

МРНТИ 28.17.23

А.С. Аскарова¹ , С.А. Болегенова¹ , Ш.С. Оспанова¹ , А.С. Саркытов¹ , А.М.Ордаханова¹ 

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, 050040, Алматы, Казахстан
e-mail: Saltanat.Bolegenova@kaznu.kz

СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУКТУР С УЧЕТОМ ДИСПЕРСИИ КАПЕЛЬ

Аннотация. Методы математического и численного моделирования реагирующих открытых сред при наличии горения широко используются в различных областях теплофизики, технической физики и теплоэнергетики. Благодаря оптимизации вычислительных ресурсов, требуемой степени точности и качества получаемых результатов и легким манипуляциям по адаптации программы к поставленной задаче стало возможным моделирование сложных диссипативных структур, образующихся в открытой системе, без больших вычислительных затрат. В этой связи получили распространение методы компьютерного моделирования эволюции открытых систем посредством оптимизации этапов симуляции виртуального прототипа.

Такие случайные процессы, как столкновение множества капель, турбулентные диссипативные структуры, изменения в кавитационном потоке внутри инжектора и т.д. способствуют процессу распада жидких нитей на капли, которые взаимодействуют с покоящейся газовой средой. Тогда возникает вопрос о том, имеет ли значение вероятность распределения капель по размерам, когда градиент температуры превышает некоторое критическое значение и в жидкости возникает упорядоченное макроскопическое движение, которое называется конвективным. Из-за сложности такого явления является трудным определение четко доминирующих механизмов распыла в соответствии с характерным размером капель. В таких течениях возникают неравновесные фазовые переходы, которые выражаются в образовании новых диссипативных структур. В диссипативных структурах возможен приток энергии, компенсирующий потери за счет диссипации и обеспечивающий существование более упорядоченных состояний. Благодаря потоку движущейся в камере сгорания жидкости, состоящей из большого числа капель, возможны коллективные - синергетические взаимодействия, необходимые для перестройки системы. Таким образом, моделирование процессов распада, дисперсии и испарения капель жидкого топлива при различных начальных условиях является актуальной задачей проблем эволюции открытых систем. В этой связи в данной работе диссипативные структуры описываются нелинейным уравнением Фоккера-Планка, которое выражает временную и пространственную эволюцию частиц по радиусам в приближении к размеру материнской капли. Также в работе дискретная модель А.Н. Колмогорова была преобразована в форму эволюционного уравнения функции распределения. Асимптотическое решение этого уравнения применяется при моделировании распада и дисперсии частиц наряду с моделью Лагранжа, которая применяется для описания динамики распыла. В работе представлены данные компьютерных экспериментов по определению оптимальных условий (скорость впрыска) для горения изооктана, основанные на статистической модели эволюции частиц. В результате выполненных компьютерных экспериментов получены распределение температуры, продуктов сгорания и паров топлива по высоте камеры сгорания. На основании этих численных данных определены оптимальные параметры процесса распыла и дисперсии изооктана.

Ключевые слова: дисперсия, распыл, изооктан, статистическая модель, камера сгорания.

А.С. Аскарова¹, С.А. Болегенова¹, Ш.С. Оспанова¹, А.С. Саркытов¹, А.М. Ордаханова¹

¹Әл-Фараби атындағы қазақ ұлттық университеті, 050040, Алматы, Қазақстан
e-mail: Saltanat.Bolegenova@kaznu.kz

ТАМШЫЛАРДЫҢ ДИСПЕРСИЯСЫН ЕСКЕРГЕНДЕГІ ТУРБУЛЕНТТІ ҚҰРЫЛЫМДАРДЫҢ ТҮЗІЛУІН МОДЕЛЬДЕУ

Аннотация. Жану болғандағы ашық әсерлесуші орталарды математикалық және сандық модельдеу әдістері жылуфизика, техникалық физика және жылуэнергетиканың түрі облыстарында қолданылады. Есептеуіш ресурстардың жетілгендігі, қажетті дәлдік деңгейі мен алынатын нәтижелердің сапасына қарай және бағдарламаны қойылған мәселеге оңай бейімдеу мүмкіндігіне сәйкес үлкен есептеу шығынын жұмсамай-ақ, күрделі диссипативті құрылымдарды модельдеу

мүмкін болды. Осы тұрғыда виртуалды прототипті симуляциялау сатысын жетілдіру арқылы ашық жүйелердің эволюциясын компьютерлік модельдеу әдістері кең тарады.

Көптеген тамшылардың соқтығысуы, турбулентті диссипативті құрылымдар, инжектор ішіндегі кавитациялық ағындағы өзгерістер және т.б. сияқты кездейсоқ процестер тыныштықтағы газ ортасымен әрекеттесетін сұйық жіпшелердің тамшыларға жіктелу процесіне түрткі болады. Сонда температураның градиенті белгілі бір критикалық мәннен асып түскенде және сұйық ішінде реттелген макроскопиялық қозғалыс туындағанда тамшылардың өлшемдері бойынша үлесуінің мағынасы болады ма деген сұрақ туындайды. Осындай құбылыстың күрделілігінің салдарынан тамшылардың сипаттық өлшеміне сәйкес келетін бұрқудің басым болатын механизмдерін ажыратып айту қиынға соғады. Мұндай ағыстарда тепе-тең емес фазалық ауысулар жүзеге асады, соңғылары жаңа диссипативті құрылымдардың түзілуімен түсіндіріледі. Диссипативті құрылымдарда шығынды диссипацияның есебінен толтыратын және анағұрлым ретті күйлердің болуын қамтамасыз ететін энергия ағыны болуы мүмкін. Жану камерасында қозғалатын тамшылардың орасан үлкен санынан тұратын сұйықтың есебінен ұжымдық – синергетикалық өзара әсерлесулер орын алады. Осылайша әр түрлі бастапқы шарттарда сұйық отын тамшыларының жіктелу, дисперсиясы мен булану процестерін модельдеу ашық жүйелер эволюциясы мәселелерінің өзекті міндеті болмақ. Берілген жұмыста диссипативті құрылымдар бейсызық Фоккер-Планк теңдеуімен сипатталады, соңғысы аналық бөлшекке жуықталған күйде тамшылардың уақыттық және кеңістіктік эволюциясын білдіреді. Жұмыста сонымен қатар А.Н. Колмогоровтың дискретті моделі таралу функциясының эволюциялық теңдеуіне түрлендірілді. Аталған теңдеудің асимптотикалық шешімі Лагранж моделімен қатар бөлшектердің жіктелуі мен дисперсиясын модельдеуде қолданылады. Жұмыста бөлшектердің эволюциясының статистикалық моделі негізінде изооктаннның жануы үшін тиімді шарттарды (бұрку жылдамдығы) анықтау бойынша компьютерлік тәжірибелер келтірілген. Жүргізілген компьютерлік тәжірибелердің нәтижесінде температураның, жану өнімдері мен отын буының камера биіктігі бойымен таралуы алынды. Аталған сандық мәліметтерге жүгіне отырып, изооктаннның бұрку және дисперсия процестерінің тиімді параметрлері анықталды.

Түйінді сөздер: дисперсия, бұрку, изооктан, статистикалық модель, жану камерасы.

A.S. Askarova¹, S.A. Bolegenova¹, Sh.S. Ospanova¹, A.S. Sarkytov¹, A.M. Ordakhanova

¹*Al-Farabi kazakh national university, 050040, Almaty, Kazakhstan*

e-mail: Saltanat.Bolegenova@kaznu.kz

STATISTICAL MODELING OF THE TURBULENT STRUCTURES FORMATION IN THE LIGHT OF THE DROP DISPERSION

Аннотация. Methods of mathematical and numerical modeling of reacting open media in the presence of combustion are widely used in various fields of thermal physics, technical physics, and heat power engineering. Owing to the optimization of computing resources, the required degree of accuracy and quality of the results obtained, and easy manipulations to adapt the program to the task at hand, it became possible to model complex dissipative structures without large computational costs. In this regard, methods of computer modeling of the evolution of open systems have become widespread through the optimization of the stages of simulation of a virtual prototype.

Such random processes as collision of many drops, turbulent dissipative structures, changes in the cavitation flow inside the injector, etc. promote the process of disintegration of liquid filaments into droplets that interact with a resting gas medium. Then the question arises whether the probability of droplet size distribution matters when the temperature gradient exceeds a certain critical value and an ordered macroscopic motion, which is called convective, arises in the liquid. Because of the complexity of this phenomenon, it is difficult to identify clearly dominant spray mechanisms according to the characteristic droplet size. In such flows, nonequilibrium phase transitions appear, which are expressed in the formation of new dissipative structures. In dissipative structures, an inflow of energy is possible, which compensates for losses due to dissipation and ensures the existence of more ordered states. Due to the flow of a liquid moving in the combustion chamber, consisting of a large number of drops, collective as synergistic interactions are possible, which are necessary for restructuring the system. Thus, modeling the processes of breakup, dispersion, and evaporation of liquid fuel droplets under various initial conditions is an urgent problem in the evolution of open systems. In this regard, in this work, dissipative structures are described by the nonlinear Fokker-Planck equation, which expresses the temporal and spatial evolution of particles along the radii in approximation to the size of the parent droplet. Also in the work is the discrete model of A.N. Kolmogorov was transformed into the evolutionary equation of the distribution function. The asymptotic solution of this equation is used to simulate the breakup and dispersion of particles, along with the Lagrange model, which is used to describe the dynamics of the spray. The paper presents the data of computer experiments to determine the optimal conditions (injection rate) for the combustion of iso-octane, based on a statistical model of particle evolution. As a result of the performed computer experi-

ments, the distribution of temperature, combustion products and fuel vapors along the height of the combustion chamber was obtained. Based on these numerical data, the optimal parameters of the atomization and dispersion processes of isooctane were determined.

Keywords: dispersion, atomization, isooctane, statistical model, combustion chamber.

Введение

Невзирая на то, что в нынешнее время прилагаются огромные усилия для освоения и использования альтернативных видов источников энергии, от ископаемых видов топлива получают до 85% всей потребляемой в мире энергии. Согласно статистике, от сжигания жидких топлив получают до 39% энергии общего потребления, в том числе на транспортный сектор приходится до 97% энергии от общего производства. На данном этапе особое внимание уделяется эффективности тепловых устройств, работающих на основе сжигания жидких углеводородных топлив, и минимизации их негативного воздействия на окружающую среду. В этой связи многие страны Европы и Азии начинают ужесточать требования к качеству энергетических топлив с позиции их экологической безвредности [1-5].

Согласно прогнозу Международного энергетического агентства объем мирового потребления нефти будет увеличиваться [6-9]. Посему для купирования генерации парниковых газов существует необходимость проектировки усовершенствованных комплексов преобразования энергии, которые являются наиболее эффективными и имеют низкий уровень вредных выхлопных газов. Данный факт в особенности относится к производству диоксида углерода (CO_2), огромное количество которого выделяется вследствие деятельности воздушного транспорта, последнее в свою очередь отражается на излишнем ухудшении озонового слоя стратосферы.

Ввиду возросших требований к эффективности деятельности различных технических устройств, современных экологических притязаний по охране окружающей среды и точности предсказания воспламенения появляется необходимость тщательного исследования физико-технологических процессов сопряженных с горением жидких углеводородных топлив. Результаты фундаментальных исследований физико-химических процессов горения составляют основу эффективной работы различных тех-

нических устройств, в том числе двигателей внутреннего сгорания, которые заметно базируются на циклах Отто и Дизеля.

Динамические и тепловые взаимодействия компонентов реакции, фазовые превращения в условиях высокоинтенсивного теплообмена, а также влияния термодинамического состояния системы и ее структурных параметров на характеристики процесса детерминируют пласт своеобразных особенностей горения жидких топлив.

Проблемы фундаментального исследования закономерностей тепловых процессов, протекающих в реагирующих средах при сжигании различных видов жидких топлив, требуют пространного изучения основ горения.

Благодаря достигнутому высокому уровню исследований складывается картина будущего масштабного применения методологии и существенных физических результатов, а также способы наиболее продуктивного использования средств математического моделирования посредством современной вычислительной аппаратуры в различных предметных сферах.

Методы. Математическая постановка задачи

Все физико-химические процессы, происходящие в тепловых устройствах, деятельность которых основывается на сжигании топлива, носят турбулентный характер. Генерирующиеся в потоке мелкие и крупномасштабные структуры при циркуляции течения чрезмерно влияют на такие составляющие, как перенос импульса, температуры и концентрации компонентов в смеси. Используемая в работе математическая модель, описывающая фундаментальные процессы горения жидких топлив, состоит из уравнений неразрывности (массы), количества движения (импульса), энергии и концентрации компонентов реакции [10-13].

Уравнение неразрывности в представленной модели имеет следующий вид [10, 11]:

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

где \vec{u} - скорость потока жидкого топлива. Источниковый член S_{mass} обозначает местное преобразование плотности газовой фазы за счет испарения или конденсации, если рассматриваемая смесь является системой «газ-жидкость». При однофазном течении источниковый член S_{mass} равен нулю.

Уравнение количества движения газовой фазы имеет следующий вид [12]:

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

При гомогенном течении, где присутствует однофазный поток, источниковый член равен нулю $S_{mom} = 0$. В данном случае S_{mom} обозначает местное приращение импульса газовой среды благодаря движению капелек, так как течение является двухфазным.

Уравнение внутренней энергии потока записывается следующим образом [13]:

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

где q - удельный поток тепла, обусловленный переносом тепла по закону Фурье, соотношение $\vec{\tau} : \vec{D}$ показывает прирост внутреннего потенциала вследствие вязкой диссипации кинетической энергии турбулентности. Ввиду присутствия впрыскиваемых капелек жидкости источниковый член S_{energy} вносит объемный вклад в превращение внутренней энергии системы (работа силы S_{mom}).

В данной работе для описания распыла и дисперсии капелек жидкого топлива была использована идея каскадного распада капелек, которая была предложена А.Н. Колмогоровым [14-18]. Суть данной теории заключается в том, что вероятность распада каждой материнской частицы на определенное случайное число частиц не зависит от размера первоначальной частицы, следовательно, такое распределение частиц носит логнормальный характер и носит название статистической модели. Данная модель наряду с моделью Лагранжа применяется в моделировании динамики распыла, распада и дисперсии капелек [19].

При высокой турбулентности мгновенное значение Колмогоровского масштаба длины крупномасштабных вихрей намного меньше размера частиц, отсюда следует, что полный спектр турбулентной кинетической энергии способствует растяжению и распаду капелек. Критический радиус капелек определяется из баланса деструктивных гидродинамических и капиллярных сил [20]:

$$r_{cr} = \left(\frac{9 We_{cr} \sigma V_{lam}}{2 \varepsilon \rho_l} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

где V_{lam} - кинематическая вязкость, ρ_l - плотность капли и ε - скорость вязкой диссипации. При движении частицы в турбулентном потоке газа с крупномасштабными структурами, размеры которых намного больше диаметра частицы, относительная скорость между частицей и потоком газа определяется следующим образом [21]:

$$\frac{d\vec{v}_p}{dt} = \frac{(\vec{v}_g - \vec{v}_p) |\vec{v}_g - \vec{v}_p|}{\tau_{St}}, \quad (5)$$

где $\tau_{St} = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \rho_g \nu_g}$. Когда размер частицы больше Колмогоровского масштаба турбулентная вязкость определяется через спектр энергии вихрей с меньшими размерами по сравнению с диаметром самой частицы. На рисунке 1 представлена иллюстрация этого явления.

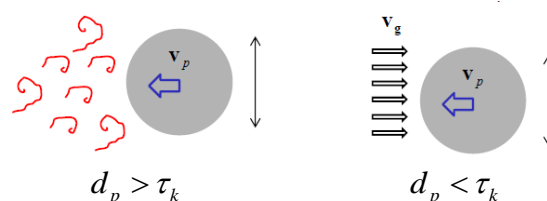


Рисунок 1 - Сравнение размеров частицы с масштабами турбулентных структур

Наиболее интересные свойства открытой системы выявляются при нелинейных процессах, когда в ней возможно осуществление термодинамически устойчивых неравновесных, в частном случае стационарных состояний, далёких от состояния термодинамического равновесия и характеризующихся определённой пространственной или временной упорядоченностью, которую называют диссипативной. Нелинейные про-

цессы в такой системе и возможность образования диссипативных структур исследуют на основе уравнений химической кинетики: баланса скоростей химических реакций в системе со скоростями подачи реагирующих веществ и отвода продуктов сгорания. Накопление активных продуктов сгорания или теплоты может привести к самоподдерживающемуся режиму реакций. Для этого необходимо, чтобы в системе реализовалась положительная обратная связь: ускорение реакции под воздействием либо её продукта, либо теплоты, выделяющейся при реакции.

В данной работе компьютерный пакет программ KIVA-II был оптимизирован для моделирования химической кинетики процессов распыла и горения в двигателях внутреннего сгорания. Данный пакет программ был адаптирован к поставленной задаче о сжигании жидких топлив в камерах сгорания при высокой турбулентности. Это позволило рассчитать аэродинамику течения, тепловые и концентрационные характеристики, пары топлива по всему пространству камеры сгорания.

Прототип камеры двигателя внутреннего сгорания, построенный посредством виртуального симулятора, имеет форму цилиндра с высотой 15 см и диаметром 4 см. На рисунке 2 представлен каркасный вид данной камеры.

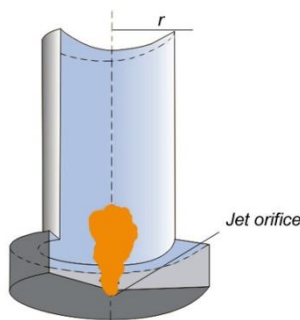


Рисунок 2 – Общий вид камеры сгорания

Для симуляции процессов в данной камере использовалась расчетная сетка, состоящая из 650 ячеек. Капли жидкого топлива впрыскиваются в камеру сгорания с помощью сопла форсунки, которая располагается в нижней части цилиндра. Начальное значение температуры газа в камере сгорания составило 900 К. Жидкость подводится в камеру при давлении 80 бар. Скорость инжекции равна 250 м/с. В качестве жидкого

топлива использовался изооктан, который является эталонным техническим топливом и применяется в авиационных двигателях в целях повышения детонационной стойкости.

Результаты моделирования

В работе приведены результаты вычислительных экспериментов по изучению влияния скорости впрысков жидкого топлива на процессы дисперсии и горения. В работе [22] авторами были проведены аналогичные исследования с применением численного моделирования при высокой турбулентности, где были определены оптимальные значения давления и массы для изооктана. Так, для изооктана в начальный момент времени значения давления и массы составили 100 бар и 6 мг. В настоящей статье все вычисления проводились при оптимальных значениях давления и массы, которые были взяты из работ вышеупомянутых авторов. Скорость впрыска изооктана менялась от 150 до 350 м/с. Все вычисления проводились при оптимальных значениях давления и массы впрыска жидких топлив.

Процесс сжигания жидких топлив состоит из следующих фаз: зажигание, воспламенение паровоздушной смеси на границе раздела фаз, увеличение скорости испарения за счет выделения тепла от ядра пламени. Поэтому наиболее эффективной скоростью впрыска капля изооктана является 300 м/с, так как при данной скорости температура в камере сгорания принимает сравнительно максимальное значение и капли изооктана интенсивно перемешиваются (рисунок 3).

Из рисунка 3 видно, что для изооктана температура горения монотонно увеличивается и достигает своего максимума (1726 К) при скорости впрыска, равной 350 м/с. Температура горения изооктана, соответствующая наиболее оптимальной скорости впрыска (300 м/с), составила 1712 К.

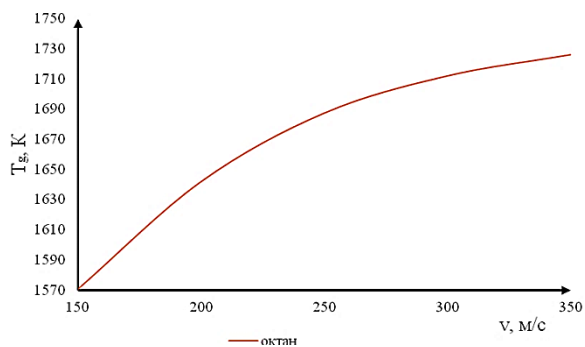


Рисунок 3 - Зависимость максимальной температуры в камере сгорания от скорости впрыскиваемых капель изооктана

При воспламенении смеси паров топлива и окислителя факел охватывает пространство камеры сгорания по ширине. Вследствие данного процесса выделяется углекислый газ CO_2 , который является одним из продуктов сгорания углеводородных жидких топлив. Таким образом, изменение концентрации CO_2 в зависимости от скорости инъекции изооктана представлено на рисунке 4. При наименьшей скорости изооктана (150 м/с) выделяется минимальное количество диоксида углерода (0,0760 г/г). При горении изооктана с увеличением скорости впрыскиваемых капель концентрация углекислого газа растет. При скорости 300 м/с концентрация диоксида углерода составила 0,0839 г/г, максимальная концентрация углекислого газа (0,0846 г/г) выделяется при скорости 350 м/с.

При данной скорости топливо сгорает без остатка, температура по оси камеры сгорания достигает наивысших значений, соответственно, концентрация продуктов сгорания (углекислый газ) низкая и не превышает допустимого предела.

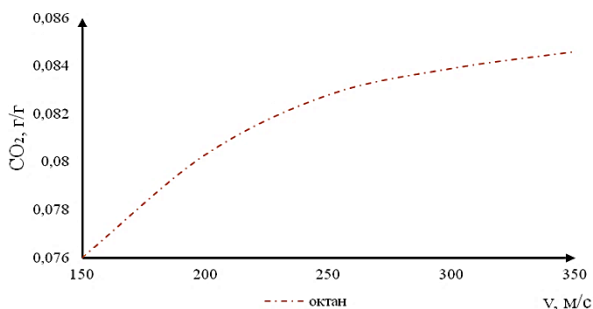


Рисунок 4 - Зависимость концентрации углекислого газа от скорости впрыскиваемых капель изооктана

Далее на рисунках 5-8 приведены результаты компьютерного моделирования по горению впрысков жидкого топлива при оптимальных значениях скорости впрыска.

На рисунке 5 приведены графики распределения капель по температурам в различные моменты времени. Капли жидкого топлива просачиваются вглубь камеры сгорания, в самой нижней части камеры капли изооктана имеют температуру 348 К. Температура капель изооктана в момент времени $t=4$ мс достигает максимального значения, которое составляет 554 К (Рисунок 4 б).

Распределения температуры, концентрации паров топлива и продукта реакции окисления (углекислый газ) в камере сгорания в зависимости от времени при сжигании изооктана представлены на рисунках 6-8. Когда смесь паров топлива с окислителем воспламеняется, то топливо быстро сгорает и почти вся область камеры по ширине охвачена факелом.

Остальная часть камеры разогревается до 921 К (рисунок 6 а) при горении изооктана. Ядро факела при сжигании изооктана занимает 2 см по высоте, 1 см по ширине, при этом температура достигает 1726 К (рисунок 6 б).

На следующем рисунке 7 можно наблюдать, как меняется концентрация паров изооктана с течением времени: от некоторого значения в момент воспламенения топлива (Рисунок 7 а) до наименьших значений в конечный момент времени (Рисунок 7 б).

Двуокись углерода образуется в центре факела, где наблюдаются высокие температуры и концентрации топлива. Значение концентрации CO_2 лежит в диапазоне от 0,0760 г/г до 0,0846 г/г (рисунок 8 а, б), при этом камера сгорания прогревается от 1570,28 К до 1726,09 К (рисунок 6 а, б)

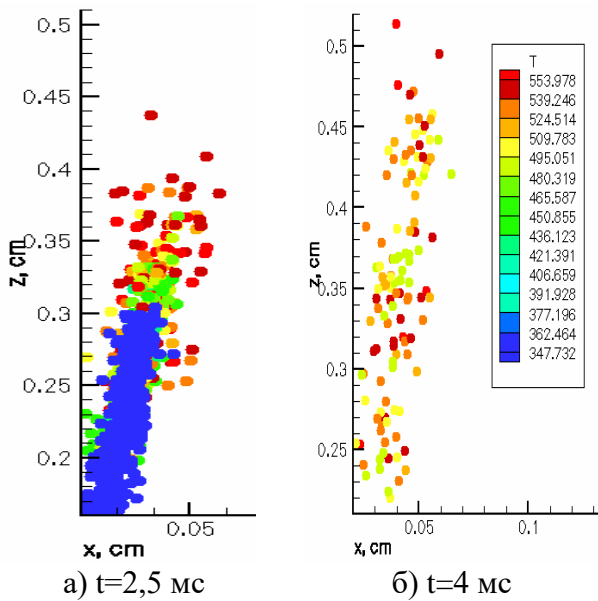


Рисунок 5 - Распределение температуры капель изооктана по высоте камеры сгорания в различные моменты времени

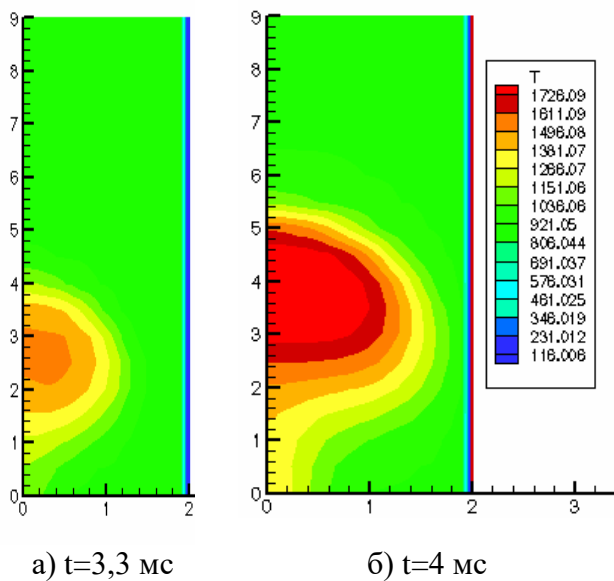


Рисунок 6 - Распределение максимальной температуры в пространстве камеры сгорания при сжигании изооктана

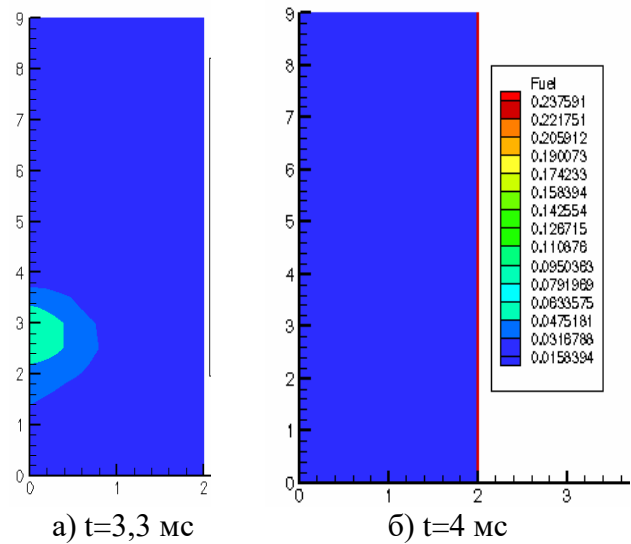


Рисунок 7 - Распределение паров Fuel изооктана в пространстве камеры сгорания в различные моменты времени

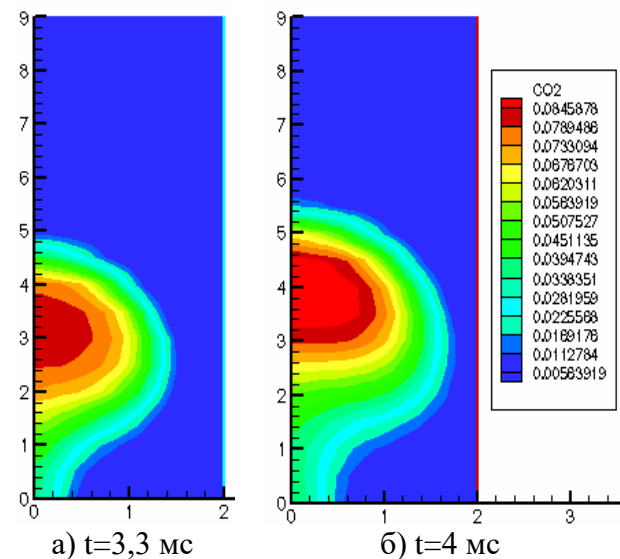


Рисунок 8 – Профиль углекислого газа CO₂ при сжигании изооктана в пространстве камеры сгорания в различные моменты времени

Обсуждение

Таким образом, в настоящей работе проведено численное моделирование процессов горения впрысков жидкого топлива (изооктан). Определено значение оптимальной скорости впрыска данного вида топлива в условиях поставленной задачи. Для изооктана наилучшая скорость впрыска составила 300 м/с. Получены зависимости температуры и концентрации углекислого газа в зави-

симости от скорости впрыскиваемого топлива для изооктана.

По результатам исследования, можно сделать вывод о том, что оптимальная начальная скорость капель изооктана равна 300 м/с. Поскольку скорости 300 м/с камера прогревается до высоких температур, концентрация выделяющегося углекислого газа незначительна и не превышает общестандартных норм.

Список литературы

- 1 Beketayeva MT, Bolegenova SA, et al. Computational method for investigation of solid fuel combustion in combustion chambers of a heat power plant. *High Temperature* 2015;53:751-757.
- 2 Askarova AS, et al. Processes of heat and mass transfer in furnace chambers with combustion of thermochemically activated fuel. *Thermophysics and Aeromechanics* 2019;26:925-937.
- 3 Safarik P, Bolegenova S, et al. Optimization of the solid fuel combustion process in combustion chambers in order to reduce harmful emissions. *News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series physico-mathematical* 2019;6:34-42.
- 4 Gabitova Z, Yergaliyeva A, Shortanbayeva Zh. Simulation of the aerodynamics and combustion of a turbulent pulverized-coal flame. *Proceedings of 4th International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry (MCSI 2017)*, 2017; 17668480:92-97.
- 5 Safarik P, Maximov V, Nugymanova A, et al. 3D modeling of heat transfer processes in the combustion chamber of a TPP boiler. *News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan. Series physico-mathematical* 2019;6:5-13.
- 6 Beketayeva M, Gabitova Z, et al. Control harmful emissions concentration into the atmosphere of megacities of Kazakhstan Republic. *IERI Procedia* 2014;10:252-258.
- 7 Askarova A, Shortanbayeva Z, 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;10:349-255.
- 8 Safarik P, Maximov V. Investigation of heat and mass transfer processes in the combustion chamber of industrial power plant boiler. Part 2. *Distribution of concentrations of O₂, CO, CO₂, NO. Journal of Applied and Computational Mechanics* 2018;12:127-138.
- 9 Bolegenova S, Boranbayeva A, et al. Mathematical modeling of heat and mass transfer in the presence of physical chemical processes. *Bulgarian Chemical Communications* 2016;48:272-277.
- 10 Gorokhovski M, Jouanguy J, Chtab-Desportes A. Stochastic model of the near-to-injector spray formation assisted by a high-speed coaxial gas jet. *Fluid Dynamics Research* 2009;41:15.
- 11 Ospanova Sh, Gabitova Z, et al. Using 3D modeling technology for investigation of conventional combustion mode of BKZ-420-140-7C combustion chamber. *Journal of Engineering and Applied Sciences* 2014;9:24-28.
- 12 Arcoumanis C, Gavaises M, Giannadakis E. Modelling of cavitation in diesel injector nozzles *Journal of fluid mechanics* 2008;616:153-193.
- 13 Lalo M, Cartellier A, Gajan P, Strzelecki A Use of faraday instabilities to enhance fuel pulverisation in airblast atomisers. *Comptes Rendus Mecanique* 2009;337:492-503.
- 14 Gorokhovski M The stochastic Lagrangian model of drop breakup in the computation of liquid sprays. *Atomization and Sprays* 2001;1:169-176.
- 15 Lasheras JC, Hopfinger EJ Liquid jet instability and atomization in a coaxial gas stream. *Annual Review of Fluid Mechanics* 2000;32:275-308.
- 16 Gao D, Morley NB, Dhir V Numerical simulation of wavy falling film flow using VOF method. *Journal of Computational Physics* 2003;192:624-642.
- 17 Askarova AS, Bolegenova SA, Beketayeva MT Modeling of heat mass transfer in high-temperature reacting flows with combustion. *High Temperature* 2018;56:738-743.
- 18 Askarova AS, 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.
- 19 Askarova A, Mazhrenova N, et al. 3D modelling of heat and mass transfer processes during the combustion of liquid fuel. *Bulgarian Chemical Communications* 2016;48:229-235.

20 Ospanova ShS, Berezovskaya IE, et.al. Numerical simulation of the oxidant's temperature and influence on the liquid fuel combustion processes at high pressures. *Journal of Engineering and Applied Sciences* 2015;10:90-95.

21 Ospanova Sh, Bolegenova S, 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.

22 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.

Принято в печать 15.02.2021