

## УЛУЧШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУДОВОГО ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПУТЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ВНЕШНЕГО СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИМЕТИЛОВОГО ЭФИРА

*А. Ю. Грабарчук, Ш. М. Робиуззаман*

*Астраханский государственный технический университет,  
Астрахань, Российская Федерация*

В связи с растущим вниманием общественности к проблеме загрязнения атмосферы последовательно вводятся все более строгие ограничения по выбросам вредных веществ судовых ДВС. Наиболее сложным для судовладельцев является выполнение требований по нормам окислов азота в районах контроля выбросов окислов азота. В результате проведенного анализа современных методов снижения вредных выбросов  $\text{NO}_x$  судовых ДВС, широко применяемых в настоящее время, определены основные преимущества и недостатки этих методов. Предложен метод, суть которого заключается в применении системы подачи добавочного компонента в воздушный коллектор судового ДВС. Определены основные преимущества предложенной системы перед другими системами. Представлена схема работы системы и определена научная новизна текущей НИОКР, которая заключается в применении адаптированной математической модели для расчета основных параметров работы системы. На текущем этапе работы ведется разработка электронного блока управления системой, а также дополнительного электронного блока. Следующий этап работы состоит в расчете параметров работы системы и проведении испытаний разработанной системы на различных режимах дизеля 3NVD 24.

**Ключевые слова:** судовые ДВС, выбросы вредных веществ, окислы азота, диметиловый эфир, электронный блок управления.

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

### Введение

Планомерное ужесточение экологических норм в отношении морского грузового транспорта в настоящее время является крайне актуальной проблемой для судоходных и бункеровочных компаний. Связано это с растущим вниманием мировой общественности к проблеме загрязнения атмосферы судовыми двигателями, вклад которых в общий объем антропогенных выбросов куда значительней, чем кажется на первый взгляд. Вредные выбросы одного лишь крупнотоннажного судна сравнимы с теми же выбросами миллиона автомобилей.

Начиная с 2005 г. со стороны Международной морской организации ИМО (International Maritime Organization) последовательно вводятся все более строгие ограничения по выбросам вредных веществ судовых двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Ужесточение ограничений касается, с одной стороны, снижения выбросов в атмосферу, с другой стороны – расширения особых районов контроля выбросов (районы контроля выбросов оксидов серы и районы контроля выбросов окислов азота). Наиболее сложным для судовладельцев является выполнение требований по нормам выбросов окислов азота ( $\text{NO}_x$ ) в районах контроля выбросов окислов азота, т. к. снижение выбросов в данном случае требует установки на судовые ДВС особых систем снижения выбросов  $\text{NO}_x$ , требующих со стороны судовладельца дополнительных затрат.

Выбросы окислов азота, в соответствии с Правилем 13 конвенции МАРПОЛ 73/78, нормируются по удельному выбросу (полный взвешенный выброс  $\text{NO}_2$ ) в зависимости от мощности двигателя и его номинальной частоты вращения. По окислам азота утвержден график поэтапного ввода ограничений по выбросам, основанный на уровненом подходе (табл. 1) [1].

Нормы по выбросам окислов азота (NO<sub>x</sub>) судовых ДВС на территории Мирового океана

| Период действия                   | Выброс окислов азота, г/кВт·ч, при номинальной частоте вращения ( <i>n</i> ), об/мин |                                |                  |
|-----------------------------------|--|--------------------------------|------------------|
|                                   | <i>n</i> < 130   | <i>n</i> = 130–2 000           | <i>n</i> > 2 000 |
| 01.01.2000–01.01.2011 (Уровень 1) | 17,0   | 45 <i>n</i> <sup>(-0,2)</sup>  | 9,8              |
| 01.01.2011–01.01.2016 (Уровень 2) | 14,4   | 44 <i>n</i> <sup>(-0,23)</sup> | 7,7              |
| После 01.01.2016 (Уровень 3)      | 3,4  | 9 <i>n</i> <sup>(-0,2)</sup>   | 2,0              |

Ограничение по уровню 2 предусматривает сокращение выбросов окислов азота на 15,5–21,8 % по отношению к уровню 1, а ограничение по уровню 3 – на 80 % по отношению к уровню 1.

Из анализа российских и зарубежных нормативных документов, регламентирующих нормы по выбросам вредных веществ судовых ДВС, становится очевидным, что Международная конвенция МАРПОЛ 73/78 предъявляет более строгие нормы в отношении судов в районах контроля выбросов окислов азота.

Столь строгие требования к уровню выбросов окислов азота судовых ДВС являются весьма оправданными. Повышенные концентрации окислов азота в приземном слое атмосферы являются довольно вредными как для людей, так и для других живых существ. Особый вред для человека представляют собой монооксид азота (NO) и диоксид азота (NO<sub>2</sub>). Вредное воздействие монооксида азота можно сравнить с действием угарного газа (CO): вдыхание NO приводит к связыванию этого оксида с гемоглобином в крови и, в результате, к кислородному голоданию. Вредное воздействие диоксида азота заключается в его токсичности и химической активности, приводящих, с одной стороны, к серьезному отравлению при вдыхании NO<sub>2</sub>, с другой – к возникновению хронических заболеваний легких (катар верхних дыхательных путей, бронхит, воспаление легких) либо к серьезным осложнениям при наличии этих заболеваний у человека [2]. Кроме того, доказано разрушающее воздействие окислов азота на озоновый слой в стратосфере, разрушение которого является одной из самых актуальных экологических тем в мировом сообществе в последние десятилетия.

На 70-й сессии Комитета по защите морской среды ИМО утвердила поправки, связанные с приданием Северному и Балтийскому морям статуса районов контроля выбросов окислов азота с судов (NECA Tier III). В ближайшем будущем также планируется придание того же статуса Средиземному морю (рис. 1).



Рис. 1. Районы контроля выбросов окислов азота (NECA Tier III) и окислов серы (SECA)

Данные поправки являются серьезной проблемой для российских судовладельцев, эксплуатирующих свои суда (большинство из них – суда постройки до 2016 г., не отвечающие требованиям по выбросам в районах NECA Tier III) в перечисленных выше районах, следуя им, судовладельцы понесут крупные финансовые убытки [3]. В связи с этим продолжают и расширяются поисковые работы по созданию новых методов и развитию технологий для снижения выбросов вредных веществ судовых ДВС до значений, удовлетворяющих новым требованиям.

### Анализ современных методов снижения вредных выбросов $\text{NO}_x$ судовых ДВС

Среди основных групп методов снижения вредных выбросов окислов азота можно выделить следующие группы, активно применяемые в настоящее время на судах (рис. 2):

1. Улучшение конструкции дизельного двигателя.
2. Оптимизация эксплуатации дизельного двигателя.
3. Применение альтернативных топлив.
4. Применение дополнительных систем для снижения выбросов.



Рис. 2. Основные современные методы снижения вредных выбросов окислов азота ( $\text{NO}_x$ ), применяемые на судах

Улучшение конструкции и оптимизация эксплуатации дизельного двигателя – наиболее очевидные способы снижения выбросов вредных веществ, поскольку оптимизация смесеобразования, параметры рабочего цикла, техническое состояние и качество топлива напрямую влияют на уровень выбросов судовых ДВС. Тем не менее, улучшение конструкции дизельного двигателя требует серьезных изменений в судовых ДВС либо замены морально устаревшего ДВС на новый, способный обеспечивать требуемый уровень выбросов окислов азота. Все это требует больших расходов со стороны судовладельца. В особенности это касается российских судовладельцев, основная часть судов которых оснащена морально устаревшими главными и вспомогательными двигателями, не обеспечивающими требуемый уровень выбросов  $\text{NO}_x$  в районах контроля выбросов окислов азота. Оптимизация эксплуатации дизельного двигателя не требует больших расходов, но, тем не менее, не обеспечивает снижения выбросов окислов азота до уровня 3, установленного в районах НЕСА.

Применение экологически чистых альтернативных топлив является одним из эффективных способов снижения вредных выбросов, но так же, как и вышеперечисленные методы, требует больших затрат, связанных с заменой старых ДВС на другие, использующие определенное альтернативное топливо в качестве основного.

В качестве альтернативы другим методам в последнее время на судах широко применяются дополнительные системы для снижения вредных выбросов, не требующие изменений конструкции судовых ДВС, находящихся в эксплуатации. На судах нашли применение следующие системы, снижающие выбросы окислов азота до требуемого уровня:

1. Системы рециркуляции отработавших газов ДВС.
2. Системы селективного каталитического снижения выбросов.
3. Системы скрубберной очистки отработавших газов ДВС.
4. Двухтопливные системы (системы подачи добавочного компонента).

Все перечисленные системы являются довольно эффективными, обеспечивая снижение выбросов  $\text{NO}_x$  до требуемого уровня, но при этом имеют свои недостатки.

*Системы рециркуляции отработавших газов ДВС* являются простыми в конструктивном плане. Снижение выбросов окислов азота здесь обеспечивается за счет перепуска части отработавших газов из выпускного коллектора во впускной, в результате чего снижается интенсивность процесса сгорания топлива. В результате этого происходит снижение температуры сгорания топлива, что приводит к снижению выбросов  $\text{NO}_x$ . Тем не менее, данная система имеет целый ряд недостатков, в числе которых повышение расхода топлива, снижение номинальной мощности судового ДВС, а также повышение выбросов продуктов сгорания топлива, к которым относится сажа, выбросы которой также регламентированы.

*Системы селективного каталитического снижения выбросов* обеспечивают снижение выбросов окислов азота за счет химической реакции аммиака с окислами азота в присутствии катализатора, в результате которой происходит распад окислов азота на экологически чистые воду ( $\text{H}_2\text{O}$ ) и азот ( $\text{N}_2$ ). Данная система имеет целый ряд недостатков, среди которых наиболее значимыми являются высокие массогабаритные характеристики и стоимость системы, сложность доставки и хранения на судне аммиака. Также катализатор, используемый в системе, довольно уязвим в судовых условиях к окислам серы и несгоревшим топливу и маслу, содержащимся в отработавших газах.

Основным элементом *системы скрубберной очистки отработавших газов ДВС* является скруббер, в котором происходит процесс орошения отработавших газов морской или пресной водой. Данная система, аналогично системе каталитического снижения выбросов, является достаточно дорогой и громоздкой по причине необходимости установки дополнительных систем очистки отработавшей воды и шламовых танков.

*Двухтопливные системы* являются наиболее предпочтительными для применения на судах, поскольку обладают целым рядом преимуществ, среди которых относительная дешевизна систем, невысокие массогабаритные показатели, простота системы в конструктивном плане. Также данные системы требуют минимального вмешательства в конструкцию судового ДВС. С учетом этого данная система дополнительно повышает экономические характеристики дизеля, снижая расход основного топлива. Сущность двухтопливных систем заключается в применении технологии обогащения воздушного заряда, поступающего в камеру сгорания ДВС, добавочным компонентом, влияющим на внутрицилиндровые процессы сгорания топливной смеси.

Для двухтопливных систем наиболее предпочтительным добавочным компонентом является диметиловый эфир, поскольку этот горючий газ по своим свойствам горения наиболее близок к дизельному топливу (по температуре воспламенения и цетановому числу), тем самым обеспечивая более равномерное сгорание топливной смеси. Основным эффектом снижения выбросов окислов азота вызван тем, что температура подаваемого диметилэфира ниже температуры окружающего воздуха, что приводит к снижению температуры сгорания топливной смеси в камере сгорания ДВС. Также одной из особенностей применения диметилэфира является его высокая способность к окислению благодаря наличию кислорода в молекуле [4].

### **Предлагаемый вариант системы подачи диметилового эфира в воздушный коллектор судового ДВС**

Прототип системы подачи диметилового эфира в воздушный коллектор судового ДВС был испытан в рамках предыдущих исследований [5] по разработанной методике испытаний судового дизеля 3NVD 24 (рис. 3).



Рис. 3. Судовой дизель 3NVD 24 (3Ч17,5/24)

Основные технические данные данного двигателя представлены в табл. 2.

Таблица 2

#### Основные технические характеристики дизеля 3NVD 24

| Параметр                                      | Единица измерения | Значение   |
|---|-------------------|------------|
| Номинальная эффективная мощность              | кВт               | 16         |
| Номинальная частота вращения                  | об/мин            | 630        |
| Среднее эффективное давление                  | МПа               | 0,535      |
| Максимальное давление сгорания                | МПа               | 5,2        |
| Средняя скорость поршня                       | м/с               | 5,05       |
| Степень сжатия                                | –                 | 14,85      |
| Диаметр цилиндра                              | мм                | 175        |
| Ход поршня                                    | мм                | 220        |
| Удельный расход топлива на номинальном режиме | г/(кВт·ч)         | 245 ± 10 % |
| Расход воздуха                                | кг/ч              | 86,47      |

Подача диметилэфира осуществлялась на трех режимах работы системы: при подаче 0, 25 и 50 % диметилэфира в общей массе топливной смеси. Результаты испытаний показали положительное воздействие подаваемого диметилэфира на экологические характеристики дизеля. Концентрация монооксида азота (NO) при подаче диметилэфира снижалась на 35 %. Общая концентрация окислов азота при этом (NO<sub>x</sub>) снижалась на 6 %. Также удельный расход дизельного топлива снижался на 13,1 % в зависимости от режима подачи диметилэфира [6].

Схема работы системы: сжиженный диметилэфир под давлением из баллона 1 подается дозирующей электромагнитной форсункой 5 в воздушный коллектор дизеля, где происходит внешнее смесеобразование, и поступает в камеру сгорания, где затем смешивается с дизельным топливом, поступающим непосредственно в камеру сгорания дизеля (рис. 4).

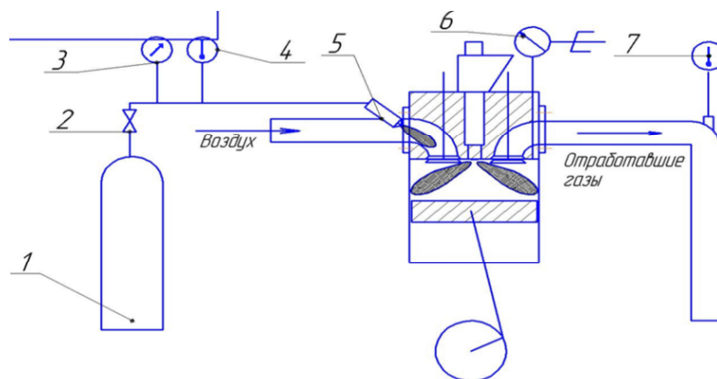


Рис. 4. Принципиальная схема системы подачи диметилового эфира в воздушный коллектор дизеля:

1 – баллон; 2 – запорный клапан; 3 – манометр; 4 – датчик температуры газообразного топлива; 5 – электромагнитная форсунка; 6 – датчик давления; 7 – датчик температуры отработавших газов

Целью текущей научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы (НИОКР) является снижение выбросов окислов азота судовых ДВС до значений, не превышающих требуемые в районах контроля выбросов окислов азота, путем модернизации испытанного ранее прототипа системы подачи диметилового эфира в воздушный коллектор судового ДВС для подачи на различных режимах его работы заданного количества диметилэфира, обеспечивающего наименьший выброс окислов азота.

Научная новизна работы заключается в применении адаптированной математической модели образования окислов азота на основе термического механизма Зельдовича. Расчетно-экспериментальный метод определения соотношений основного и добавочного топлив и параметров их впрыска с применением данной модели в сравнении с простым экспериментальным подбором параметров позволит получить наиболее точные исходные параметры, обеспечивающие наибольшее снижение выбросов окислов азота.

### **Разработка электронного блока управления системой**

На текущем этапе НИОКР ведется разработка электронного блока управления системой на базе программируемого контроллера STM32F103C8 фирмы STMicroelectronics. Его основное назначение – получение и обработка данных с датчиков и управление моментом и временем открытия электромагнитной форсунки. Планируется применять в составе измерительного модуля следующие датчики:

- пьезоэлектрический датчик динамического давления PS01 для измерения давления газов в цилиндре дизеля;
- датчик давления МИДА на 10 МПа, также для измерения давления газов в цилиндре дизеля;
- датчик давления МИДА на 160 МПа для измерения давления дизельного топлива перед форсункой;
- датчик подъема иглы форсунки;
- инкрементальный энкодер, определяющий угол поворота коленчатого вала дизеля;
- датчик верхней мертвой точки для обнуления значений энкодера;
- датчик давления МИДА на 16 МПа для измерения давления диметилэфира в системе.

Также, в дополнение к основному электронному блоку управления, планируется использовать электронный блок на базе программируемого микроконтроллера ATmega2560 для отслеживания и регистрации данных о температуре воды в контурах охлаждения, а также воздуха, поступающего в воздушный коллектор, и воздуха после форсунок, подающих диметилэфир. Для измерения температур планируется использовать цифровые датчики температуры DS18B20, позволяющие с высокой точностью измерять температуру в относительно низкотемпературных контурах ДВС.

На настоящий момент уже проведены предварительные испытания дизеля 3NVD 24 без подачи диметилэфира, в ходе которых была проверена работа электронного блока управления системой и работа дополнительного электронного блока.

### **Заключение**

Проводимые в настоящее время исследования позволят применять системы подачи диметилового эфира в воздушный коллектор для любого судового дизеля мощностью до 10 000 кВт. Адаптированная математическая модель позволит рассчитать параметры работы системы индивидуально для каждого судового ДВС. Следующий этап работы состоит в расчете параметров работы системы на всех режимах работы судового ДВС и проведении испытаний разработанной системы на различных режимах дизеля 3NVD 24 по нагрузочной характеристике. По завершении работы в случае положительных результатов испытаний будет рассматриваться возможность сертификации и получения одобрения классификационными обществами для дальнейшего внедрения системы на суда российского флота.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Приложение VI к МАРПОЛ 73/78. Правила предотвращения загрязнения атмосферы с судов. СПб.: ЗАО «ЦНИИМФ», 2012. 87 с.
2. Демьянцева Е. А., Шваб Е. А., Реховская Е. О. Механизм образования и негативное влияние выбросов, содержащих оксиды азота // Молодой ученый. 2017. № 2 (136). С. 231–234.
3. Резолюция МЕРС 251(66). Поправки к Приложению VI к Конвенции МАРПОЛ и техническому Кодексу по NO<sub>x</sub> 2008 года. URL: <https://base.garant.ru/71849854/> (дата обращения: 27.03.2021).

4. Гимаева А. Р., Фаттахов М. М., Мاستобаев Б. Н. Особенности производства диметилового эфира и его использование в качестве перспективного моторного топлива // Нефтегазовое дело. 2015. № 3. Т. 13. С. 55–58.

5. Покусаев М. Н., Джихинто Г. А., Виноградов С. В. Результаты испытания судового дизеля ЗЧ17,5/24 при использовании диметилового эфира в качестве присадки к воздуху // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. 2008. № 2 (43). С. 156–159.

6. Покусаев М. Н., Дорохов А. Ф., Зубарев А. С., Грабарчук А. Ю. Система подачи диметилового эфира во всасывающий коллектор дизельного двигателя 1Ч17,5/24 // Морские интеллектуальные технологии. 2018. № 4 (42). Т. 4. С. 94–99.

Статья поступила в редакцию 26.04.2021

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Александр Юрьевич Грабарчук** – аспирант кафедры эксплуатации водного транспорта; Астраханский государственный технический университет; Россия, 414056, Астрахань; alex45678@mail.ru.

**Шагор Мухаммед Робиуззаман** – студент, специальность «Эксплуатация судовых энергетических установок»; Астраханский государственный технический университет; Россия, 414056, Астрахань; shagor23@mail.ru.



## IMPROVING MARINE DIESEL ENGINE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE BY CARBURATION OF DIMETHYL ETHER IN INLET MANIFOLD

*A. Yu. Grabarchuk, Sh. M. Robiuzzaman*

*Astrakhan State Technical University,  
Astrakhan, Russian Federation*

**Abstract.** The article highlights the measures to be introduced in order to restrict the hazardous emissions from the marine vessels as a result of increasing attention of the global community to the air pollution problem. The most difficult for ship owners is to adhere to the requirements of MARPOL 73/78 in NECA Tier III. As a result of the analysis of modern widely used methods for reducing harmful emissions of nitrogen oxides from a marine ICE there have been determined the main advantages and disadvantages of these methods. A new method including the additional component supply system, which delivers additional component to an inlet manifold of a marine ICE, and the most suitable additional component were proposed. Main advantages of the proposed system over other systems were determined. The system operation diagram is presented and the academic novelty of the scientific work was determined. The academic novelty consists in using an adapted mathematical model for calculating the main parameters of the system developed. At the current stage of the work, the development of an electronic control unit for the system and additional electronic control unit is in progress. The next stage of the work consists of calculating the main parameters of the system and testing the system in various operating modes of marine diesel engine 3NVD 24.

**Key words:** marine ICE, hazardous substances emissions, nitrogen oxides, dimethyl ether, electronic control unit.

**For citation:** Grabarchuk A. Yu., Robiuzzaman Sh. M. Improving marine diesel engine environmental performance by carburation of dimethyl ether in inlet manifold. *Vestnik of Astrakhan State Technical University*. 2021;1 (71):36-43. (In Russ.) DOI: 10.24143/1812-9498-2021-1-36-43.

REFERENCES

1. Prilozhenie VI k MARPOL 73/78. *Pravila predotvrashcheniia zagriazneniia atmosfery s sudov* [Annex VI to MARPOL 73/78. Regulations for Prevention of Air Pollution from Ships]. Saint-Petersburg, ZAO «TsNIIMF» Publ., 2012. 87 p.
2. Dem'iantseva E. A., Shvab E. A., Rekhovskaia E. O. Mekhanizm obrazovaniia i negativnoe vliianie vybrosov, sodержashchikh oksidy azota [Mechanism of formation and negative impact of emissions containing nitrogen oxides]. *Molodoi uchenyi*, 2017, no. 2 (136), pp. 231-234.
3. Rezoliutsiia MERS 251(66). *Popravki k Prilozheniiu VI k Konventsii MARPOL i tekhnicheskomu Kodeksu po NOx 2008 goda* [Resolution MEPC 251 (66). Amendments to MARPOL Annex VI and the 2008 NO<sub>x</sub> Technical Code]. Available at: <https://base.garant.ru/71849854/> (accessed: 27.03.2021).
4. Gimaeva A. R., Fattakhov M. M., Mastobaev B. N. Osobennosti proizvodstva dimetilovogo efira i ego ispol'zovanie v kachestve perspektivnogo motornogo topliva [Characteristics of dimethyl ether production and using it as promising motor fuel]. *Neftegazovoe delo*, 2015, no. 3, vol. 13, pp. 55-58.
5. Pokusaev M. N., Dzhikhinto G. A., Vinogradov S. V. Rezul'taty ispytaniia sudovogo dizelia ZCh17,5/24 pri ispol'zovanii dimetilovogo efira v kachestve prisadki k vozdukhу [Results of marine diesel engine ZCh17,5/24 tests by using dimethyl ether as an air additive]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, no. 2 (43), pp. 156-159.
6. Pokusaev M. N., Dorokhov A. F., Zubarev A. S., Grabarchuk A. Iu. Sistema podachi dimetilovogo efira vo vsasyvaiushchii kollektor dizel'nogo dvigatel'ia 1Ch17,5/24 [Dimethyl ether supply system to intake manifold of diesel engine 1Ch17.5 / 24]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*, 2018, no. 4 (42), vol. 4, pp. 94-99.

The article submitted to the editors 26.04.2021

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Alexander Yu. Grabarchuk** – Postgraduate Student of the Department of Water Transport Operation; Astrakhan State Technical University; Russia, 414056, Astrakhan; alex45678@mail.ru.

**Shagor M. Robiuzzaman** – Student, specialty “Water Transport Operation”; Astrakhan State Technical University; Russia, 414056, Astrakhan; shagor23@mail.ru.

