

Научная статья
УДК 621.433.2

Улучшение подачи газа во впускную систему газового двигателя применением кольцевого распылителя

Георгий Константинович Краснов¹, Владимир Викторович Синявский²
Эдуард Андреевич Савастенко³,

^{1,2,3}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹gpro98@mail.ru

²sinvlad@mail.ru

³e.d.u.a.r.d@inbox.ru

Аннотация. Рассмотрены возможности улучшения показателей работы газового двигателя с распределённой подачей газа во впускную систему при переходе от самой простой системы – одиночной форсунки во впускном канале – к кольцевому распылителю, обеспечивающему равномерное распределение газового топлива по всему сечению впускного канала. Разработана модель газового двигателя Cummins isbe 6.7 в программном комплексе FlowVision с одиночной форсункой и с кольцевым распылителем для подачи газа. Проведенное 3D моделирование показало более равномерное распределение газа по цилиндру в случае кольцевого распылителя в процессах впуска, сжатия и сгорания. Проведены расчеты индикаторной диаграммы, показавшие, что в случае применения кольцевого распылителя индикаторные показатели как мощности, так и топливной экономичности двигателя улучшатся на 1,7 процента.

Ключевые слова: система питания газового двигателя, подача газа во впускную систему, кольцевой распылитель подачи газа, программный комплекс FlowVision, CFD моделирование впуска газового топлива.

Для цитирования: Краснов Г.К., Синявский В.В. Савастенко Э.А., Улучшение подачи газа во впускную систему газового двигателя применением кольцевого распылителя // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2024. № 2 (40).

Original article

Improving gas supply to the intake system of a gas engine using a ring atomizer

Georgy K. Krasnov¹, Vladimir V. Sinyavskiy², Eduard A. Savastenko³,

^{1,2,3}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

¹gpro98@mail.ru

²sinvlad@mail.ru

³e.d.u.a.r.d@inbox.ru

Abstract. The possibilities of improving the performance of a gas engine with a multipoint gas injection to the intake system are considered when moving from the simplest system – an injector in the intake channel – to a ring atomizer that ensures uniform distribution of gas fuel across the cross section of the intake channel. A model of the Cummins isbe 6.7 gas engine was developed in the FlowVision software package with a single nozzle and a ring atomizer for gas supply. The 3D modeling carried out showed a more uniform distribution of gas throughout the cylinder in the case of an annular atomizer during the intake and compression processes. Calculations of the indicator diagram were carried out, showing that in the case of using a ring atomizer, the indicator parameters of both power and fuel efficiency of the engine will improve by 1.7 percent.

Keywords: gas engine fuel supply system, gas injection to the intake system, ring gas fuel atomizer, FlowVision software package, CFD modeling of gas fuel atomization..

For citation: Krasnov G.K., Sinyavskiy V.V., Savastenko E.A. Improving gas supply to the intake system of a gas engine using a ring atomizer. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2024. No. 2 (40).

Введение

Перевод дизелей грузовых автомобилей на питание природным газом актуален, поскольку его стоимость на заправочных станциях в России существенно ниже, чем дизельного топлива. При эксплуатации таких грузовых автомобилей снижаются выбросы оксидов азота, оксида углерода, в зависимости от метода конвертации значительно снижаются или полностью отсутствуют выбросы сажи. Снижаются до 30% выбросы углекислого газа, а также уменьшается уровень шума.

Конвертация дизеля для работы на природном газе возможна двумя путями: в газовый двигатель и газодизель. В газовом двигателе обеспечивается полная замена дизельного топлива газовым, а в газодизеле применяется запальная порция дизельного топлива, которая при использовании системы Common Rail составляет 5...6% на полной нагрузке и возрастает до 33% на холостом ходу [1]. Основным преимуществом газодизеля является возможность работать в дизельном режиме при отсутствии газозаправочных станций.

Большинство автомобильных дизелей конвертируется для питания природным газом по газовому циклу.

При конвертации дизеля в газовый двигатель необходимо решить ряд проблем: уменьшить степень сжатия для предотвращения детонации, выбрать оптимальную форму камеры сгорания, обеспечивающую наилучшее сгорание газового топлива, установить дроссельную заслонку, чтобы обеспечить работу двигателя на частичных нагрузках, и систему зажигания высокой энергии, поскольку природный газ воспламеняется хуже паров бензина. Также нужно выбрать систему подачи газа, позволяющую получить однородную газоздушную смесь в цилиндре двигателя [2, 3]. Наиболее простой является система распределённого впрыска газа во впускную систему, аналогичная системе распределённого впрыска бензина в двигателях с искровым зажиганием. Однако при подаче из форсунки газовое топливо гораздо хуже перемешивается с воздухом, чем мелкие капли бензина. Поэтому в случае газового двигателя очень важно организовать подачу газового топлива так, чтобы обеспечить максимально однородную газоздушную смесь во впускной системе, при впуске и в конце такта сжатия в цилиндре.

При подаче газа во впускную систему в период перекрытия клапанов часть газа вместе с продувочным воздухом выбрасывается в атмосферу. Поэтому при конвертации дизеля в газовый двигатель часто уменьшают период перекрытия клапанов. Для исключения выбросов газа в атмосферу применяется фазированный впрыск газа, организованный так, чтобы в период перекрытия клапанов газ не поступал в цилиндры [4].

В работе [4] автор показал, что показатели мощности, топливной экономичности и токсичности двигателя существенно зависят от диаметра трубки, подводящей газ от форсунки, ее удаления от впускного клапана и направления подачи газа – наилучшие показатели двигателя получены при движении газа сверху вниз.

В работе [5] представлена система подачи газа во впускной канал, выполненная в виде плоского распылителя с большим числом отверстий, обеспечивающих равномерное заполнение газом сечение канала (рис. 1). Такой распылитель создает сопротивление на пути движения потока воздуха, что несколько снижает наполнение цилиндров двигателя.

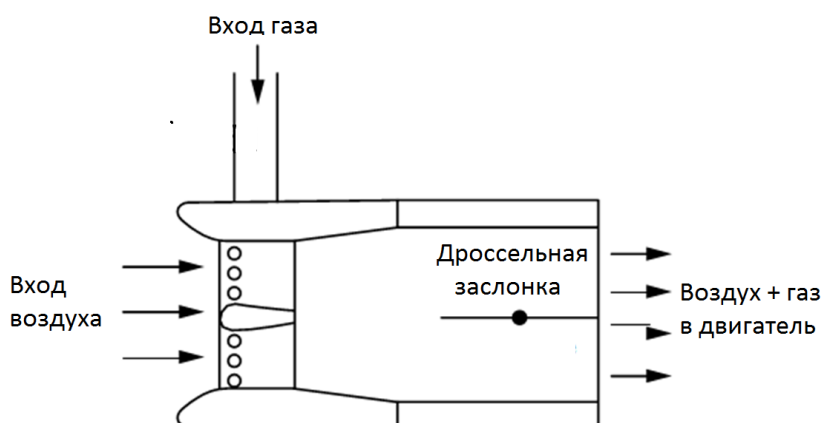


Рис. 1. Плоский распылитель газа во впускном канале

В АО «Коломенский завод» и ряде других организаций предложены кольцевые распылители, в которых газ подается из отверстий, расположенных у стенки впускного канала, обеспечивая равномерное распределение газа по сечению канала без заметного увеличения гидравлического сопротивления (рис. 2, а).

Задачи и особенности исследования

В данном исследовании для расчётов используется программный комплекс *FlowVision*, в котором уже проводилась оценка работы впуска газа на основе трубки Вентури [6]. При этом был проведён только предварительный расчёт по определению числа отверстий, расположения трубки и т.д., без оценки влияния этого распылителя на рабочий процесс двигателя. В дальнейших работах [7] проводился расчёт рабочего процесса газового двигателя на основе дизеля Д-245. При этом был использован одиночный распылитель с шестью отверстиями, расположенными под углом 60° . В работе [7] также отлажена методика моделирования всех тактов

двигателя, взаимодействие движения поршня и клапанов, выбор расчётной сетки и уровня адаптаций, необходимых для сходимости решения. Также были получены численные значения давлений цикла при подаче различных порций газа, и, как следствие, влияние на рабочий процесс различных коэффициентов избытка воздуха.

Дальнейшим этапом расчёта газового двигателя является данное исследование, в котором расчетным путем определено максимально возможное улучшение его показателей при переходе от самого простого способа подачи газа во впускную систему одиночной форсункой к кольцевому распылителю, обеспечивающему наиболее равномерное распределение газа по сечению впускного канала.

При этом решались следующие задачи:

- разработка в программном комплексе *FlowVision* модели газового двигателя с двумя распылителями подачи газа;
- получение 3D изображения процессов впуска, сжатия и сгорания газа;
- построение индикаторной диаграммы и расчёт индикаторных показателей газового двигателя.

На рисунке 2 представлены два варианта подачи газа во впускной канал газового двигателя: с помощью одиночной форсунки и кольцевого распылителя, которые использовались при моделировании.

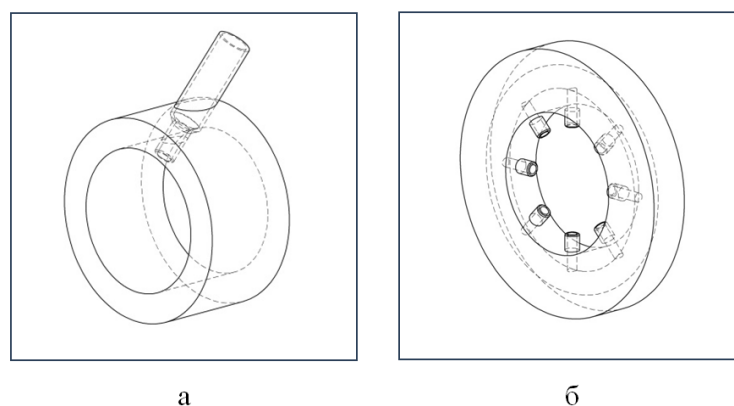


Рис. 2. Схема подачи газа во впускной канал двигателя:
а – одиночная форсунка; б – кольцевой распылитель

Методика моделирования процесса впуска газового топлива

В качестве объекта исследования использовался дизель Cummins 6.7 isbe, 6ЧН 10,7/12,4, конвертированный в газовый двигатель с уменьшенной до 11,0 степенью сжатия и распределенным впрыском природного газа.

Описание расчетной модели двигателя в программном комплексе *FlowVision*:

- движение потока газа – модель Навье-Стокса;
- теплообмен – через стенку между охлаждающей жидкостью и рабочим телом;
- массоперенос – (перемешивание) газов;
- горение рабочего тела – модель Аррениуса-Магнуссена;
- турбулентность – модель KEFV.

На рисунке 3 представлена расчетная модель цилиндра, а также головки цилиндров с впускными и выпускными каналами, впускными и выпускными клапанами и кольцевым распылителем подачи газа во впускной канал.

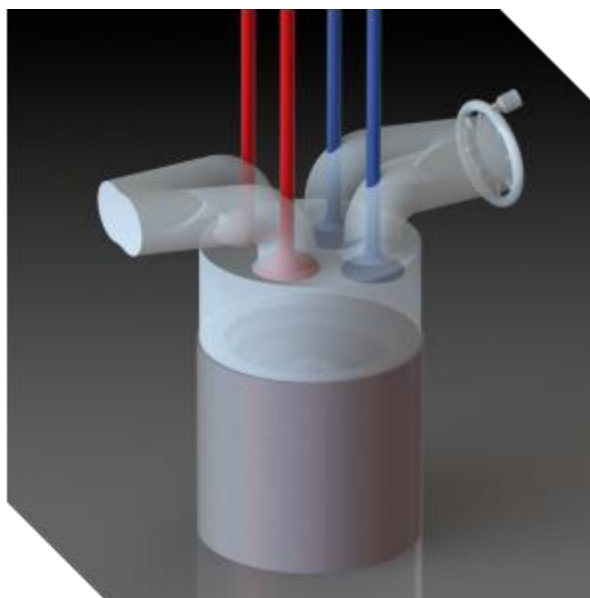


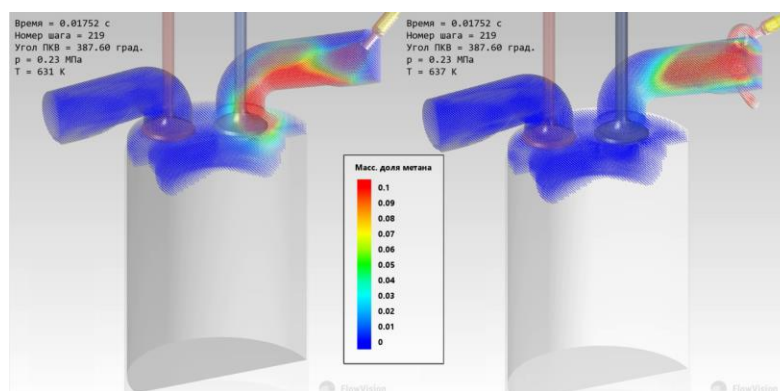
Рис. 3. Расчетная модель цилиндра двигателя

На рисунках 4, 5, 6 представлены результаты визуализации при моделировании процессов впуска, сжатия и сгорания газа для двух разных

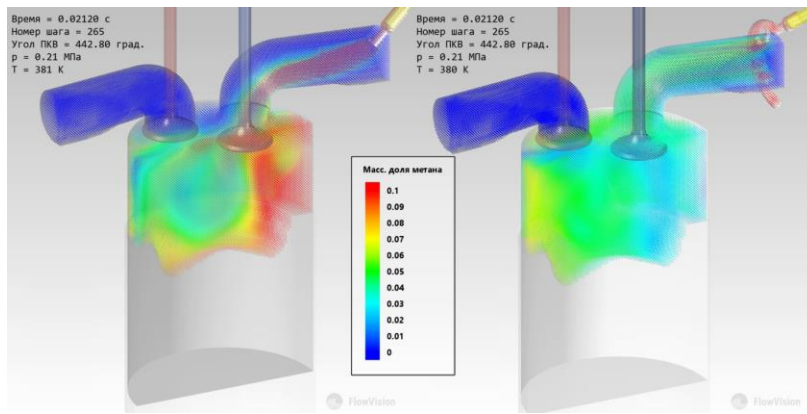
распылителей. В качестве исследуемых параметров выбраны массовая доля метана для процесса впуска, коэффициент избытка воздуха для процесса сжатия и температура газовой смеси для процесса сгорания. Здесь указаны углы в градусах поворота коленчатого вала ($^{\circ}$ п.к.в.) после нижней мёртвой точки (НМТ) и верхней мёртвой точки (ВМТ).

Как видно из рис. 4, а, в начале такта впуска в случае одиночной форсунки в нижней части впускного канала находится зона метана, а в верхней части – зона чистого воздуха. В случае кольцевого распылителя практически сразу на выходе из распылителя все сечение впускного канала равномерно заполняется метаном.

В середине такта впуска (рис. 4, б) во впускном канале в случае одиночной форсунки имеется струя метана, окруженная воздухом, и в цилиндре четко видны зоны с повышенной и пониженной концентрацией метана. В случае кольцевого распылителя практически сразу на выходе из распылителя и в цилиндре получается хорошо перемешанная газозвудушная смесь.

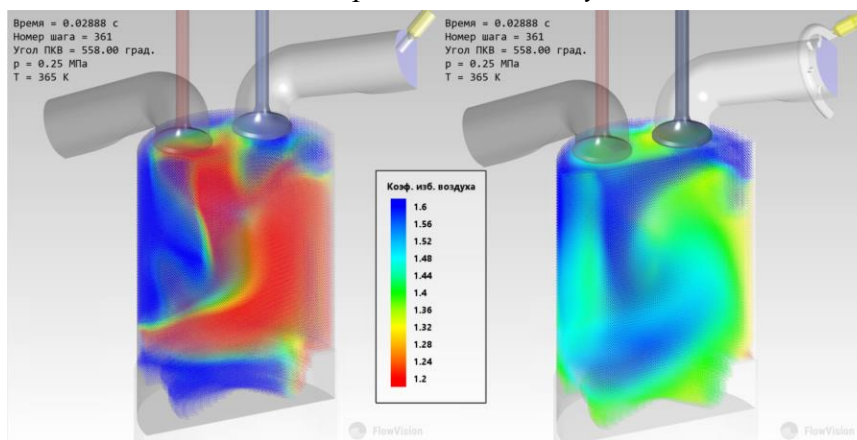


а)

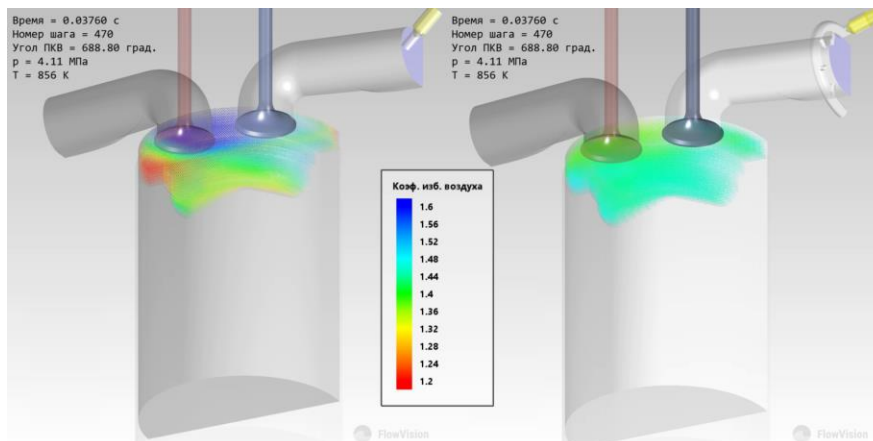


б)

Рис. 4. Массовая доля метана в воздухе в процессе впуска: а – в начале такта впуска, 27,8° п.к.в. после НМТ; б – в середине такта впуска, 82,8° п.к.в. после НМТ;



а)



б)

Рис. 5. Изменение коэффициента избытка воздуха в процессе сжатия: а – в начале такта сжатия, 27,8° п.к.в. после НМТ; б – в конце такта сжатия, 82,8° п.к.в. после НМТ

Как видно из рис. 5 а, в начале сжатия в случае одиночной форсунки в цилиндре присутствуют значительные зоны с максимальным ($\alpha = 1,8$) и

минимальным ($\alpha = 1,2$) коэффициентом избытка воздуха. В случае кольцевого распылителя различия состава газовой смеси значительно меньше. В конце такта сжатия (рис. 5, б) в случае одиночной форсунки в цилиндре все еще имеются заметные различия коэффициента воздуха, а в случае кольцевого распылителя состав смеси практически однородный.

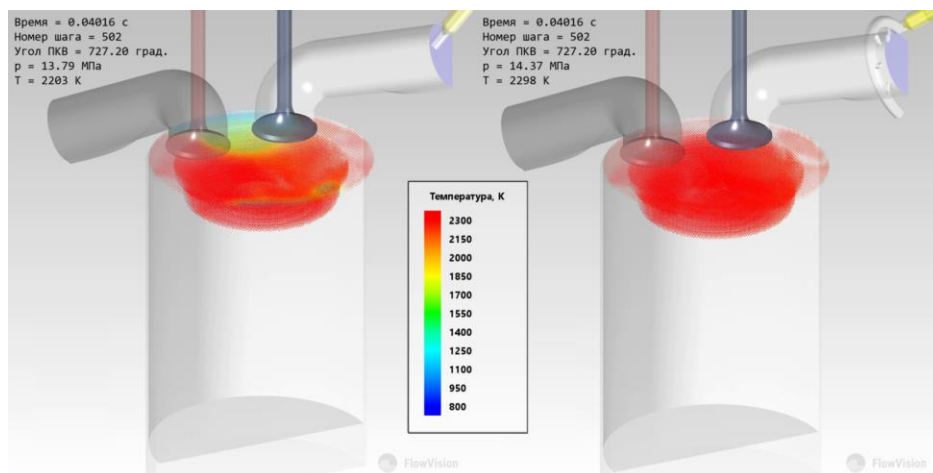


Рис. 6. Изменение температуры газовой смеси в начале процесса сгорания, $7,2^\circ$ п.к.в. после ВМТ

Из рисунка 6 видно, что в начале сгорания в случае одиночной форсунки имеется зона с низкой температурой (желтый цвет), которая соответствует зоне с повышенным коэффициентом избытка воздуха в конце сжатия (синий цвет на рис. 5, а). При использовании кольцевого распылителя получается практически одинаковая температура всей горячей газовой смеси, что свидетельствует о ее однородном составе.

Однородный состав газовой смеси в случае использования кольцевого распылителя обеспечивает ее более быстрое и полное сгорание, что приводит к улучшению индикаторных показателей.

Сравнение индикаторных показателей газового двигателя:

индикаторной работы L_p , среднего индикаторного давления p_i , индикаторного крутящего момента M_i , индикаторной мощности N_i , удельного индикаторного расхода топлива g_i и индикаторного КПД η_i при подаче газа из одиночной форсунки и кругового распылителя приводится в таблице 1.

Таблица 1

Индикаторные показатели газового двигателя при подаче газа из одиночной форсунки и кругового распылителя

	L_i , кДж	p_i , МПа	M_i , Н*м	N_i , кВт	g_i , г/(кВт*ч)	η_i
Одиночная форсунка	1,903	1,707	909	238	158	0,454
Круговой распылитель	1,935	1,736	924	242	155	0,463

Как видно из таблицы 1, при использовании кольцевого распылителя все индикаторные показатели улучшились на 1,7%, что вызвано более полным перемешиванием природного газа с воздухом в процессах впуска и сжатия.

Выводы

1. Программный комплекс *FlowVision* позволяет оценить рабочий процесс в газовом двигателе, построить индикаторную диаграмму и оценить изменение показателей работы двигателя внутреннего сгорания.
2. *CFD* моделирование показывает, что кольцевой распылитель обеспечивает более равномерное перемешивание газового топлива с воздухом при впуске в цилиндр, чем одиночная форсунка.
3. При использовании кольцевого распылителя получены более высокие индикаторные показатели двигателя, чем при использовании одиночного распылителя.
4. Индикаторные показатели (мощности, эффективный расход топлива, КПД и др.) улучшились на 1,7%.

Список источников

1. Method of conversion of high- and middle-speed diesel engines into gas diesel engines / M. G. Shatrov, V. V. Sinyavski, A. Yu. Dunin [et al.] // *Facta Universitatis. Series: Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol. 15, No. 3. – P. 383-395. – DOI 10.22190/FUME171004023S. – EDN YXFWRJ.
2. Ерохов, В. И. Конструктивные особенности современных газобаллонных транспортных средств. Лекция № 3. Часть 6. Конструктивные особенности современных газобаллонных автобусов при работе на сжиженном углеводородном газе / В. И. Ерохов // *АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо*. – 2018. – Т. 17, № 12. – С. 534-553. – EDN VRFIQM.
3. Лукшо, В. А. Влияние организации подачи топлива на показатели работы газового двигателя, конвертированного из дизеля / В. А. Лукшо, Л. Ю. Григорьев // *Труды НАМИ*. – 2012. – № 250. – С. 22. – EDN PEWNPZ.
4. Григорьев, Л. Ю. Способы подачи газа в газовые двигатели и конструктивные схемы расположения топливоподающей аппаратуры газовых двигателей с распределенным фазированным впрыском газа / Л. Ю. Григорьев // *Труды НАМИ*. – 2013. – № 254. – С. 95-104. – EDN REOMTX.
5. Ghazi A. Karim. *Dual-Fuel Diesel engines* / Ghazi A. Karim. – CRC Press, 2015. – 287 p.
6. Кремнев, В. В. Решение теплотехнических и газодинамических задач с помощью программного комплекса FLOWVISION / В. В. Кремнев, Э. А. Савастенко // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. – 2021. – № 3(29). – EDN XMROSN.
7. Савастенко, Э. А. Разработка методики моделирования рабочего процесса дизеля Д-245 при конвертации его на газ при использовании программного комплекса FlowVision / Э. А. Савастенко, А. С. Стряпунин // *Автомобиль. Дорога. Инфраструктура*. – 2023. – № 2(36). – EDN UKMLJZ.

References

1. Shatrov M.G., Sinyavski V.V., Dunin A.Y., Shishlov I.G., Vakulenko A.V. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 383 – 395. DOI: 10.22190/FUME171004023S.
2. Erokhov V.I. *AvtoGazoZapravochnyy kompleks + Al'ternativnoye toplivo*, 2018, vol. 17, no. (12), pp. 534-553.
3. Luksho V.A., Grigoriev L.Yu. *Trudi NAMI*, 2012, no. 250, pp. 22.
4. Grigoriev L.Yu. *Trudi NAMI*, 2013, no. 254, pp. 95-104.
5. Ghazi a. Karim. *Dual-Fuel Diesel engines*, 2015, CRC Press, 287 p.
6. Kremnev V.V., Savastenko E.A. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2021, no. 3 (29).

7. Savastenko, E. A., Stryapunin A. S *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*, 2023, no. 2 (36).

Рецензент: Дунин А.Ю., д-р техн. наук, доц., МАДИ

Информация об авторах

Краснов Георгий Константинович, студент, МАДИ.

Синявский Владимир Викторович, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Савастенко Эдуард Андреевич, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Information about the authors

Krasnov Georgy K., student, MADI.

Sinyavskiy Vladimir V., Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

Savastenko Eduard A., Candidate of Sciences (Technical), associate professor, MADI.

Статья поступила в редакцию 24.05.2024; одобрена после рецензирования 06.06.2024; принята к публикации 14.06.2024.

The article was submitted 24.05.2023; approved after reviewing 06.06.2024; accepted for publication 14.06.2024.