

УДК 621.822.741.1

DOI: 10.30987/article\_5ba8a18c3524e8.26206454

С.П. Шец, А.О. Горленко

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МОМЕНТ ТРЕНИЯ И ГЕРМЕТИЗИРУЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Исследовано влияние магнитного поля на момент трения магнитных жидкостей (МЖ) в соединении «вал – втулка» в зависимости от частоты вращения вала. Определены величины давления пробоя магнитных жидкостей в зазоре «вал – полюсный наконечник» в зависимости от частоты вращения вала и временного фактора. Для оценки устойчивости МЖ

предложен коэффициент стабильности, который способен учитывать структурные изменения МЖ во времени.

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, момент трения, частота вращения вала, магнитное поле, герметичность, уплотнение.

S.P. Shets, A.O. Gorlenko

## INVESTIGATION OF MAGNETIC FIELD IMPACT UPON FRICTION MOMENT AND SEALING ABILITY OF MAGNETIC LIQUIDS

A magnetic field impact upon a friction moment of magnetic liquids (ML) in a “shaft-bush” joint depending upon shaft rotation frequency is analyzed. There are defined pressure values of magnetic liquid breakdown in a “shaft-pole terminal” gap depending upon shaft rotation frequency and a time factor. For the assessment of ML

stability there is offered a factor of stability which can take into account ML structural changes in the course of time.

**Key words:** magnetic fluid, friction moment, shaft rotational frequency, magnetic field, tightness, sealing.

### Введение

Одной из важнейших особенностей развития техники на современном этапе является создание искусственных материалов с заданными свойствами и применение их в различных технических устройствах. Магнитные жидкости (МЖ) относятся к новым техническим материалам, использование которых при разработке конструкций и технологий обеспечивает дальнейший технический прогресс. МЖ представляет собой взвесь мелких магнитных частиц в жидкостях-носителях. Такие МЖ макроскопически однородны, не расслаиваются в магнитных и гравитационных полях неограниченное время. От обычных жидкостей МЖ отличаются сильными магнитными свойствами, что сделало их перспективным материалом для технических приложений [1]. Физические свойства МЖ зависят от характеристик магнитного поля и могут изменяться в широких пределах. Практически все МЖ в качестве ферромагнитных микрочастиц содержат частицы размером до 0,01 мкм.

Для предотвращения агрегатирования частиц их покрывают молекулами поверхностно-активных веществ (ПАВ). Большинство МЖ относятся к непроводящим средам. При этом механизмы воздействия наложенного магнитного поля на МЖ связаны только с ее собственным магнитным моментом, который появляется во внешнем поле. Довольно часто взаимодействие поля с намагниченной жидкостью можно отнести к квазистационарному, когда время установления равновесного значения намагниченности намного меньше любого макроскопического времени. МЖ применяются для смазывания пар трения, функционирующих как при гидродинамической, так и при граничной смазке [2], а в некоторых узлах технических устройств МЖ может выполнять одновременно две функции: герметизации и смазки рабочих поверхностей [3;4]. Физические свойства МЖ имеют существенное значение при решении проблемы целесообразности применения МЖ в качестве уплотняющего

и смазывающего материала в конструкции

различных технических устройств.

### Материалы, методы, результаты исследований

В большинстве магнитожидкостных устройств МЖ находятся под постоянным воздействием магнитного поля. Именно поэтому устойчивость магнитных жидкостей в постоянных и переменных магнитных полях является одним из важнейших факторов, определяющих возможность их практического использования и ресурс эксплуатации [5].

Выбор типа МЖ для исследования осуществлялся исходя из области их практического применения. Жидкости на основе минеральных масел (индустриальные, вазелиновые, турбинные, трансформаторные и вакуумные нефтяные масла) применяются в подшипниках скольжения и качения, зубчатых передачах и других узлах, в которых требуется высокая смазочная способность МЖ. Кремнийорганические жидкости - полиметилсилоксановые (ПМС), полиэтилсилоксановые (ПЭС) и полифенилметилсилоксановые (ПФМС) - применяются для уплотнений, работающих в области низких температур и в вакууме. Жидкости на основе фторорганических соединений используются в основном в уплотнениях для химического оборудования - вследствие особенностей химического взаимодействия с водой, водными растворами и минеральными маслами.

Для исследования были выбраны три типа МЖ, отличающиеся по составу жидкостей-носителей:

- 1) МЖ-17 – на основе минерального масла;
- 2) МЖ-20 – на основе кремнийорганической (силиконовой) жидкости ПЭС-5;
- 3) МЖ-31 – на основе фторорганических соединений.

Одним из важнейших параметров магнитожидкостных устройств является момент трения  $M_T$ , который влияет на величины передаваемых моментов и мощности. На момент трения  $M_T$  магнитожидкостного устройства влияют вязкость используемой магнитной жидкости, напряженность магнитного поля, градиент скорости сдвига в рабочем зазоре устройства, величина рабочего зазора, включающая величины шероховатости поверхностей деталей, контактирующих с магнитной жидкостью [6].

Исследование физических свойств МЖ и их влияния на момент трения  $M_T$  в соединении «вал – втулка» в зависимости от индукции магнитного поля  $B$  (магнитное поле переменное) и частоты вращения вала проводилось на экспериментальной установке [7] по схеме испытаний, представленной на рис. 1.

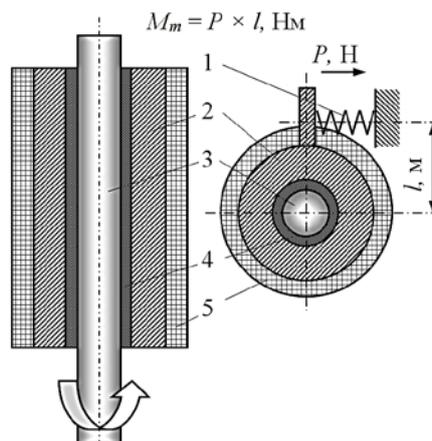


Рис. 1. Схема испытаний: 1 – устройство фиксации; 2 – втулка; 3 – вал; 4 – исследуемая МЖ; 5 – соленоид

Исследования МЖ (рис. 1, поз. 4), находящейся в зазоре «вал – втулка» и

удерживаемой магнитным полем, создаваемым соленоидом (рис. 1, поз. 5), прово-

дились со следующими геометрическими размерами деталей в диапазонах значений изменяемых параметров:

– вал диаметром  $d_{\text{вал}} = 16 \pm 0,05$  мм, изготовленный из стали 45 (ГОСТ 1050-88);

– втулка внутренним диаметром  $d_{\text{вт}} = 18 \pm 0,05$  мм, изготовленная из меди МЗ (ГОСТ 859-78);

– частота вращения вала  $n_{\text{вала}} = 0 \dots 2800$  мин<sup>-1</sup>;

– индукция магнитного поля  $B = 0 \dots 1,0$  Тл;

– температура узла трения  $T = 20 \dots 30$  °С.

Результаты исследований по определению момента трения  $M_T$  в зависимости от частоты вращения вала 3 во втулке 2 (рис. 1) подшипникового узла для трех типов магнитных жидкостей после математической обработки представлены на рис. 2.

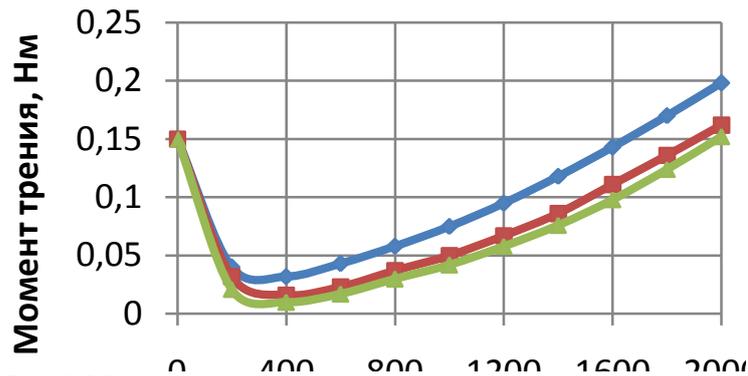


Рис. 2. Момент трения при постоянной величине индукции магнитного поля  $B = 0,6$  Тл

Исследования показали тенденцию снижения момента трения для МЖ в среднем до  $0,02 \dots 0,04$  Нм в диапазоне малых частот вращения вала подшипникового узла (порядка  $400 \dots 800$  мин<sup>-1</sup>) при постоянной индукции магнитного поля  $B = 0,6$  Тл.

При повышении частоты вращения вала происходит увеличение момента трения, что связано с изменением структурных составляющих МЖ. Однако значение момента трения для магнитной жидкости

на основе минерального масла МЖ-17 несколько ниже, чем у МЖ-20 и МЖ-31. Из этого следует, что при эксплуатации узлов трения с МЖ-17 потери мощности будут меньше, чем при МЖ-20 и МЖ-31.

Влияние индукции магнитного поля на момент трения в подшипниковом узле экспериментальной установки, заправленном исследуемой МЖ, при постоянной частоте вращения вала представлено на рис. 3.

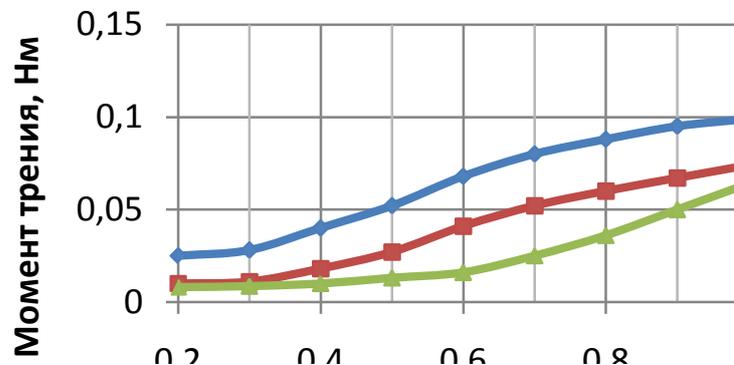


Рис. 3. Момент трения при постоянной частоте вращения вала  $n = 800$  мин<sup>-1</sup>

При повышении индукции магнитного поля от  $0,2$  до  $1,0$  Тл при постоянной

частоте вращения вала  $800$  мин<sup>-1</sup> для всех трех типов магнитных жидкостей наблю-

дается плавное увеличение момента трения в среднем от 0,03 до 0,09 Нм. Такое увеличение момента трения объясняется изменением вязкости МЖ при повышении индукции магнитного поля.

Исследования показали, что МЖ-17 на основе минерального масла обладает лучшей смазывающей способностью, а также меньшей динамической вязкостью, чем МЖ-20 и МЖ-31. Поэтому МЖ-17, в отличие от МЖ-20 и МЖ-31, может применяться в технических устройствах при

более высоких частотах вращения валов: она при равных условиях обладает меньшей вязкостью и будет иметь меньшие потери на трение.

Исследование герметизирующих свойств МЖ (величины давления пробоя) в зазоре «вал – полюсный наконечник» при постоянном магнитном поле (постоянный магнит) в зависимости от частоты вращения вала и времени работы проводилось с использованием стенда [7] по схеме испытаний, показанной на рис. 4.

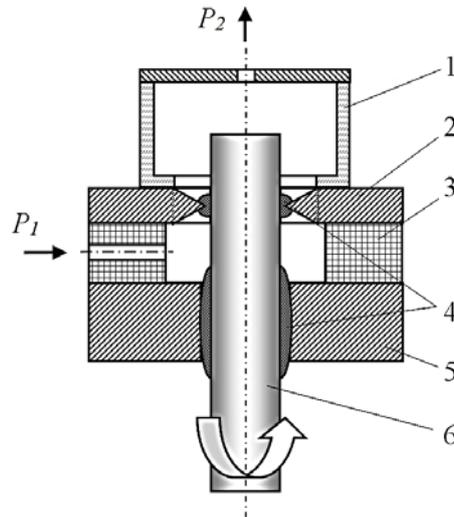


Рис. 4. Схема испытаний: 1 – стеклянный корпус; 2 – однозубцовый полюсный наконечник; 3 – магнит; 4 – МЖ; 5 – пятизубцовый полюсный наконечник; 6 – вал

Исследования опытных образцов МЖ проводились с использованием стенда для проверки на герметичность магнитожидкостных уплотнений однополюсного исполнения.

Герметизирующая способность МЖ в зависимости от времени работы уплотнения определялась следующим образом:

– МЖ наносилась в зазор верхнего однозубцового и нижнего пятизубцового полюсов;

– величина давления пробоя определялась в статике и динамике (при неподвижном и вращающемся вале) опрессовкой жидким азотом с периодичностью по 38 раз в течение 366 ч.

За критерий оценки устойчивости для МЖ был принят коэффициент стабильности  $K_{СТ}^t$ , который рассчитывался по формуле

$$K_{СТ}^t = \frac{P_{\max} - P_t}{P_t} 100,$$

где  $P_{\max}$  – максимальное давление пробоя (давление пробоя, зафиксированное после 30 мин испытания), МПа;  $P_t$  – давление пробоя (давление после времени  $t$  испытания), МПа.

Коэффициент стабильности определялся после 366 ч работы исследуемой МЖ.

Результаты испытаний МЖ представлены в таблице.

МЖ может быть рекомендована для использования в том случае, если ее коэффициент стабильности не будет превышать 5% по окончании испытаний. Гистограммы изменения коэффициента стабильности МЖ в сравнении со стандартным показателем представлены на рис. 5.

Таблица

## Результаты испытаний

Уплотнительно-смазочный материал	Показатель		
	Максимальное давление пробоя $P_{\max}$ (после 0,5 ч работы), МПа	Давление пробоя $P_{t=366ч}$ (после 366 ч работы), МПа	Коэффициент стабильности (после 366 ч работы) $K_{СТ}^{366} = \frac{P_{\max} - P_{t=366}}{P_{t=366}} 100$
МЖ-17	0,0570	0,0566	0,7
МЖ-20	0,0631	0,0578	9,1
МЖ-31	0,0442	0,0398	11,1

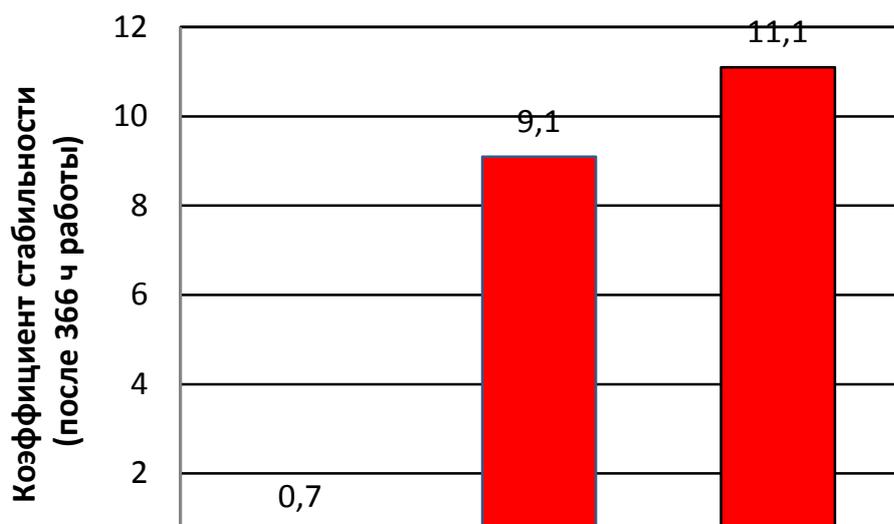


Рис. 5. Гистограммы изменения коэффициента стабильности МЖ в сравнении со стандартным показателем

**Обсуждение результатов**

Так как все МЖ состоят из трех основных компонентов - ПАВ (молекулы), дисперсной среды (жидкость-носитель) и дисперсной фазы (твердые частицы) [8], то механизм воздействия наложенного магнитного поля на МЖ обусловлен ее структурой. Магнитное поле, создаваемое соленоидом, воздействует на твердые частицы дисперсной фазы, приводя их во вращательное движение, или наоборот, тормозит их вращение. Частицы передают это воздействие прилегающим слоям жидкости-носителя. Далее оно посредством вязкого трения распространяется по жидкой фазе. Очевидно, что вынужденное течение жидкости, в свою очередь, может также влиять на взаимодействие поля и частиц [9].

МЖ, в отличие от традиционных смазочных материалов, содержат сильно-магнитные дисперсные частицы, энергия которых в магнитном поле сравнима с тепловой энергией. Поэтому в переменном магнитном поле возможно перераспределение частиц по объему вещества [10].

Способность МЖ обеспечивать герметичность технических устройств определяется не только ее свойствами, но и агрегатным составом. Герметизирующую способность магнитного смазочного материала, находящегося под действием магнитного поля, можно оценить величиной коэффициента стабильности, методом сопоставления его со стандартными значениями.

**Выводы**

1. Момент трения для всех типов исследуемых магнитных жидкостей является

оптимальным в диапазоне изменения частот вращения вала от 400 до 1200 мин<sup>-1</sup> и

индукции магнитного поля от 0,2 до 0,6 Тл. При таких условиях момент трения изменяется от 0,02 до 0,15 Нм и не вызывает значительных изменений структуры магнитных жидкостей, а также потерь мощности при повышении динамической вязкости МЖ.

2. Коэффициент стабильности исследуемых МЖ не соответствует стандартному показателю, за исключением МЖ-17. Это означает, что в процессе эксплуатации эти смазочные материалы могут потерять

стабильность (не обеспечивать герметичность узла трения и даже коагулировать) при наработках ниже заданных значений.

3. Магнитная жидкость МЖ-17, состоящая из магнетика (18%), карбонильного железа (16%) и минерального масла, обладает высокой устойчивостью к воздействию временного фактора и может быть применена в технических устройствах в качестве смазочно-герметизирующего материала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арефьев, И.М. Физические свойства технических магнитных жидкостей из Иваново и Николаева / И.М. Арефьев, Т.А. Арефьева, А.В. Родионов, А.В. Лебедев // 16-я Международная Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям: сб. тр. междунар. науч. конф. - Иваново: ИГЭУ, 2014. - С. 39-44.
2. Болотов, А.Н. Магнитное масло для узлов трения, работающих при граничной смазке / А.Н. Болотов, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Трение и смазка в машинах и механизмах. - 2011. - № 9. - С. 27-32.
3. Сучилин, В.А. Применение магнитной жидкости в технологиях сервиса транспортных средств / В.А. Сучилин, И.Э. Грибут, С.А. Голиков // Электротехнические и информационные комплексы и системы. - 2011. - Т. 7. - № 4. - С. 41-45.
4. Топоров, А.В. Новые конструкции комбинированных магнитожидкостных уплотнений / А.В. Топоров, В.А. Полетаев, А.А. Покровский, В.В. Киселев, П.В. Пучков, В.П. Зарубин // 17-я Международная Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям: сб. тр. междунар. науч. конф. - Иваново: ИГЭУ, 2016. - С. 421-429.
5. Арефьев, И.М. Исследование устойчивости магнитной жидкости на основе керосина в магнитных полях / И.М. Арефьев, Т.А. Арефьева, Ю.И. Страдомский, Ю.Б. Казаков // 16-я Международная Плесская научная конференция по нанодисперсным магнитным жидкостям: сб. тр. междунар. науч. конф. - Иваново: ИГЭУ, 2014. - С. 140-144.
6. Полетаев, В.А. Исследование моментов трения в рабочем зазоре герметизаторов при использовании разных типов магнитных жидкостей / В.А. Полетаев, Т.А. Пахолкова // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. - 2012. - № 4. - С. 35-38.
7. Шец, С.П. Повышение износостойкости подшипниковых узлов трения машин и механизмов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04 / С.П. Шец. - Брянск, 2011. - 34 с.
8. Сизов, А.П. Магнитные жидкости в узлах трения / А.П. Сизов, Е.В. Сергеев, Д.Г. Снегирев // Физика, химия и механика трибосистем. - 2011. - № 10. - С. 168-169.
9. Шец, С.П. Влияние наложенного магнитного поля на работоспособность магнитной жидкости, применяемой в качестве смазочного материала в узлах трения / С.П. Шец // Контактная жёсткость. Износостойкость. Технологическое обеспечение: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. (г. Брянск, 22-24 окт. 2003 г.) / под общ. ред. А.Г. Сулова. - Брянск: БГТУ, 2003. - С. 71-72.
10. Болотов, А.Н. Влияние магнитного поля на структуру и смазочные свойства наноструктурного магнитного масла / А.Н. Болотов, Г.Б. Бурдо, В.В. Новиков, О.О. Новикова // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. - 2015. - № 7. - С. 137-141.
1. Arefiev, I.M. Physical properties of engineering magnetic liquids from Ivanovo and Nikolaev / I.M. Arefiev, T.A. Arefieva, A.V. Rodionov, A.V. Lebedev // *The XVI-th Inter. Pless Scientific Conf. on Nano-dispersal Magnetic Liquids: Proceedings of the Inter. Scientific Conf.* - Ivanovo: ISEU, 2014. - pp. 39-44.
2. Bolotov, A.N. Magnetic oil for friction units operating at boundary lubricant / A.N. Bolotov, V.V. Novikov, O.O. Novikova // *Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms*. 2011. - No.9. - pp. 27-32.
3. Suchilin, V.A. Magnetic liquid use in technologies of vehicle service / V.A. Suchilin, I.E. Gribut, S.A. Golikov // *Electro-technical and Information Complexes and Systems*. - 2011. - Vol.7. - No.4. - pp. 41-45.
4. Toporov, A.V. New designs of combined magnetic liquid seals / A.V. Toporov, V.A. Poletae, A.A. Pokrovsky, V.V. Kiselyov, P.V. Puchkov, V.P. Zharubin // *the XVII-th Inter. Pless Scientific Conf. on*

- Nano-dispersal Liquids: Proceedings of the Inter. Scientific Conf.* – Ivanovo: ISEU, 2016. – pp. 421-429.
5. Arefiev, I.M. Investigations of magnetic liquid stability based on kerosene in magnetic fields / I.M. Arefiev, T.A. Arefieva, Yu.I. Stradomsky, Yu.B. Kazakov // *The XVI-th Inter. Pless Scientific Conf. on Nano-dispersal Magnetic Liquids: Proceedings of the Inter. Scientific Conf.* – Ivanovo: ISEU, 2014, – pp. 140-144.
  6. Poletaev, V.A. Investigations of friction moments in a working gap of hermetic matters using different kinds of magnetic liquids / V.A. Poletaev, T.A. Pakholkova // *Bulletin of Ivanovo State Energy University.* – 2012. – No.4. – pp. 35-38.
  7. Shets, S.P. Wear-resistance increase in friction bearing units of machines and mechanisms: *Author's Abstract of the Thesis for Dr. Sc.Tech. Degree: 05.02.04* / S.P. Shets. – Bryansk, 2011. – pp. 34.
  8. Sizov, A.P. Magnetic liquids in friction units / A.P. Sizov, E.V. Sergeev, D.G. Snegiryov // *Physics, Chemistry and Mechanics of Tribo-systems.* – 2011. – No.10. – pp. 168-169.
  9. Shets, S.P. Super-positioned magnetic field impact upon working capacity of magnetic liquid used as lubricant in friction units / S.P. Shets // *Contact Rigidity. Wear-resistance. Technological Support: Proceedings of the Inter. Scientific tech. Conf.* (Bryansk, October 22-24, 2003)/ under the general editorship of A.G. Syslov. – Bryansk: BSTU: BSTU, 2003. – pp. 71-72.
  10. Bolotov, AN. Magnetic field impact upon structure and lubrication properties of nano-structural magnetic oil / A.N. Bolotov, G.B. Burdo, V.V. Novikov, O.O. Novikova // *Physical-Chemical Aspects of study clusters, nano-structures and nano-materials.* – 2015. – No.7. – pp. 137-141.

*Статья поступила в редакцию 23.04.18.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного  
технического университета  
Бишутин С.Г.*

*Статья принята к публикации 14.05.18.*

#### Сведения об авторах:

**Шец Сергей Петрович**, д.т.н., зав. кафедрой «Автомобильный транспорт» Брянского государственного технического университета, e-mail: [shetssp@mail.ru](mailto:shetssp@mail.ru).

**Shetz Sergey Petrovich**, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department. Department of Automobile Transport of Bryansk State Technical University, e-mail: [shetssp@mail.ru](mailto:shetssp@mail.ru).

**Горленко Александр Олегович**, д.т.н., профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Брянского государственного технического университета, e-mail: [bugi12@bk.ru](mailto:bugi12@bk.ru).

**Gorlenko Alexander Olegovich**, Doctor of Engineering Science, Professor of the Department "Automotive Transport" of Bryansk State Technical University, e-mail: [bugi12@bk.ru](mailto:bugi12@bk.ru).