

## SIMULATION OF THE HARMFUL EMISSIONS FORMATION IN THE EXHAUST GASES OF MARINE DIESEL OF MULTI-FUEL SYSTEMS

**M. N. Pokusaev, A. Y. Grabarchuk, T. V. Khomenko**

Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation

*Currently, the world community is increasingly struggling with harmful effects on the environment, the biosphere and the atmosphere in various fields of industry. One of the pollutants is marine transport. The main type of environmental pollution from marine power plants is harmful emissions of CO, CO<sub>2</sub>, NO sulfur compounds and other components contained in diesel exhaust gases. The main regulatory document determining the compliance of marine power plants with international environmental requirements is the international convention MARPOL 73/78, developed by the International Maritime Organization (IMO). One of the ways to solve this problem is the use of additional components for fuels on ships, such as water, hydrogen, natural gas, biodiesel, dimethyl ether, ethyl alcohol, etc. In order to pre-calculate the effectiveness of any of the methods for reducing harmful emissions, a simulation of combustion processes in a marine diesel engine when running on diesel fuel with and without the addition of dimethyl ether is carried out. In this study, the AVL Fire program, which is included in the AVL software package and allows you to get visual results on the formation of combustion products in the diesel cylinder, the distribution of temperature flows, soot formation, etc., is used. The 3NVD24 marine diesel engine, which is equipped with the necessary measuring complex for conducting practical research with the possibility of experimental confirmation of the computer modeling results, is used as a prototype for the analysis. Based on the model calculations, various factors of the harmful compounds formation during combustion are analyzed.*

*Keywords: nitrogen oxide, fuel combustion modeling, biofuels, dimethyl ether, carbon monoxide, harmful emissions into the atmosphere, fuel combustion.*

**For citation:**

Pokusaev, Mikhail N., Aleksandr Yu. Grabarchuk, and Tatiana V. Khomenko. "Simulation of the harmful emissions formation in the exhaust gases of marine diesel of multi-fuel systems." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 490–500. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-490-500.

**УДК 621.436**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ В ВЫХЛОПНЫХ ГАЗАХ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ МНОГОТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ

**М. Н. Покусаев, А. Ю. Грабарчук, Т. В. Хоменко**

ФГБОУ ВО «АГТУ», г. Астрахань, Российская Федерация

*Темой исследования является актуальный для всего мирового сообщества вопрос борьбы с вредными воздействиями на экологию, биосферу и атмосферу в различных областях промышленности. Отмечается, что одним из загрязнителей является морской транспорт. Основным видом загрязнений окружающей среды со стороны судовых энергетических установок являются вредные выбросы CO, CO<sub>2</sub>, NO сернистые соединения и другие компоненты, содержащиеся в выхлопных газах дизелей. Базовым нормативным документом, определяющих соответствие судовых энергетических установок международным экологическим требованиям, является Международная конвенция МАРПОЛ-73/78, разработанная Международной морской организацией (ИМО). Одним из способов решения данной проблемы явилось применение на судах добавочных компонентов для топлива, таких как вода, водород, природный газ, биодизель, диметиловый эфир, этиловый спирт и др. Для предварительного расчета эффективности какого-либо из способов снижения вредных выбросов было проведено моделирование процессов сгорания в судовом дизельном двигателе при работе на дизельном топливе с добавлением диметилового эфира и без него. В данном исследовании использовалась программа AVL Fire, которая входит в программный комплекс «AVL», позволяя получить наглядные результаты по образованию продуктов сгорания в цилиндре дизеля, распределение температурных потоков, сажеобразование и др.*

*В качестве прототипа для анализа был использован судовый дизель 3NVD24, оборудованный необходимым измерительным комплексом для проведения практических исследований с возможностью экспериментального подтверждения результатов компьютерного моделирования. На основании модельных расчетов проанализированы различные факторы образования вредных соединений во время сгорания.*

*Ключевые слова: оксид азота, моделирование сгорания топлива, биотопливо, диметиловый эфир, оксид углерода, вредные выбросы в атмосферу, сгорание топлива.*

**Для цитирования:**

Покусаев М. Н. Моделирование образования вредных выбросов в выхлопных газах судового дизеля многотопливных систем / М. Н. Покусаев, А. Ю. Грабарчук, Т. В. Хоменко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 490–500. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-490-500.

## **Введение (Introduction)**

Борьба за снижение вредного влияния транспорта, в том числе водного, на окружающую среду приобретает в мире все большее значение, поэтому международные и региональные требования к экологическим характеристикам дизельных установок постоянно ужесточаются. Наиболее важным документом для определения соответствия судовых энергетических установок международным экологическим требованиям является Международная конвенция МАРПОЛ-73/78 [1], [2]. Основным видом загрязнений окружающей среды со стороны судовых энергетических установок являются вредные выбросы CO, CO<sub>2</sub>, NO, а также другие компоненты, содержащиеся в выхлопных газах дизелей.

За последнее десятилетие частым явлением в решении данной проблемы служит применение на судах добавочных компонентов для топлив, таких как вода, водород, природный газ, биодизель, диметиловый эфир, этиловый спирт и др. В статье приведены результаты исследования моделирования образования вредных выбросов в выхлопных газах судового дизеля NVD24 (3C17.5/24) при использовании двух видов топлива: дизельного топлива и смеси дизельного топлива с диметилэфиром (ДМЭ), имеющего химическую формулу C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O). Далее термин «смесь дизельного топлива и ДМЭ» подразумевает совместную подачу ДМЭ и дизельного топлива в цилиндр дизеля. Для дальнейшего использования полученных данных в процессе проведения экспериментальных исследований по снижению вредных выбросов в отработавших газах дизелей с использованием добавочных компонентов к топливу моделирование выполнялось в программном продукте AVL Fire [3].

## **Методы и материалы (Methods and Materials)**

Эксперименты на реальных судах по исследованию влияния добавочных топливных компонентов на экологические характеристики дизелей являются технологически сложными, дорогостоящими и требующими специального одобрения надзорных органов. Моделирование в специализированных компьютерных программах помогает получить большое количество вариантов и провести детальный анализ не только содержания различных вредных компонентов, но и смоделировать процесс образования продуктов горения топлив различного состава и вида на разной стадии процесса сгорания. Среди подобных программных продуктов выделяют: «Дизель-РК» [4], в основе которого методика, разработанная проф. Н. Ф. Разлейцевым и доработанная проф. А. С. Кулешовым; AVL (AVL, Австрия); GT-POWER (Gamma Technologies, США); WAVE (Ricardo Software, Великобритания); KIVA (Los Alamos National Laboratory, США); VECTIS (Ricardo Software, Великобритания). Также следует отметить специализированный программный комплекс «Программное обеспечение расчета топливоподачи и внутрицилиндровых процессов в дизеле с объемным смесеобразованием Cyberdiesel 2, разработанный специалистами Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова [5].

Математическим моделированием внутрицилиндровых процессов, в том числе с использованием программного обеспечения, занимались в разное время многие специалисты. В настоящее время можно выделить работы следующих авторов: В. В. Гаврилова, В. Ю. Машенко [5], [6], Ю. И. Булыгина [7], А. А. Иванченко [8], Р. З. Кавтарадзе [9], [12], Н. Hristov [10] и др.

В данном исследовании была использована программа AVL Fir, которая входит в программный комплекс AVL, позволяя получить наглядные результаты образования продуктов сгорания в цилиндре дизеля. В качестве прототипа для анализа был использован судовой дизель 3NVD24 (3Ч17,5/24), оборудованный необходимым измерительным комплексом для проведения практических исследований с возможностью экспериментального подтверждения результатов компьютерного моделирования.

Необходимые данные для компьютерного моделирования:

- технические характеристики дизеля NVD24 (3Ч17.5/24);
- компьютерная модель объема цилиндра дизеля, в котором происходит процесс сгорания. (построена при помощи дефрагментации всего объема цилиндра на отдельные элементарные объемы методом конечных элементов [3]);

- выбранные виды топлива: дизельное топливо по ГОСТ 305–2013<sup>1</sup> и смесь дизельного топлива и ДМЭ.

Удельный расход дизельного топлива, согласно расчетам, составил 0,1936 кг/(кВт·ч); удельный расход смеси дизельного топлива и ДМЭ — 0,2122 кг/(кВт·ч), из которых 0,1936 кг/(кВт·ч) — расход дизельного топлива и 0,0186 кг/(кВт·ч) — расход ДМЭ.

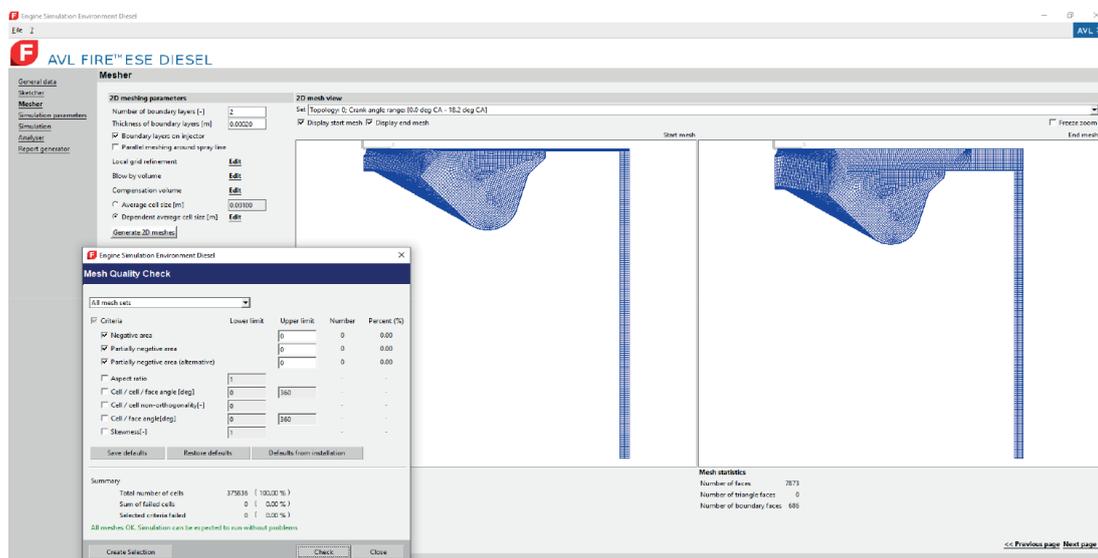


Рис. 1. Компьютерная модель объема цилиндра дизеля NVD24

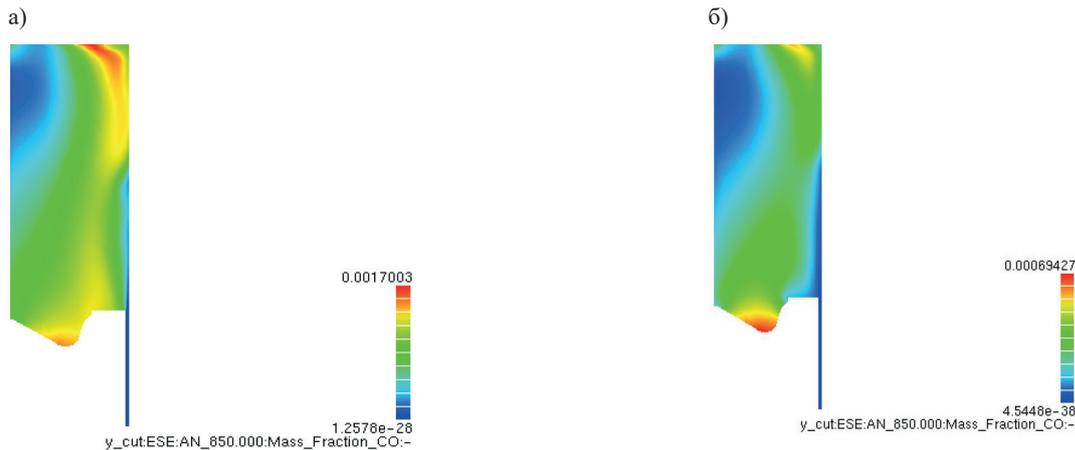
На рис. 1 приведены результаты создания модели рабочего цилиндра дизеля, используемые далее при моделировании процесса горения топлива.

### Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

В результате проведения моделирования в программе AVL Fire были получены диаграммы массового распределения соединений CO, CO<sub>2</sub>, NO, температуры газов для двух видов топлива — с подачей в цилиндры дизельного топлива и с подачей смеси: дизельного топлива и ДМЭ. Основные результаты моделирования, представленные на рис. 2–5, в основном не противоречат результатам исследований [11]–[13]. Далее проведем их анализ более подробно для каждого из компонентов вредных выбросов и температуры газов.

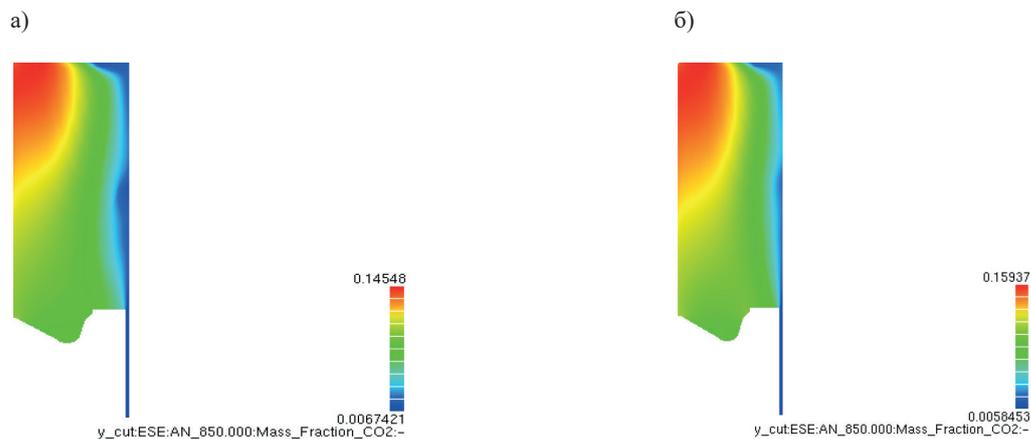
Как видно из рис. 2, при подаче смеси дизельного топлива и ДМЭ распределение соединений CO с более низкими массовыми долями (обозначены синим цветом) в середине цилиндра представлено в более широком объеме. Количество соединений CO с наиболее высокими массовыми долями (обозначены красным цветом) при работе дизеля на смеси дизельного топлива и ДМЭ в верхней части цилиндра меньше, чем при работе на дизельном топливе.

<sup>1</sup> ГОСТ 305–2013 Топливо дизельное. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2014.



*Рис. 2.* Распределение соединений CO в цилиндре дизеля в конце такта «сгорание – расширение» (при положении поршня в нижней мертвой точке):  
*а* — с подачей только дизельного топлива;  
*б* — с подачей смеси дизельного топлива и ДМЭ

Согласно рис. 3, при работе на смеси дизельного топлива и ДМЭ ожидается более широкое распределение соединений CO<sub>2</sub> с высокими значениями массовых долей (обозначенных красным цветом) в центральном объеме цилиндра, чем при работе на дизельном топливе. В целом, отличия картины распределения соединений CO<sub>2</sub> при сравнении не так очевидны, как при анализе выбросов CO, рассмотренных ранее. Об этом же свидетельствуют максимальные и минимальные значения массовых долей, приведенных на сравнительных цветовых шкалах диаграмм. К примеру, максимальное значение при использовании дизельного топлива составляет 0,14548, а при использовании смеси дизельного топлива и ДМЭ — 0,15937.



*Рис. 3.* Распределение соединений CO<sub>2</sub> в цилиндре дизеля в конце процесса «сгорание – расширение» (при положении поршня в нижней мертвой точке):  
*а* — с подачей только дизельного топлива;  
*б* — с подачей дизельного топлива и ДМЭ

Как видно из рис. 4, количество соединений NO с высокими массовыми долями (красного цвета) при использовании смеси дизельного топлива и ДМЭ в центральной части цилиндра будет значительно больше, чем при использовании дизельного топлива. Соединений NO с низкими массовыми долями (синего цвета) у стенок цилиндра при использовании дизельного топлива будет больше, чем при использовании смеси дизельного топлива и ДМЭ.

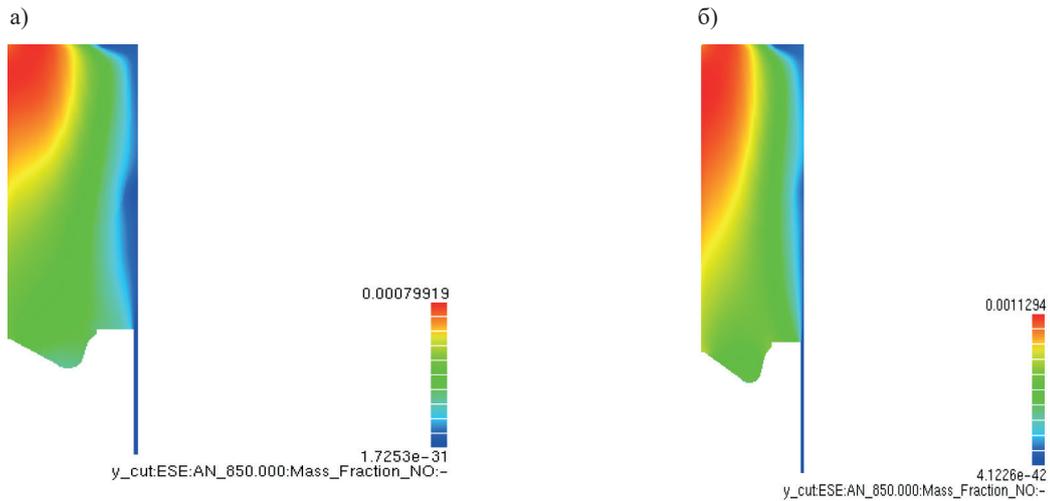


Рис. 4. Распределение соединений NO в цилиндре дизеля в конце такта «сгорание – расширение»:  
а — с подачей только дизельного топлива;  
б — с подачей дизельного топлива и ДМЭ

Как видно из рис. 5, максимальная температура газов в конце такта «сгорание – расширение» при использовании смеси дизельного топлива и ДМЭ будет несколько выше, чем при использовании только дизельного топлива, и они равны, соответственно, 1132 и 1015 К. Это может объясняться дополнительной теплотой, образуемой при сгорании ДМЭ. В частности, низшая теплота сгорания дизельного топлива составляет 42,5 МДж/кг, а ДМЭ — 28,8 МДж/кг [12]. При указанном ранее удельном расходе дизельного топлива в смеси 0,1936 кг/(кВт·ч) его удельная теплота сгорания составит 8,228 МДж/(кВт·ч), а для ДМЭ при удельном расходе 0,0186 кг/(кВт·ч) — 0,535 МДж/(кВт·ч), что составит 6,5 % от удельной теплоты дизельного топлива. Таким образом, вносимая дополнительная теплота от сгорания ДМЭ приведет к ожидаемому росту повышения температуры газов.

Характер распределения температур в объеме рабочего цилиндра свидетельствует о несколько большем объеме газов, имеющих высокие температуры (выделен красным цветом) в центральной части цилиндра при использовании смеси дизельного топлива и ДМЭ.

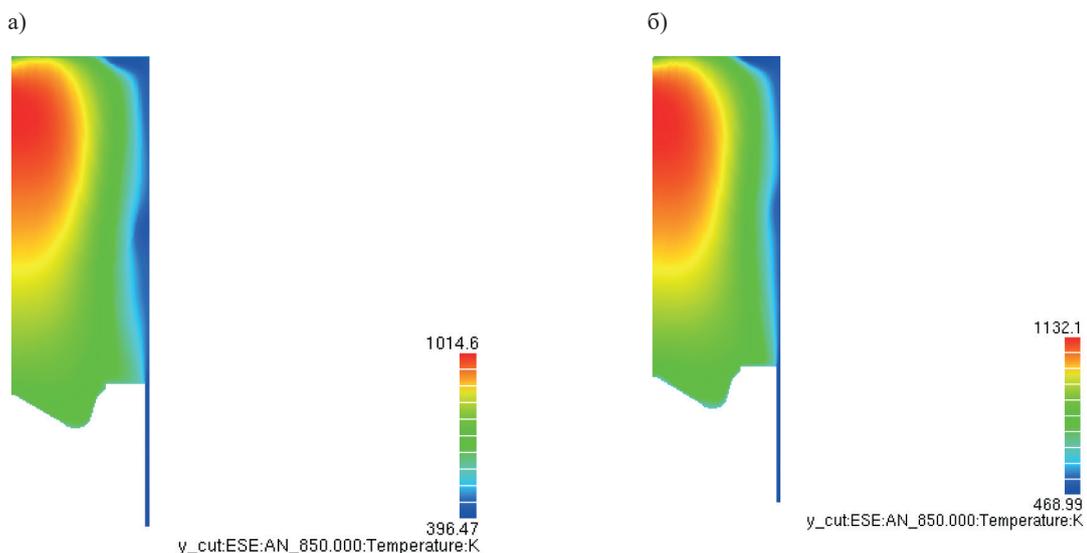
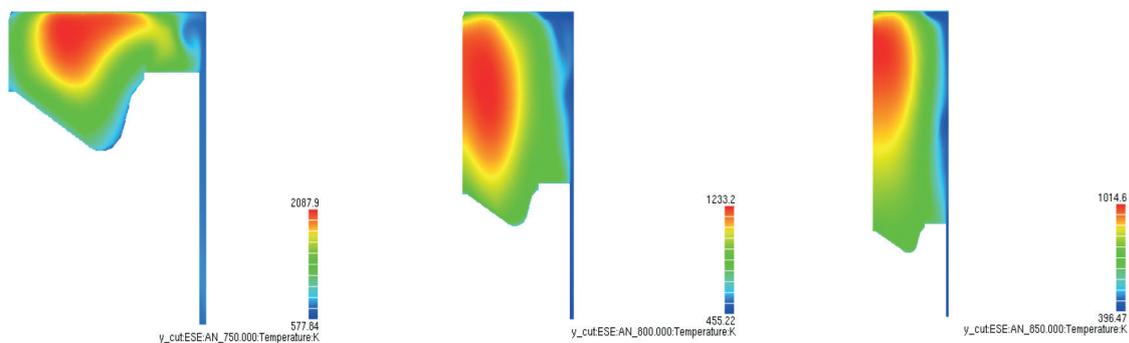


Рис. 5. Распределение температур в цилиндре дизеля в конце такта «сгорание – расширение»:  
а — с подачей только дизельного топлива;  
б — с подачей дизельного топлива и ДМЭ

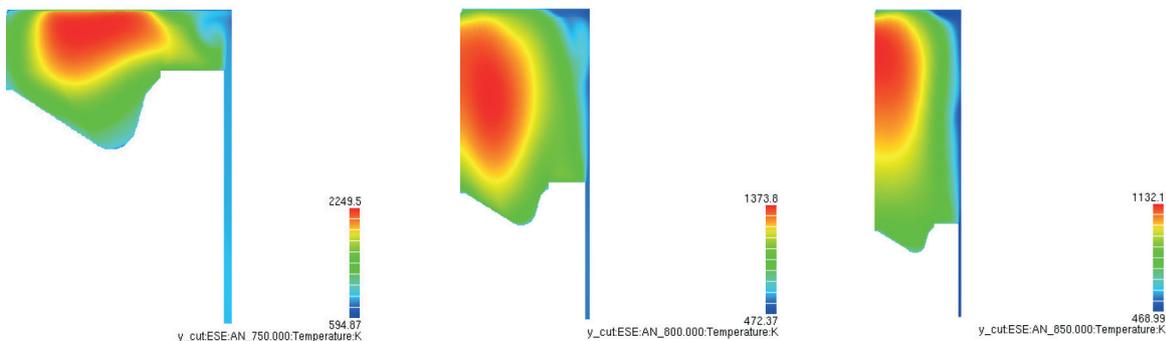
Одним из наиболее интересных вопросов является сравнение не только конечного распределения по массовым долям вредных компонентов по окончании процесса сгорания топлива, но и анализ развития образования компонентов по мере прохождения процесса сгорания. Этот анализ также выполнен и его результаты приведены на рис. 6–9. На рис. 6 представлено распределение температур в процессе сгорания при подаче дизельного топлива и смеси. Как видно из этого рисунка, распределение температур по мере развития процесса сгорания и движения поршня от верхней к нижней мертвой точке происходит практически идентично, как при использовании только дизельного топлива, так и при впрыске смеси: дизельного топлива и ДМЭ.

Следует обратить внимание на более высокие температуры в цилиндре при использовании смеси, что также отражается на некотором изменении формы распределения высоких температур (на рис. 6 обозначены красным цветом) в первый момент процесс сгорания смеси. При дальнейшем развитии процесса сгорания распределение температур, как в первом, так и во втором варианте топлива отличается незначительно.

а)



б)



*Рис. 6.* Распределение температур в цилиндре дизеля по мере развития процесса сгорания топлива при такте «сгорание – расширение»:  
 а — с подачей дизельного топлива;  
 б — с подачей дизельного топлива и ДМЭ

Распределение соединений СО по мере развития процесса сгорания представлено на рис. 7. По характеру диаграмм можно сделать следующие выводы:

1. При работе на дизельном топливе в первые моменты сгорания (на первых диаграммах серии) в нижней части цилиндра, возле доньшка поршня, образуются соединения СО со средней массовой долей (обозначенные зеленым цветом), а при работе на смеси дизельного топлива и ДМЭ подобной картины нет.

2. В конце процесса сгорания дизельного топлива большую часть объема рабочего цилиндра занимают соединения СО именно со средними массовыми долями, но при работе на смеси дизельного топлива и ДМЭ количество соединений СО с высокими массовыми долями (обозначенных красным цветом) меньше, чем при работе на дизельном топливе.

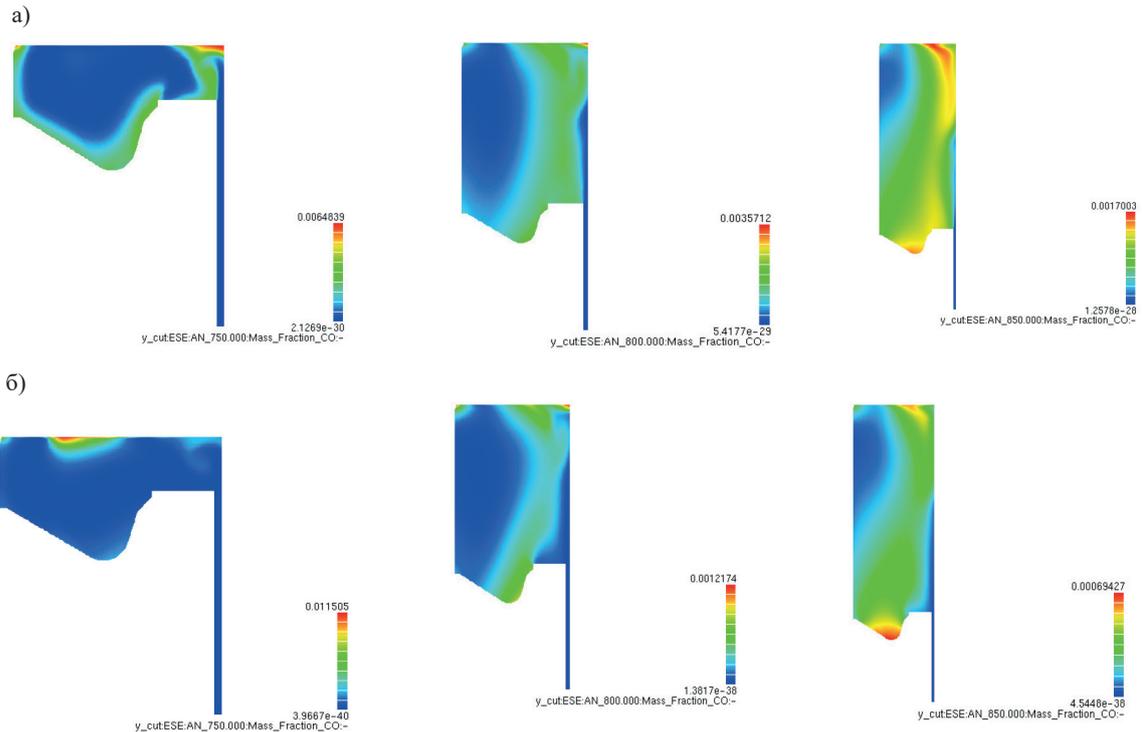


Рис. 7. Распределение соединений CO по мере развития такта «сгорание – расширение»: а — с подачей дизельного топлива; б — с подачей дизельного топлива и ДМЭ

На рис. 8 показано распределение выбросов CO<sub>2</sub>. Из приведенных диаграмм видно, что распределение при использовании дизельного топлива и смеси дизельного топлива и ДМЭ практически идентично.

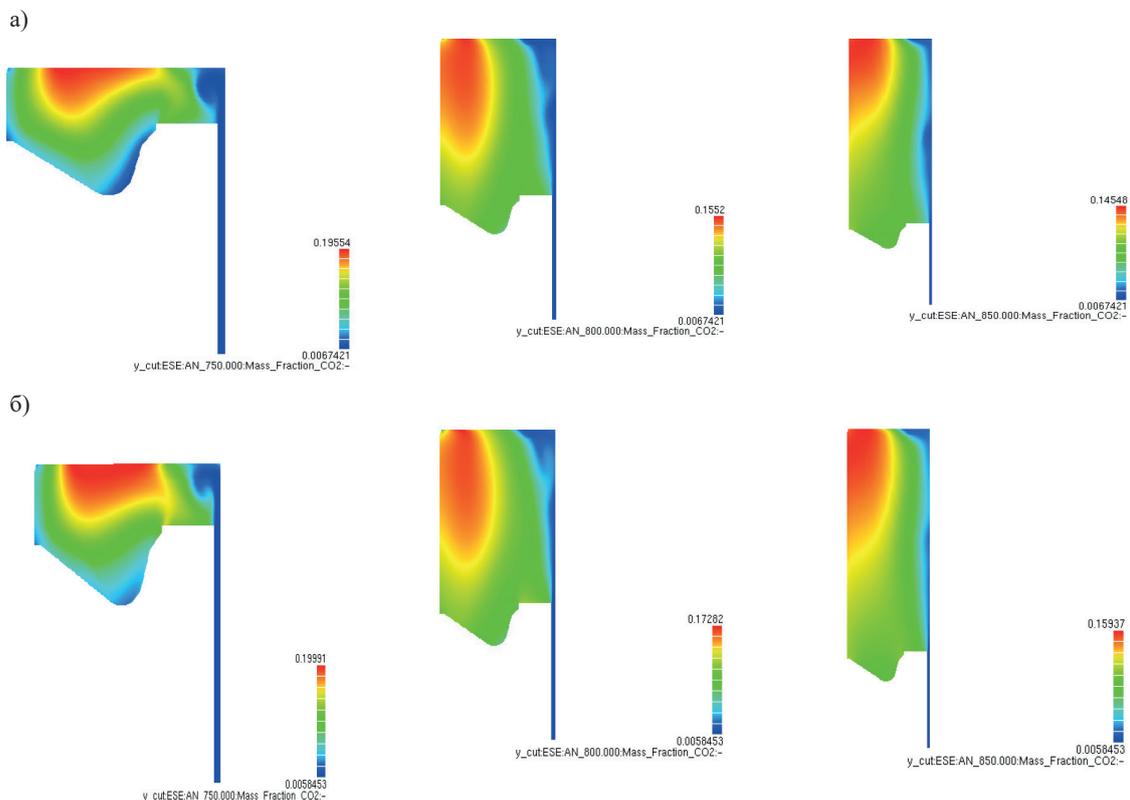


Рис. 8. Распределение соединений CO<sub>2</sub> по мере развития такта «сгорание – расширение»: а — с подачей дизельного топлива; б — с подачей дизельного топлива и ДМЭ

На рис. 9 показано распределение соединений NO. В начале такта «сгорание – расширение» (на первой схеме серии рис. 9) при работе на смеси дизельного топлива и ДМЭ количество компонентов NO с высокими массовыми долями меньше, чем при работе на дизельном топливе, но далее при работе на смеси количество NO с высокими массовыми долями в объеме цилиндра увеличивается.

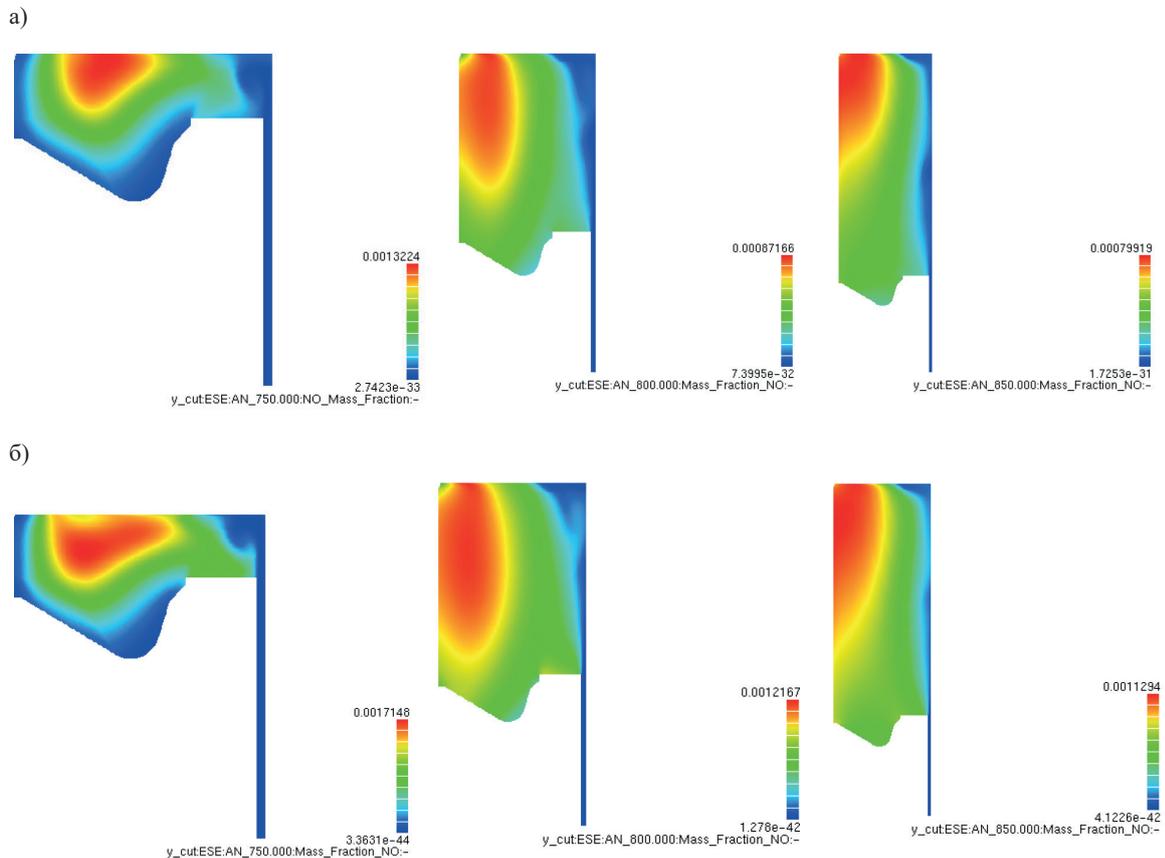


Рис. 9. Распределение соединений NO по мере развития такта «сгорание – расширение»: а — с подачей дизельного топлива; б — с подачей дизельного топлива и ДМЭ

Полученные результаты моделирования согласуются с авторскими исследованиями, приведенными в источниках [14], [15].

### Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Моделирование в программном продукте AVL Fire позволяет получить распределение массовых долей продуктов сгорания в цилиндре дизеля и оценить динамику процессов образования вредных компонентов без проведения дорогостоящих натурных экспериментов.

2. При анализе картин распределения вредных веществ в конце процесса сгорания установлено следующее:

- при подаче дизельного топлива и ДМЭ количество соединений CO с низкими массовыми долями в средней части объема рабочего цилиндра более высокое, чем при работе на дизельном топливе;

- распределение соединений CO<sub>2</sub> практически идентично как при использовании дизельного топлива, так и при смеси дизельного топлива и ДМЭ;

- количество соединений NO с высокими массовыми долями при использовании смеси дизельного топлива и ДМЭ в центральном объеме рабочего цилиндра значительно больше, чем при использовании дизельного топлива.

3. Максимальная температура газов в конце рабочего хода при использовании смеси дизельного топлива и ДМЭ будет несколько выше, чем при использовании только дизельного топлива и, соответственно, составляют 1132 и 1015 К. Характер распределения температур в объеме рабочего цилиндра свидетельствует о несколько большем объеме газов, имеющих высокие температуры в центральном объеме цилиндра при использовании смеси дизельного топлива и ДМЭ.

4. При анализе развития процесса сгорания топлив установлено следующее:

- распределение температур происходит практически идентично как при использовании дизельного топлива, так и при использовании смеси дизельного топлива и ДМЭ;
- при работе на дизельном топливе в первые моменты сгорания возле доньшка поршня образуются соединения СО, а при работе на смеси дизельного топлива и ДМЭ подобной картины нет;
- характер распределения соединений  $\text{CO}_2$  как при использовании дизельного топлива, так и смеси дизельного топлива и ДМЭ практически идентичный;
- в момент начала такта «сгорание – расширение» при работе на смеси дизельного топлива и ДМЭ количество соединений NO с высокими долями меньше, чем при работе на дизельном топливе, но далее при работе на смеси количество соединений NO с высокими массовыми долями в объеме цилиндра увеличивается.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., измененная протоколом 1978 г. к ней (МАРПОЛ-73/78). — Кн. I и II. — СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2023. — 862 с.
2. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ-73/78) Там же. — Кн. III. — 472 с.
3. AVL Fire Emission. Release 2020 R1, 2023 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.avl.com/en/simulation-solutions> (дата обращения: 20.04.2023).
4. Программный комплекс «Дизель-ПК» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://diesel-rk.com/Rus/index.php?page=Download&ysclid=lcj4liyddm1322162> (дата обращения: 20.04.2023).
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017610725 Российская Федерация. Программное обеспечение расчёта топливоподачи и внутрицилиндровых процессов в дизеле с объемным смесеобразованием «CyberDiesel 2» / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко; заяв. и патентообл. Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — № 2016661760; заявл. 08.11.2016; опубл. 16.01.2017.
6. Гаврилов В. В. Математическое моделирование топливоподачи и локальных внутрицилиндровых процессов в дизеле с объемным смесеобразованием с использованием программы CyberDiesel / В. В. Гаврилов, В. Ю. Машенко // Журнал университета водных коммуникаций. — 2012. — № 2. — С. 92а–98.
7. Булыгин Ю. И. Моделирование внутрицилиндровых процессов транспортных двигателей с целью повышения их экономичности и экологичности / Ю. И. Булыгин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. — 2005. — № S12. — С. 52–60.
8. Иванченко А. А. Проблемы и опыт математического моделирования экологических и эксплуатационных показателей судового высокооборотного дизеля M482 / А. А. Иванченко, И. А. Щенников, А. А. Иванченко // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2016. — № 3 (37). — С. 166–173. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-7-3-166-173.
9. Кавтарадзе Р. З. Развитие теории рабочих процессов ДВС в МГТУ им. Н. Э. Баумана: от метода Гриневецкого до современных 3D-моделей / Р. З. Кавтарадзе // Двигателестроение. — 2020. — № 1 (279). — С. 3–9.
10. Hristov H. Modeling of the dependence of the produced amount of hydrogen gas (y) on the amperage of cell (x) of a marine diesel engine SKL 3NVD24 / H. Hristov, I. Bakalov, B. Shopov, D. Yovkov // Pedagogika-Pedagogy. — 2021. — Vol. 93. — No. 6s. — Pp. 273–278. DOI: 10.53656/ped21-6s.24mod.
11. Кавтарадзе Р. З. Влияние термического механизма и процессов теплообмена на образование оксида азота в камере сгорания дизеля / Р. З. Кавтарадзе // Российская национальная конференция по теплообмену четвертая: труды (Москва, 23–27 октября 2006 г.): в 8 т. / РАН, Моск. энергетический ин-т, Нац. комитет РАН по теплообмену. — 2006. — Т. 8: Молодежная секция. — С. 73–76.
12. Денежко Л. В. Применение диметилэфира  $(\text{CH}_3)_2\text{O}$  в качестве альтернативного дизельного топлива / Л. В. Денежко [и др.] // Аграрный вестник Урала. — 2016. — № 6 (148). — С. 14.

13. Лазарев Е. А. Температурное состояние рабочего тела в полуразделенной камере сгорания дизеля с газотурбинным наддувом / Е. А. Лазарев, В. Е. Лазарев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. — 2012. — № 12 (271). — С. 80–85.

14. Грабарчук А. Ю. Улучшение экологических характеристик судового дизельного двигателя путем дополнительного внешнего смесеобразования с применением диметилового эфира / А. Ю. Грабарчук, Ш. М. Робиуззаман // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2021. — № 1 (71). — С. 36–43. DOI: 10.24143/1812-9498-2021-1-36-43.

15. Покусаев М. Н. Система подачи добавочного компонента в цилиндр дизельного двигателя / М. Н. Покусаев, А. С. Зубарев, А. Ю. Грабарчук // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2018. — № 1. — С. 67–73. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-67-73.

## REFERENCES

1. *International Convention for Prevention of Pollution from Ships, 1973, as Modified by the Protocol of 1978 relating thereto (MARPOL-73/78), Book I–II*. SPb.: ZAO «TsNIIMF», 2023.

2. *International Convention for Prevention of Pollution from Ships (MARPOL-73/78), Book III*. SPb.: ZAO «TsNIIMF», 2023.

3. AVL Fire Emission. Release 2020 R1, 2023. Web. 20 Apr. 2023 <<https://www.avl.com/en/simulation-solutions>>.

4. Diesel-RK. Web. 20 Apr. 2023 <<https://diesel-rk.com/Rus/index.php?page=Download&ysclid=lcj4liyd dm1322162>>.

5. Gavrilov, V. V., and V. Yu. Mashchenko. RU 2017610725. Программное обеспечение расчёта топливopодачи и внутрисилиндровых протессов в дизеле с об’ёмным смесеобразованием «CyberDiesel 2». Russian Federation, assignee. Publ. 16 Jan. 2017.

6. Gavrilov, V. V., and V. Yu. Mashchenko. “Math modeling of fuel injecting and local inside cylinder processes in spray-type diesel engine by program of CyberDiesel.” *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsii* 2 (2012): 92a–98.

7. Bulygin, Yu. I. “Modelirovanie внутрисилиндровых протессов транспортных двигатели с тsel’yu povysheniya ikh ekonomichnosti i ekologichnosti.” *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Estestvennye nauki* S12 (2005): 52–60.

8. Ivanchenko, Aleksandr Andreevich, Ivan Andreevich Shchennikov, and Andrei Aleksandrovich Ivanchenko. “Problems and experience of mathematical modeling nox emissions and operating characteristics of high-speed diesel engine M482.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(37) (2016): 166–173.

9. Kavtaradze R. Z. “Development of combustion theory in Bauman technical university: from Grinevetsky method to modern 3d-models (continuation).” *Dvigatelaystryeniye* 1(279) (2020): 3–9.

10. Hristov, Hristo, Ivaylo Bakalov, Bogdan Shopov, and Dobromir Yovkov. “Modeling of the dependence of the produced amount of hydrogen gas (y) on the amperage of cell (x) of a marine diesel engine SKL 3NVD24.” *Pedagogika-Pedagogy* 93.6s (2021): 273–278. DOI: 10.53656/ped21–6s.24mod.

11. State Standard 305–2013. Diesel fuel. Specifications. M.: Standartinform, 2014.

12. Kavtaradze, Z.R. “Vliyanie termicheskogo mekhanizma i protsessov teploobmena na obrazovanie oksida azota v kamere sgoraniya dizelya.” *Rossiiskaya natsional’naya kon-ferentsiya po teploobmenu chetvertaya: trudy*. Vol. 8. 2006. 73–76.

13. Denejko, L. V., L. A. Novopashin, Yu. V. Pankov, A. A. Sadov, and P. V. Kochetkov. “Using dimethyl ether (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>O as an alternative diesel fuel.” *Agrarnyi vestnik Urala* 6(148) (2016): 14.

14. Lazarev, Evgeny A., and Vladislav E. Lazarev. “The temperature condition of the air-fuel mixture into turbo-charged diesel engines combustion chamber.” *Vestnik Yuzhno-Ural’skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie* 12(271) (2012): 80–85.

15. Grabarchuk, Alexander Yuryevich, and Shagor Muhammad Robiuzzaman. “Improving marine diesel engine environmental performance by carburation of dimethyl ether in inlet manifold.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University* 1(71) (2021): 36–43. DOI: 10.24143/1812-9498-2021-1-36-43.

16. Pokusaev, Mikhail Nikolaevich, Anton Sergeevich Zubarev, and Alexander Yuryevich Grabarchuk. “System of supplying the additive component to the cylinder of the diesel engine.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2018): 67–73. DOI: 10.24143/2073-1574-2018-1-67-73.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Покусаев Михаил Николаевич** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный  
технический университет»  
414056, Российская Федерация, г. Астрахань,  
ул. Татищева, стр.16/1  
e-mail: [evt2006@rambler.ru](mailto:evt2006@rambler.ru)

**Грбарчук Александр Юрьевич** — аспирант  
*Научный руководитель:*  
Покусаев Михаил Николаевич  
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный  
технический университет»  
414056, Российская Федерация, г. Астрахань,  
ул. Татищева, стр. 16/1  
e-mail: [alex45678@mail.ru](mailto:alex45678@mail.ru)

**Хоменко Татьяна Владимировна** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный  
технический университет»  
414056, Российская Федерация, г. Астрахань,  
ул. Татищева, стр.16/1  
e-mail: [t\\_v\\_homenko@mail.ru](mailto:t_v_homenko@mail.ru)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Pokusaev, Mikhail N.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Astrakhan State Technical University  
16/1 Tatishcheva Str.,  
Astrakhan, 414056,  
Russian Federation  
e-mail: [evt2006@rambler.ru](mailto:evt2006@rambler.ru)

**Grabarchuk, Aleksandr Yu.** — Postgraduate  
*Supervisor:*  
Pokusaev, Mikhail N.  
Astrakhan State Technical University  
16/1 Tatishcheva Str.,  
Astrakhan, 414056,  
Russian Federation  
e-mail: [alex45678@mail.ru](mailto:alex45678@mail.ru)

**Khomenko, Tatiana V.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Astrakhan State Technical University  
16/1 Tatishcheva Str.,  
Astrakhan, 414056,  
Russian Federation  
e-mail: [t\\_v\\_homenko@mail.ru](mailto:t_v_homenko@mail.ru)

*Статья поступила в редакцию 5 апреля 2023 г.  
Received: April 5, 2023.*