., Bolegenova S A., Bolegenova Symbat, Maximov V.Yu., Manatbayev R., Shortanbayeva Zh.K., Maksutkhanova A.M., Aldiyarova A.N., Boranbayeva A.E. Mathematical modeling of heat and mass transfer in the presence of physical-chemical processes // Bulgarian Chemical Communications. – Special Issue E, 2016. – P. 272-277.
- 7 Leithner R., Askarova A., Bolegenova S., Bolegenova S., Maximov V., Ospanova Sh., Ergalieva A., Nugymanova A., Beketayeva M. Computational modeling of heat and mass transfer processes in combustion chamber at power plant of Kazakhstan // MATEC Web of Conferences DOI: 10.1051/mateconf/20167606001, 2016. – 5p.
- 8 Askarova, A., Bolegenova, S., Bolegenova, S., Boranbayeva, A., Berdikhan, K. Application of numerical methods for calculating the burning problems of coal-dust flame in real scale // International Journal of Applied Engineering Research. – Vol. 11, Issue 8, 2016, pp. 5511-5515.
- 9 Askarova A., Bolegenova S. et al. Influence of boundary conditions to heat and mass transfer processes // Intern. Journal of Mechanics. – 2016. – Vol.10. – P. 320-325.
- 10 Askarova A., Bolegenova S., Maximov V. et al. On the effect of the temperature boundary conditions on the walls for the processes of heat and mass transfer // International Journal of Mechanics. – 2016. – Vol.10. – P. 349-355.
- 11 Ramaswamy M.C., Gupta M.C. Some Aspects of Flame Quenching in a Spark Ignition Engine // Archiwum Termodynamiki i Spalania. – 1979. – Vol. 18, №3. – P. 405-418.
- 12 Moses E., Yarin A.L. and Bar-Yoseph P. On Knocking Prediction in Spark Ignition Engines // Combust. Flame. – 1995. – Vol. 101, №3. – P. 239-261.
- 13 Gorokhovski M. The stochastic Lagrangian model of drop breakup in the computation of liquid sprays // Atomization and Sprays. – 2001. – Vol. 1, №5. – P. 169-176.
- 14 Apte S.V., Gorokhovski M., Moin P. LES of atomizing spray with stochastic modeling of secondary breakup // International Journal of Multiphase Flow. – 2003. – Vol. 29, №9. – P. 1503-1522.
- 15 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. – Vol. 32, №3. – P. 344-364.
- 16 Gorokhovski M.A., Saveliev V.L. Analyses of Kolmogorov's model of breakup and its application into Lagrangian computation of liquid sprays under air-blast atomization // Physics of Fluids. – 2003. – Vol. 5, №1. – P. 184-192.
- 17 Wilcox D. Turbulence Modeling for CFD. – La Canada: DCW Industries, Inc, 1993. – 460p.
- 18 Hinze J. O. Turbulence. – New York: McGraw-Hill Publishing Co, 1975. – 404 p.
- 19 Leithner, R., Müller H. CFD studies for boilers // Second M.I.T. Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics – Cambridge, 2003. – P.172.
- 20 Sabel'nikov V., Gorokhovski M., Baricault N. The extended IEM mixing model in the framework of the composition PDF approach: applications to diesel spray combustion // Combustion Theory and Modelling. – 2006. – Vol.10, №1. – P. 155-169.

- 21 Jianping L., Tatsuo U., Osami K., Zhiming L., Yulu L. Lagrangian dispersion in turbulent channel flow and its relationship to Eulerian statistics // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2007. – Vol.28. – P.871-881.
- 22 Fackrell J. E., Robins A. G. Concentration fluctuations and fluxes in plumes from point sources in a turbulent boundary layer // J. Fluid Mech. – 1982. – Vol.117. – P.1-26.

References

1. A.S. Askarova, S.A. Bolegenova, V.Y. Maximov, A. Bekmukhamet, M. Beketayeva, and Z. Gabitova, International Conference on Future Information Engineering (FIE2014), IERI Procedia, (Beijing, Peoples R China, 2014), 252-258.
2. A.S. Askarova, V. Maximov, M. Beketayeva, and P. Safarik, Journal of thermal science, 24(3), 275-282, (2015).
3. A. Askarova, S. Bolegenova, S. Bolegenova, V. Maximov, Manatbayev R, A. Yergaliyeva, Z. Gabitova, A. Maxutkhanova, Zh. Shortanbayeva, A. Boranbayeva, and K. Berdikhan, Bulgarian Chemical Communications, Special Issue E, 236-241, (2016).
4. A. Askarova, S. Bolegenova, N. Mazhrenova, Symbat Bolegenova, R. Manatbayev, I. Berezovskaya, V. Maximov, Sh. Ospanova, A. Nugymanova, and Zh. Shortanbayeva, Bulgarian Chemical Communications, Special Issue E, 229-235, (2016).
5. A.S. Askarova, E.I. Heierle, S.A. Bolegenova, V.Ju. Maximov, S.A. Bolegenova, R. Manatbayev, M.T. Beketaeva, and A.B. Ergalieva, Bulgarian Chemical Communications, Special Issue E, 260-265, (2016).
6. A.S. Askarova, S.A. Bolegenova, Symbat Bolegenova, V.Yu. Maximov, R. Manatbayev, Zh.K. Shortanbayeva, A.M. Maksutkhanova, A.N. Aldiyarova, and A.E. Boranbayeva, Bulgarian Chemical Communications, Special Issue E, 272-277, (2016).
7. R. Leithner, A. Askarova, S. Bolegenova, S. Bolegenova, V. Maximov, Sh. Ospanova, A. Ergalieva, A. Nugymanova, and M. Beketayeva, MATEC Web of Conferences, 5p, (2016). doi: 10.1051/mateconf/20167606001.
8. A. Askarova, S. Bolegenova, S. Bolegenova, A. Boranbayeva, and K. Berdikhan, International Journal of Applied Engineering Research 11 (8), 5511-5515, (2016).
9. A. Askarova, S. Bolegenova et al. Intern. Journal of Mechanics 10, 320-325, (2016).
10. A. Askarova, S. Bolegenova, V. Maximov et al., International Journal of Mechanics, 10, 349-355, (2016).
11. M.C. Ramaswamy and M.C. Gupta, Archiwum Termodynamiki i Spalania 18, No3, 405-418, (1979).
12. E. Moses, A.L. Yarin and P. Bar-Yoseph Combust. Flame 101, No3, 239-261, (1995).
13. M. Gorokhovski, Atomization and Sprays 1, No 5, 169-176, (2001).
14. S.V. Apte, M. Gorokhovski, and P.Moin, International Journal of Multiphase Flow 29, No9, 1503-1522, (2003).
15. I. Vinkovic, C. Aguirre, S. Simoëns, and M. Gorokhovski, International journal of multiphase flow 32, No3, 344-364, (2006).
16. M.A. Gorokhovski and V.L. Saveliev, Physics of Fluids 5, No1, 184-192, (2003).
17. D. Wilcox, Turbulence Modeling for CFD, (La Canada: DCW Industries, Inc, 1993), 460 p.
18. J.O. Hinze Turbulence, (New York: McGraw-Hill Publishing Co, 1975), 404 p.
19. R. Leithner and H.Müller, Second M.I.T. Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, (Cambridge, 2003), p.172.
20. V. Sabel'nikov, M. Gorokhovski, and N. Baricault, Combustion Theory and Modelling 10, No1, 155-169, (2006).
21. L. Jianping, U. Tatsuo, K. Osami, L. Zhiming, and L.Yulu, International Journal of Heat and Fluid Flow 28, 871-881, (2007).
22. J.E. Fackrell and A.G. Robins, J. Fluid Mech. 117, 1-26, (1982).