









С.А. Болегенова , А.С. Аскарова , Ш.С. Оспанова\* ,  
А.З. Нурмуханова , Н.А. Адильбаев , А.Б. Маканова ,  
С.А. Жумагалиева , А. Шалкар 

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

## ЕКІФАЗАЛЫ ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ СҰЙЫҚ БӨЛШЕКТЕРІНІҢ ЕКІНШІ ТЕКТІ БҮРКІЛУІН МОДЕЛЬДЕУ БОЙЫНША ЕСЕПТЕУ ТӘЖІРИБЕЛЕРІ

Сұйық отындардың жануын сандық зерттеу – жылуфизиканың күрделі мәселелерінің бірі, өйткені, күрделі өзара байланысқан процестер мен құбылыстардың едәуір көп санын ескеруді талап етеді. Сондықтан есептеуіш тәжірибе жану процесін зерттеу мен жануға негізделетін түрлі құрылғыларды жобалаудың аса маңызды элементіне айналып отыр. Оның рөлі болашақта да арта түседі деп нық сеніммен айтуға болады. Сондықтан жылуфизикасында есептеуіш гидродинамика әдістері етек жайып отыр, өйткені, тәжірибенің виртуалды прототипі негізінде оны жетілдіру мүмкіндігі сөзсіз туады. Берілген жұмыста отынның бүрку және жану процесінің бастапқы параметрлеріне байланысты екіфазалы гетерогенді әсерлесетін жүйелерді зерттеу бойынша есептеу эксперименттері жүргізілді. Жүргізілген есептеу эксперименттерінің нәтижесінде тамшылардың максимал жану температурасының бүрку массасы мен қысымына тәуелділігі, сондай-ақ жану камерасының биіктігі бойынша сұйық отынның екі түрінің (октан және додекан) тамшыларының дисперсиясының екі өлшемді графигі алынды. Инжектор соплосынан 50 см қашықтықта уақыт бойынша тамшылардың Саутер орташа диаметрінің таралуының алынған сандық есептеулері эксперименттік мәліметтермен салыстырылды, нәтижесінде эксперименттік мәліметтер додекан үшін сандық есептеулермен жақсы келісім беретіндігі анықталды. Екіфазалы отын жүйелерін концентрациялық және температуралық сипаттамаларын зерттеу бойынша жүзеге асырылған компьютерлік эксперименттер нәтижесінде октан мен додеканның тиімді жану режимі анықталды.

**Түйін сөздер:** отын, температура, масса, қысым, модельдеу, бүрку, жану.

S.A. Bolegenova, A.S. Askarova, Sh.S. Ospanova\*, A.Z. Nurmukhanova,  
N.A. Adilbayev, A.B. Makanova, S.A. Zhumagaliyeva, A. Shalkar  
Al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Kazakhstan  
e-mail: Shynar.Ospanova@kaznu.edu.kz

### Computational experiments on simulation of liquid particles' secondary atomization in two-phase systems

Understanding the combustion of liquid fuels poses a complex challenge in thermal physics due to the interconnected nature of the various processes involved. It is becoming increasingly crucial to rely on computer-based experiments for understanding combustion and creating innovative burning-related devices. It may have increased importance in the role. In thermal physics, there is a growing trend toward utilizing computer-based techniques to study liquid fuels, offering the potential to enhance experiments through numerical simulations. This research involved conducting computerized experiments to understand the process of fuel combustion and the transformation into gas, focusing on the initial fragmentation and combustion stages. As a result of the computational experiments, the correlation between the temperature change of burning droplets, their size, and injection speed was investigated. Also, visual representations were created to demonstrate the dispersion of various fuel droplets in a combustion chamber. The obtained numerical calculations of the droplets' Sauter mean diameter distributions of 50 cm away from the nozzle of the injector were compared with experimental points, because of which the test demonstrated the accuracy of the numerical data for dodecane. The optimal combustion mode of octane and dodecane was established based on computer experiments to study the amount of fuel present and its temperature in a two-phase liquid system.

**Key words:** fuel, temperature, mass, pressure, modeling, spray, combustion.

С.А. Болегенова, А.С. Аскарова, Ш.С. Оспанова\*, А.З. Нурмуханова,  
Н.А. Адильбаев, А.Б. Маканова, С.А. Жумагалиева, А. Шалкар  
Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан  
\*e-mail: Shynar.Ospanova@kaznu.kz

### Вычислительные эксперименты по моделированию вторичного распыла жидких частиц в двухфазных системах

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. Можно с уверенностью говорить, что его роль будет возрастать и в дальнейшем. В этой связи все большее распространение в теплофизике получают методы вычислительной гидродинамики, когда появляется возможность оптимизировать эксперимент на основе его виртуального прототипа. В данной работе были проведены вычислительные эксперименты по исследованию двухфазных гетерогенных реагирующих систем в зависимости от начальных параметров процесса распыла и сжигания топлив. В результате проведенных вычислительных экспериментов были получены зависимости максимальной температуры горения капель от массы и давления впрысков, а также двумерные графики дисперсии капель двух видов жидких топлив (октан и додекан) по высоте камеры сгорания. Полученные численные расчеты распределения Саутеровского среднего диаметра капель по времени при расстоянии 50 см от сопла инжектора были сравнены с экспериментальными данными, в результате чего установлено, что экспериментальные данные дают хорошее согласие с численными расчетами для додекана. На основе проведенных компьютерных экспериментов по изучению концентранных и температурных характеристик двухфазных топливных систем установлен оптимальный режим горения октана и додекана.

**Ключевые слова:** топливо, температура, масса, давление, моделирование, распыл, горение.

### Кіріспе

Компьютерлендіру мен ғылымның қарқынды өрлеу деңгейінің жоғарылауы, әрі көмекші техникалық құралдардың мүмкіндігінің кеңеюімен техникалық физика, жылуфизикасы және отындардың жану теориясында отынды ұтымды жағу және оны саналы түрде тұтыну процестерінің экологиялық залалсыздығын қамту саласында өзекті мәселелерді шешудің озық тәжірибелері ойластырылып, бірталай табысқа жету үстінде.

Бүгінгі күні қалпына келетін энергия көздерін игеру, әрі оларды тиімді тұтынуды жандандыруға күш салынып жатқанымен, көпшілік мемлекеттерде энергияның 85%-ға жуығы жер қойнауынан қазып алынатын жанғыш отын түрлерінен игеріледі [1]. Энергетикалық талдаулардың қорытындысына жүгінсек, 39% энергия көлемі сұйық отындардың алуан түрлерін жағудан алынатын көрінеді, ал оның ішінде көлік тасымалы секторына жұмсалатын энергия өндірісінің пайыздық үлесі 97% көрсеткішті көрсетіп отыр [2-5]. Сұйық отынды басты энергия көзі ретінде қажетке жаратумен қатар, жұмыс істеу принципі оларды жағумен байланысты құрылғылардың

эффективтілігін жоғарылатуға және шығарылатын зиянды қалдықтардың мөлшерін неғұрлым азайтуға да ерекше назар аударылуы керек. Соңғы уақыттарда әлемдегі көпшілік мемлекеттерде, оның ішінде Еуропа мен Орта Азия елдерін қоса есептегенде, отын сапасының экологиялық қауіпсіздігіне қойылатын талаптардың өсу динамикасы байқалады.

Зиянды газ тәрізді қалдықтардың өндірісін мейлінше азайтуда аса тиімді, әрі қалдықтардың төменгі деңгейіне негізделетін энергия түрлендіруші құрылғылардың жетілдірілген жүйелерін өзірлеу көш бастап тұрғаны рас. Бұл шындығында көмірқышқыл газының (CO<sub>2</sub>) бөлінуіне байланысты, әрі оның салдарынан болашақта әуе көліктерінің стратосфераның озон қабатының қажетсіз нашарлауына әкелмейтіндігіне кепілдік береді. Мұнайдың ғаламдық тұтыну көлемі Халықаралық энергетика агенттігінің топшылауынша күн санап әлі де ұлғаятын болады [6-9].

Отынды пайдаланудың тиімділігі, одан шығатын қондырғының өнімділігі мен орнықтылығы отынды дайындау, оны беру және ұтымды жағу процестерін қамтитын отынды жағудың оңтайлы ұйымдастырылуына тікелей байланысты. Оңтайлы режимдегі іштен жану

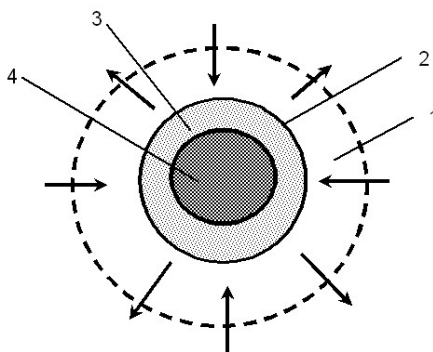
қозғалтқыштарын қалыптастырудағы барша зерттеулер көлік құралдарынан атмосфераға шығарылатын ластаушы заттардың мөлшерін кемітуге бағытталған.

Алғашқы сатыда сұйық отын қайнау температурасына дейін қызып, әрі қарай булануға көшеді, келесі сатыда жану процесі жүзеге асырылады. 1-суретте сұйық тамшысының жану процесінің сызбалық құрылымы келтірілген. Сұйық көмірсутекті отын түрлерінің қайнау температурасы тұтану шегінен төмен болатындықтан жанудан бұрын булану процесі жүзеге асырылады. Өндірілетін жану өнімдерімен ілесіп, диффузияланушы ауаның үлесі жану аймағына тереңдей түседі. Жану аймағының ауданы тамшылардың жану жылдамдығы мен оларды бүрку сипатына тікелей тәуелді болатыны анық: бүркілетін тамшылардың өлшемі неғұрлым ұсақ болса, жану процесі соғұрлым толыққанды өтетіні белгілі.

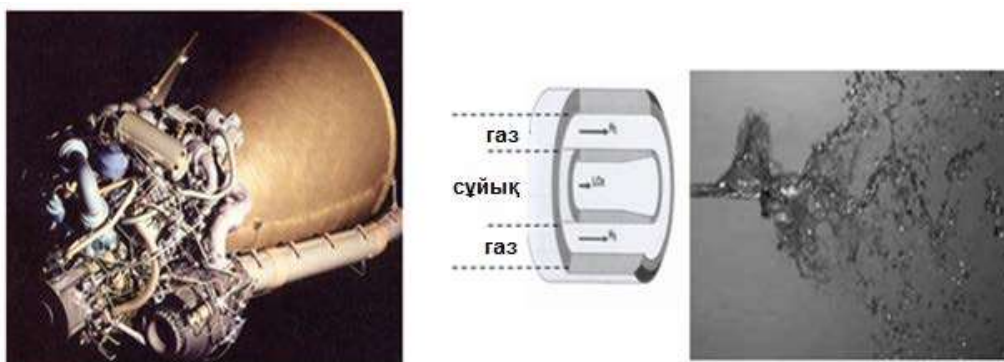
2-суретте сызба түрінде зымырандық қозғалтқыштарда орын алатын шарттарға сәйкес

жағдайдағы серіктес ауа ағынымен бүрку түрі бейнеленген. Мұнда сұйық оттегінің төменгі жылдамдықта бүркілген орталық ағыншасын газ тәрізді сутегінің жоғары жылдамдықты ағыны өз қозғалысымен бірге ілестіріп алып кетеді. Сұйық ағыншасы толқынды сипатқа еніп, содан соң қозғалыстағы газдың жылдамдығының жоғары болуының себебінен жіпшелер мен ұсақ тамшыларға жіктеліп кетеді.

Инжектор сопласының кірісіне жақын ауданда сұйық отынның фрагменттерге жіктеліп үлгермейтін аймағын сұйық ядросы деп атайды. Мұнда сұйық салмағының фракциясы бірге жақындап, ал жалпы сұйық ағынының ауданы мейлінше бұзылуға ұшырай қоймайды [10-13]. Көпшілік құбылыстар жоғарыда аталған сұйық ядросының үзілу шекарасында жүзеге асырылатындықтан фрагменттер талшықтарға жіктеліп, жоғары жылдамдықты ағыстың әсерінен олар өз кезегінде тамшыларға ажырайды. Сұйық отын массасының мұндай ұсақ фрагменттерге жіктелуі бірінші текті бүрку құбылысымен сипатталады.



**1-сурет** – Көмірсутекті отын тамшысының жану сатылары  
 1 – камерадағы газ бен жану өнімдерінің таралу аймағы,  
 2 – сұйық отын көлемі, 3 – отын буының шоғырлану аймағы, 4 – тамшы

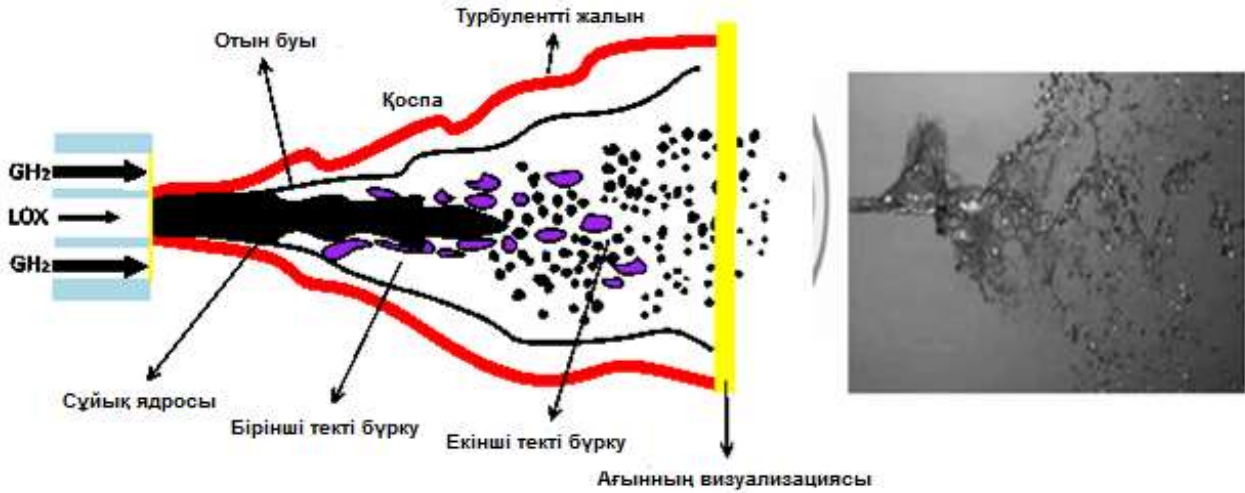


**2-сурет** – Реактивті іштен жану қозғалтқышындағы отынды бүрудің мысалы

Ажырап шыққан сұйық фрагменттері өзара соқтығу процесінің салдарынан бірігіп, біртұтас масса құрайды немесе одан әрі қарай ұсақ тамшыларға жіктеліп кетеді. Аталған құбылыс жоғары жылдамдықта

қозғалатын газ ағынының әсерінен жүзеге асырылады.

3-суретте бірінші және екінші текті сұйық ағынының бүркілу процесінің таралуының сызбалық бейнесі келтірілген [14].



3-сурет – Сұйық отын ағыншасының бүрку сызбасы

### Қолданылатын әдістер және нысанның сандық моделі

Модельдеу тәжірибелерін жүзеге асыру мақсатында мәселенің математикалық моделі тұрғызылды: сұйық отынның бүрку және жану процестерін сипаттайтын үзіліссіздік, қозғалыс, компонент концентрациясының теңдеулері мен эмпирикалық турбуленттілік моделі келтірілді.

Тамшылардың газ ағынында таралуын сипаттайтын үзіліссіздік теңдеуі келесі нұсқада жазылады [15-17]:

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

мұндағы  $\vec{u}$  – сұйық отын ағынының векторлық жылдамдығы. Екіфазалы ағыс жағдайында  $S_{mass}$  ағын көзі тамшылардың булануы немесе конденсацияның салдарынан газ тығыздығының локальді градиентін сипаттайты. Бірфазалы қарапайым біртекті жүйелерде жоғарыдағы ағын көзі нөлге тең деп қарастырылады.

Тамшылардың серіктес газ ағынындағы қозғалысы импульстің сақталу заңымен сипатталады [15-17]:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \text{grad}) \vec{u} = \text{div} \vec{\xi} + \rho \vec{g} + S_{mom}, \quad (2)$$

$$\vec{\xi} = -P \vec{I} + \vec{\tau}.$$

(2) теңдеудің оң жағы қысымның  $P$  өзгерісі, тұтқыр кернеу тензоры  $\vec{\tau} = \lambda \vec{I} \text{div} \vec{u} + 2\mu \vec{D}$  және сұйық көлемінің салмағының  $\rho \vec{g}$  есебінен негізгі ағынға келіп қосылатын импульстің өсімшесін білдіреді. Мұндағы  $D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$  – жылдамдық тензорының деформациясы,  $\vec{I}$  – сандық матрица,  $\mu$  және  $\lambda$  – динамикалық және екінші тұтқырлық коэффициенттері.

Бірфазалы біртекті газ жүйелерінде  $S_{mom} = 0$  тең болады; екіфазалы әсерлесуші ағыстарда  $S_{mom}$  ағын көзі тамшылардың газ ағынына

ілесе қозғалуы нәтижесіндегі импульстің локальді өзгеріс жылдамдығын білдіреді.

Жүйенің ішкі энергиясы жылу ағыны мен оның таралу жылдамдығына тәуелді болады [15-17]:

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

теңдеудегі  $q$  Фурье өрнегінен анықталатын меншікті жылу ағынын сипаттайды,  $\vec{\tau} : \vec{D}$  шамасы тұтқыр диссипацияның салдарынан туындайтын ішкі энергияның өзгерісінің өсімшесін білдірсе,  $S_{energy}$  бүркілген тамшылардан тұратын сұйық фазаның ішкі энергияның өсімшесіне қосатын үлесін көрсетеді.

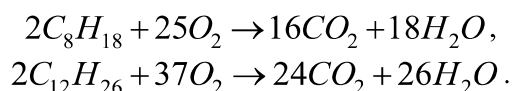
Концентрацияның  $m$  компонентінің сақталу теңдеуі келесідей болады [15-17]:

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

бұл жердегі  $\rho_m$  отын-ауалы қоспаның  $m$ -ші компонентінің массалық тығыздығын білдірсе,  $\rho$  жалпы қоспаның толық тығыздығын көрсетеді.

Жұмыста турбулентті ағыстарды инженерлік есептеулердің анағұрлым универсал моделдері ретінде екі дифференциалдық теңдеуден тұратын  $k-\varepsilon$  моделі қолданылды. Мұнда турбулентті ағынның кинетикалық энергиясы  $k$  және оның диссипация дәрежесі  $\varepsilon$  үшін қос эмпирикалық теңдеу шешіледі [18-21].

Жұмыста іштен жану қозғалтқыштарында жиі пайдаланылатын октан және додекан сұйық отындары қолданылды. Олардың ауамен тотығуының химиялық ауысу реакциясы келесі түрде жазылады:

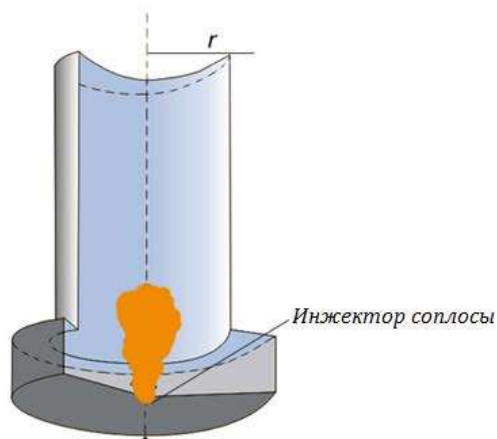


Барлық көмірсутекті отындардың жану реакциясының соңында көміртегінің қос тотығы мен ылғал түзіледі.

## Есептеуіш тәжірибе нәтижелері

Модельдеу бойынша эксперименттерді жүргізу барысында әр түрлі іштен жану қозғалтқыштарындағы сұйық отынды бүрку және оның жану процесінің химиялық кинетикасын сипаттау үшін KIVA-II қолданбалы компьютерлік бағдарламасы қойылған міндеттерге сәйкес бейімделді [22]. Бұл бағдарлама кешінінің көмегімен жоғары турбулентті әсерлесуші ағындардағы тамшылардың тұтану, булану және жану процестерін модельдік камерада визуализациялауға болады. Нәтижесінде жану камерасының биіктігі бойымен ағыстың визуализациясын, яғни оның аэродинамикалық, температуралық, концентрациялық және турбуленттік параметрлерін есептеуге мүмкіндік туындайды.

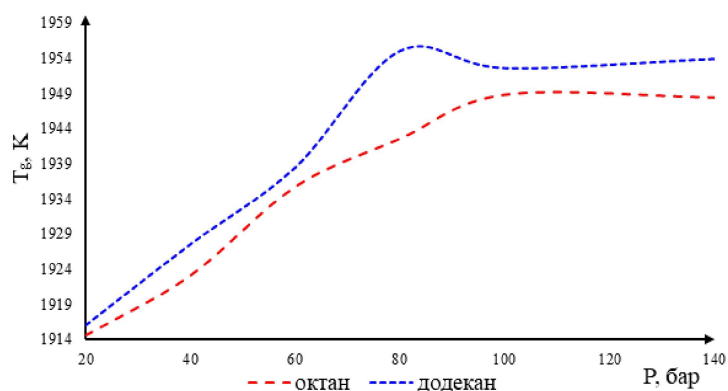
Жану камерасының геометриялық пішіні цилиндр формалы: биіктігі 15 см және диаметрі 4 см тең. Модельдік жану камерасының кескіні 6 суретте бейнеленген. Модельдеу барысында қамтылған геометриялық есептеу аймағы 650 бақыланатын торларға жіктелінді. Сұйық отын тамшылары камераның төменгі бөлігіндегі инжектор арқылы камераға бүркіледі. Жану камерасының қабырғалары 353 К-ге, ал ондағы серіктес газ ағыны 900 К-ге дейін қыздырылады. Тамшылардың кіріс өлшемдері монодисперсті отын қоспасы үшін 25 мкм тең деп қабылданды. Инжектор сопласының отынды бүрку бұрышы  $10^\circ$ -қа тең болды. Сұйық отынды бүрку жылдамдығы 350 м/с құрайды.



4 сурет – Жану камерасының геометриясы

Берілген жұмыста жану камерасындағы октан мен додеканның бүрку және дисперсия процестеріне қысым мен бүрку массаларының әсері бойынша зерттеулер жүргізілді. Екі сұйық отын түрі – октан және додеканның жану процесінің әр түрлі параметрлеріне қысымның әсері зерттелінді. Есептеу тәжірибесін жүргізу үшін октан  $C_8H_{18}$  және додекан  $C_{12}H_{26}$  үшін қысымның мәндері 20 бар-дан 200 барға дейін 20 бар интервалмен өзгерсе, ал есептеулерде отын массалары 4 мг-нан 20 мг-ға дейінгі аралықта ауысып отырды.

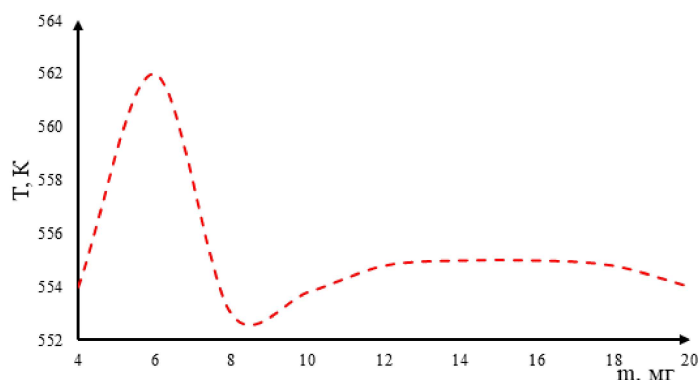
Модельдік камерадағы максимал жану температурасының газ қысымына тікелей тәуелді өзгерісін 5 суреттен байқауға болады. Қос көмірсутекті сұйық отынның (октан және додекан) температурасының таралу қисықтарын талдаудың нәтижесінде мынадай тұжырым жасалды: октанның жану температурасы қысым артқан сайын монотонды өсетін болса, додекан температура шыңына 80 бар қысым мәнінде жетеді, мұндағы ең жоғарғы температура 1954,98 К көрсеткішті құрайды. Октанның максимал жану температурасы 1948,79 К камерадағы қысымның 100 бар мәнінде орнайды.



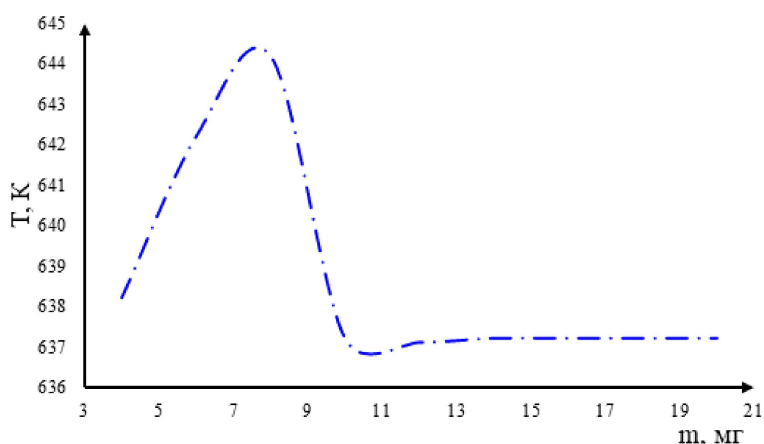
5-сурет – Октан мен додеканның максимал температураларының жану камерасындағы қысымға тәуелділігі

Төменде 6 және 7 суреттерде тамшылардың бастапқы меншікті массаларының олардың бүрку, булану және жану процестеріне әсері компьютерлік модельденген. Суреттерде сұйық отындардың бүрку массаларына қатысты октан мен додекан тамшыларының температураларын камера ішінде таралуы бейнеленген.

6 суреттегі графикті талдау көрсеткендей, бүрку массасының артуы салдарынан октанның температурасы да қоса артып, 6 мг масса мәнінде температураның мәні 562 К құрайды. 7 суреттен көрініп тұрғанындай, додекан үшін 644 К тең температура мәні 7 мг массаға сәйкес келеді.



6-сурет – Октан тамшыларының температурасының сұйық отын массасына қатысты таралуы



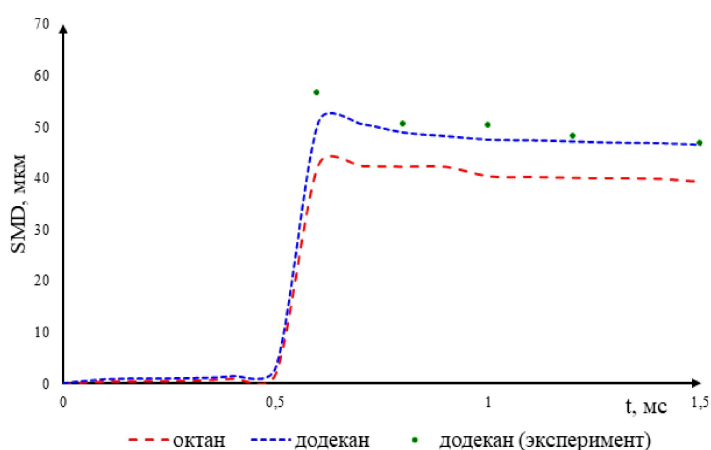
**7-сурет** – Тамшылардың бүрку массасының додеканның меншікті жану температурасына әсері

Сонымен қатар жұмыста инжектордан алыстаған сайын октан мен додекан тамшыларының Саутерлік орташа диаметрлерінің (SMD) уақыттық үлесуінің модельдік, әрі эксперименттік есептеу тәжірибелері ұсынылған. Тамшылардың Саутерлік орташа диаметрі отын-ауалы екіфазалы қоспадағы бөлшектердің өлшемдері бойынша таралуының беттік-көлемдік параметріне жатады. Жүргізілген сандық модельдеу тәжірибелері бірқатар авторлардың еңбектерінен [23] алынған эксперименттік деректермен салыстырылды (8 сурет).

Экспериментте сопло инжекторының шығысынан 10-60 мм аралығындағы әр 10 мм сайынғы

қашықтықтағы додекан бөлшектерінің таралуының ерекшеліктері өлшенген [23]. Аталмыш жұмыста ұқсас зерттеулер соплодан 50 мм қашықтықта октан мен додекан бөлшектерінің уақыттық үлесуі сандық модельдеудің көмегімен жүзеге асырылды.

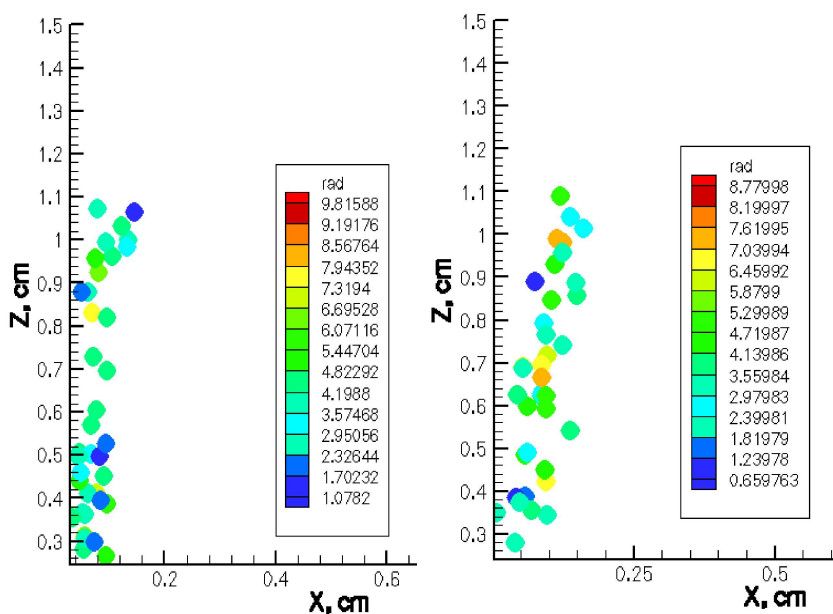
8 суреттен көрініп тұрғанындай, натурлық және компьютерлік тәжірибелер жеткілікті деңгейде жақсы сәйкес келеді. 8 суретте кескінделген қисықтарға салыстырмалы талдау жүргізу арқылы додекан бөлшектерінің сандық және тәжірибелік уақыттық үлесулерінің өзара жақсы үйлесімділікте екендігін анық байқауға болады.



**8-сурет** – Инжектордан 50 мм қашықтықтағы октан мен додекан тамшыларының орташа Саутер диаметрлерінің (SMD) уақыт бойынша таралуын тәжірибемен салыстыру

Қол жеткізілген сандық модельдеу нәтижелерін талдау арқылы октан үшін тиімді қысым мәні 100 бар және додекан үшін 80 бар, ал тиімді масса мәні октан үшін 6 мг-ға, ал додекан үшін 7 мг-ға тең деген қорытынды жасауға болады.

9 суреттен қысым мен массаның тиімді мәндеріне сәйкес белгілі уақыт мезеттеріндегі жану камерасының кеңістігіндегі октан және додекан сұйық бөлшектерінің радиусы бойынша үлесулерін көруге болады.



а) октан б) додекан

9-сурет –  $t=1,8$  мс уақыт мезетіндегі октан және додекан тамшыларының радиусы бойынша дисперсиясы

Сандық тәжірибенің бастапқы тұсында екіфазалы қоспа монодисперсті болғандықтан тамшылар бірдей өлшемде таралғанымен тұтану, булану және жану процестерінің әсерінің салдарынан өзара соқтығысып, әрі импульс алмасуының нәтижесінде бірігіп немесе ұсақ тамшыларға жіктелуі себебінен бөлшектердің меншікті өлшемдері (радиусы) өзгеріске ұшырай бастайды.

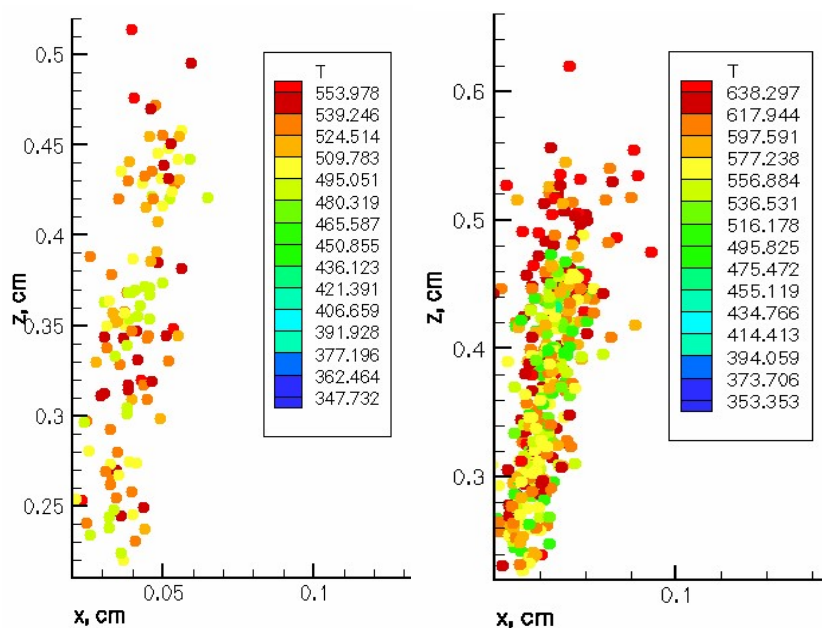
Октан тамшыларының ең үлкен меншікті радиусының өлшемі 9,8 микронға тең болса, додекан тамшылары 8,8 микронға дейін ұлғая түседі. Жоғарыдағы 9 суретті әрі қарай талдауды жалғастыра отырып, өлшемдері үлкен бөлшектердің тығыздығының аздығын және камераның жалпы кеңістігінен өзге көлеміндегі тамшылардың орташа массалық үлесі 2-ден 6 микронға дейін сиретілетіндігіне көз жеткізе аламыз. Додекан тамшылары жану процесінің барысында камераның 1,4 см биіктігіне және көлденең бағытта 0,25 см ені бойымен алыс

қашықтықтарға таралып кететіндігі айқын көрініп тұр. Бұл кезекте октан бөлшектері керісінше қысқа қашықтықта камераның 1,1 см биіктігі мен 0,2 см ені арылығындағы аймақта шоғырланады (9 сурет).

4 мс уақыт мезетіндегі октан және додекан тамшыларының меншікті температурасына қатысты тығыздығының үлесуі 10 суретте бейнеленген.

Камераның төменгі тұсында октан бөлшектері 348 К, ал додекан тамшылары 353 К температураны қамти отырып, жану аймағының ауданына бірте-бірте бойлай түседі. Жану процесінің  $t=4$  мс мезетінде октан бөлшектерінің меншікті температурасының ең жоғарғы шамасы 554 К-ге жетсе, осы мезеттегі додекан тамшыларының температурасының шекті мәні 638 К-ді теңгереді. Осы тұжырымнан октанмен салыстырғанда додекан бөлшектерінің меншікті температурасының дисперсиясы едәуір жоғары болатындығына көз жеткіземіз.





а) октан ә) додекан

10-сурет –  $t=4$  мс уақыт мезетіндегі октан және додекан тамшыларының меншікті температурасы бойынша дисперсиясы

### Қорытынды

Бұл жұмыста цилиндрлік жану камерасындағы қысым мен массаның әр түрлі мәндерінің екі түрлі сұйық отындардың (октан және додекан) тұтану, жану және булану процестеріне әсері компьютерлік модельденді.

Жұмыста жану камерасына бүркілетін сұйық отындардың жіктелуі, дисперсиясы, булану және жану процестерін сипаттайтын мәселенің математикалық және геометриялық модельдері тұрғызылды.

Жүргізілген есептеу тәжірибелерінің нәтижесінде төмендегідей қорытынды жасауға болады. Жүргізілген есептеу тәжірибелерінің нәтижелерін талдау арқылы октан үшін тиімді қысым мәні 100 бар және додекан үшін 80 бар, ал тиімді масса мәні октан үшін 6 мг-ға, ал додекан үшін 7 мг-ға тең деген қорытынды жасауға болады.

Берілген қысым мен масса мәндерінде тамшылардың өз температурасы мен жану камерасындағы жану температурасы максимал мәндеріне жетеді. Қысымның аталған мәндерінде отын тамшылары қарқынды түрде булана бастайды. Сонымен қатар жану камерасындағы қысымның сұйық отындарды бүрку және олардың дисперсиясы процестеріне әсерін зерттеу арқылы екі отын түрі үшін қысымның өсуі жоғары температуралардың таралу облысының өсуіне алып келетіндігі дәлелденді. Бүрку массасының тиімді қысым мәндеріне сәйкес әрі қарай артуы октан және додекан үшін жану процесін нашарлатып, температураның кезекті төмендеуіне алып келеді.

Жұмыста жүргізілген зерттеулер Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғарғы білім министрлігінің қаржылай қолдауымен №AP19679741 жүзеге асырылды.

### Әдебиеттер

- 1 Askarova A, Georgiev A, Beketayeva M Computational modeling of pollutants in furnaces of pulverized coal boilers of the republic of Kazakhstan. Energy 2022;258:24826. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124826>
- 2 Bolegenova S, Askarova A, Slavinskaya N, 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>

- 3 Berezovskaya I, Tasmukhanova A, et al. Investigation of the influence of liquid fuel injection rate on the combustion process using KIVA-II software. Eurasian Physical Technical Journal 2023;20:43-51.  
<https://doi.org/10.31489/2023No3/43-51>
- 4 Zhang H, Sun W, Guo L, et al. An experimental study of using coal to liquid (CTL) and diesel as pilot fuels for gasoline dual-fuel combustion. Fuel 2021;289:119962.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119962>
- 5 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.
- 6 Sugirbekova A, Berezovskaya I, Tuyakbayev A, et al. Investigation of various types of liquid fuel atomization and combustion processes at high turbulence. Journal of Engineering and Applied Science 2018;13:4054-4064.
- 7 Askarova A, Beketayeva M, Bolegenova S, et al. Control harmful emissions concentration into the atmosphere of megacities of Kazakhstan Republic. IERI Procedia 2014;10:252-258.  
<https://doi.org/10.1016/j.ieri.2014.09.085>
- 8 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>
- 9 Bolegenova S, Aldiyarova A, Ungarova N, 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>
- 10 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>
- 11 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.
- 12 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.
- 13 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>
- 14 Slavinskaya N, Aldiyarova A, Zhagaparov A, 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>
- 15 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>
- 16 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>
- 17 Beketayeva MT, Pilipenko NV, Baktybekov KS, Syzdykov AB, et al. Investigation of the different Reynolds numbers influence on the atomization and combustion processes of liquid fuel. Bulgarian Chemical Communications 2018;50: 68-77.
- 18 Bolegenova S, Askarova A, Georgiev A, et al. The use of plasma technologies to optimize fuel combustion processes and reduce emissions of harmful substances. Energy 2023;277: 127635.  
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127635>
- 19 Safarik P, Nugymanova A, Ospanova Sh, et al. Study of the aerodynamics of the flow of the combustion chamber of a power plant with various supply of solid fuel. Recent contributions to Physics 2022;83:49-57.  
<https://doi.org/10.26577/RCPH.2022.v83.i4.06>
- 20 Messerle V, Ustimenko A, Karpenko E, Loktionova, et al. Optimization of the combustion of power station coals using plasma technologies. Thermal Engineering 2004;51:488-493.
- 21 Safarik P, Nugymanova A, Ospanova Sh, et al. Study of the aerodynamics of the flow of the combustion chamber of a power plant with various supply of solid fuel. Recent contributions to Physics 2022;83:49-57.  
<https://doi.org/10.26577/RCPH.2022.v83.i4.06>
- 22 Amsden AA, O'Rourke PJ, Butler TD KIVA-II: A computer program for chemically reactive flows with sprays. Los Alamos, 1989, 160 p.
- 23 Arcoumanis C, Cutter P, Whitelaw DS Heat transfer processes in diesel engines. Institution of Chemical Engineer Trans IChemE 1998;76:124-132.

**Авторлар туралы мәлімет:**

*Болегенова Салтанат Алихановна – физика-математика ғылымдарының докторы, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ жылуфизика және техникалық физика кафедрасының профессоры (Алматы қ-сы, Қазақстан, эл.почта: Saltanat.Bolegenova@kaznu.edu.kz);*

*Аскарлова Алия Сандыбаевна – физика-математика ғылымдарының докторы, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ жылуфизика және техникалық физика кафедрасының профессоры (Алматы қ-сы, Қазақстан, эл.почта: Aliya.Askarova@kaznu.edu.kz);*

*Оспанова Шынар Сабитовна (корреспонденция авторы) – PhD, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ жылуфизика және техникалық физика кафедрасының аға оқытушысы (Алматы қ-сы, Қазақстан, эл.почта: Shynar.Ospanova@kaznu.edu.kz);*

Нурмуханова Альфия Зейнулловна – техника ғылымдарының кандидаты, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ жылуфизика және техникалық физика кафедрасының аға оқытушысы (Алматы қ-сы, Қазақстан, эл.почта: alfya.nurmukhanova777@gmail.com);

Адилбаев Нуркен Амидоллаевич – әл-Фараби атындағы ҚазҰУ «8D07106-Жылуэнергетикасы» білім беру бағдарламасының 1 курс докторанты (Алматы қ-сы, Қазақстан, эл.почта: adilbayev\_nurken2@live.kaznu.kz);

Маканова Аяулым Болаткановна – әл-Фараби атындағы ҚазҰУ «7M05305-Техникалық физика (АТМО)» білім беру бағдарламасының 1 курс магистранты (Алматы қ-сы, Қазақстан, эл.почта: aiko.20.20@mail.ru);

Жумагалиева Сабина Ауданбайқызы – әл-Фараби атындағы ҚазҰУ «7M05305-Техникалық физика (АТМО)» білім беру бағдарламасының 1 курс магистранты (Алматы қ-сы, Қазақстан, эл.почта: zhumasabina@icloud.com);

Шалқар Ақжол – әл-Фараби атындағы ҚазҰУ «7M05305-Техникалық физика (АТМО)» білім беру бағдарламасының 2 курс магистранты (Алматы қ-сы, Қазақстан, эл.почта: Shalkar.akzhol@gmail.com);

#### **Сведения об авторах:**

Болегенова Салтанат Алихановна – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теплофизики и технической физики КазНУ им. аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан, эл.почта: Saltanat.Bolegenova@kaznu.edu.kz);

Аскарова Алия Сандыбаевна – доктор физико-математических наук, профессор кафедры теплофизики и технической физики КазНУ им. аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан, эл.почта: Aliya.Askarova@kaznu.edu.kz);

Оспанова Шынар Сабитовна (корреспондентный автор) – PhD, старший преподаватель кафедры теплофизики и технической физики КазНУ им. аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан, эл.почта: Shynar.Ospanova@kaznu.edu.kz);

Нурмуханова Альфия Зейнулловна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теплофизики и технической физики КазНУ им. аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан, эл.почта: alfya.nurmukhanova777@gmail.com);

Адилбаев Нуркен Амидоллаевич – докторант 1 курса образовательной программы «8D07106-Теплоэнергетика» КазНУ им. аль-Фараби (г. Алматы, Казахстан, эл.почта: adilbayev\_nurken2@live.kaznu.kz);

Маканова Аяулым Болаткановна – магистрантка 1 курса образовательной программы «7M05305-Техническая физика (ИТМО)» (г. Алматы, Казахстан, эл.почта: aiko.20.20@mail.ru);

Жумагалиева Сабина Ауданбайқызы – магистрантка 1 курса образовательной программы «7M05305-Техническая физика (ИТМО)» (г. Алматы, Казахстан, эл.почта: zhumasabina@icloud.com);

Шалқар Ақжол – магистрант 2 курса образовательной программы «7M05305-Техническая физика (ИТМО)» (г. Алматы, Казахстан, эл.почта: Shalkar.akzhol@gmail.com);

#### **Information about authors:**

Bolegenova Saltanat – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Thermophysics and Technical Physics of al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: Saltanat.Bolegenova@kaznu.edu.kz);

Askarova Aliya – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Thermophysics and Technical Physics of al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: Aliya.Askarova@kaznu.edu.kz);

Ospanova Shynar (corresponding author) – PhD, Senior Lecturer of the Department of Thermophysics and Technical Physics of al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: Shynar.Ospanova@kaznu.edu.kz);

Nurmukhanova Alfya – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Thermophysics and Technical Physics of al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: alfya.nurmukhanova777@gmail.com);

Adilbayev Nurken – 1st year doctoral student of the educational program «8D07106-Thermal Power Engineering» of al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan, e-mail: adilbayev\_nurken2@live.kaznu.kz);

Makanova Ayaulym – 1st year master student of the educational program «7M05305-Technical Physics (ITMO)» (Almaty, Kazakhstan, e-mail: aiko.20.20@mail.ru);

Zhumagaliyeva Sabina – 1st year master student of the educational program «7M05305-Technical Physics (ITMO)» (Almaty, Kazakhstan, e-mail: zhumasabina@icloud.com);

Shalkar Akzhol – 2nd year master student of the educational program «7M05305-Technical Physics (ITMO)» (Almaty, Kazakhstan, e-mail: Shalkar.akzhol@gmail.com);

2 мамыр 2024 қарастырылуға жіберілді  
30 мамыр 2024 қабылданды