

УДК 62-272.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОИЗОЛЯТОРА С КВАЗИНУЛЕВОЙ  
ЖЕСТКОСТЬЮ ТАРЕЛЬЧАТОЙ ФОРМЫ  
ДЛЯ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

**STUDY OF VIBRATION ISOLATORS WITH QUASI-ZERO RIGIDITY  
OF THE BELLEVILLE FORM FOR FUEL AND ENERGY COMPLEX**

Валеев А.Р., Харисов Ш.А., Зотов А.Н., Саубанов О.М.  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»,  
г. Уфа, Российская Федерация

A.R. Valeev, Sh.A. Harisov, A.N. Zotov, O.M. Saubanov  
FSBEI NPE "Ufa state petroleum technological university", Ufa, Russian Federation

e-mail: anv-v@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности систем с квазинулевой жесткостью при их практической реализации. Произведена оценка существующих прототипов виброизоляторов с квазинулевой жесткостью, выявлены их недостатки.

Представлен авторский виброизолятор с квазинулевой жесткостью тарельчатой формы. Определена силовая характеристика, проведены экспериментальные исследования при помощи виброанализатора колебаний. Исследовался уровень виброскорости испытательного стенда при использовании разработанных виброизоляторов с квазинулевой жесткостью, виброизоляторов из резины и виброизоляторов из полиуретана. Выявлено, что эффективность применения разрабатываемых виброизоляторов с квазинулевой жесткостью в два раза выше по сравнению с традиционными упругими виброизоляторами из полиуретана и в три раза по сравнению с резиновой амортизирующей прокладкой.

В результате исследований было выяснено, что разработанный авторами виброизолятор обладает повышенными параметрами благодаря особенной форме и специально выбранному материалу.

Проведенный ряд теоретических и экспериментальных работ показывает эффективность виброзащитных свойств виброизолятора с квазинулевой жесткостью тарельчатой формы.

**Abstract.** The article describes the features of systems with quasi-zero stiffness in their practical implementation. Existing prototypes with quasi-zero stiffness vibration isolators were analyzed.

Authors have presented vibration isolator with quasi-zero stiffness of the diaphragm shape. It's power characteristics have been defined, experimental studies

using vibration analyzer vibration have been made. The vibration level of experiment installation with designed vibration isolators, rubber vibration isolators and polyurethane vibration isolators was analyzed. It was established that the efficiency of the developed isolators with quasi-zero stiffness in two times higher compared to conventional polyurethane elastic isolators and three times as compared with the damping rubber gasket.

As a result, studies have found that the vibration isolator developed by the authors has increased parameters thanks to a special form and the specific material.

The series of theoretical and experimental work shows the efficiency of vibration isolator with quasi-zero stiffness dished shape.

**Ключевые слова:** виброизоляция, виброизолятор, квазинулевая жесткость, нефтеперекачивающий агрегат, топливно-энергетический комплекс, полиуретановая резина холодного застывания.

**Keywords:** vibration, vibration isolator, quasi-zero stiffness, oil pumping unit, Fuel and Energy Complex, cold hardening polyurethane elastomer.

На сегодняшний день большинство предприятий топливно-энергетического комплекса России эксплуатируют нефте- и газоперекачивающие агрегаты (НГА) с давно отработанным ресурсом. По мере своей работы агрегаты и подводящие к ним трубопроводы постоянно испытывают ряд динамических нагрузок, которые негативно влияют на их надежность и эффективность эксплуатации. Наиболее пагубной нагрузкой для них является повышенная вибрация.

Основным источником вибрации на НГА, как правило, является увеличенный дисбаланс ротора. К источникам вибрации также можно отнести неправильно установленные и плохо отрегулированные подшипники валов, а также неравномерную нагрузку на основание НГА вследствие разбалансировки фундаментальных болтов.

Повышенная вибрация насосно-трубных систем может вызвать просадку и ухудшение несущих способностей фундаментов и опор трубопроводов, потере герметичности рабочих узлов и передачу на корпус дополнительных нерасчетных механических напряжений, превышающих допустимые в десятки раз, что в общем итоге может привести к отказу двигателя и стать причиной аварии. [1]

На данный момент существует множество методов уменьшения негативных динамических воздействий на перекачивающее оборудование. Прежде всего, это применение различных виброизоляционных систем. К таким системам можно отнести традиционные виброизоляторы (тросовые, пружинные, резиновые), различные вибродемпфирующие опоры, компенсаторы и т.д. Однако перечисленные системы имеют ряд существенных недостатков. Например, виброизоляторы с линейной силовой характеристикой, такие как пружины и резиновые виброизоляторы, обладают малой жесткостью и значительной

просадкой. К примеру, чтобы обычный пружинный амортизатор имел частоту собственных колебаний 1 Гц, он должен иметь просадку 25 см, следовательно, длина такой пружины составит метр и более, что нереально при практическом использовании. Также такие виброизоляторы имеют собственную частоту колебаний обычно не менее 8 Гц, поэтому не могут высококачественно противодействовать вибрациям с частотами более 16 Гц [2].

Стоит отметить, что к виброизоляторам НГА предъявляются серьезные требования: они должны одновременно обладать как большой несущей способностью, так и малой жесткостью в рабочем интервале перемещений, чтобы обладать низкой частотой собственных колебаний [3]. Поэтому, чтобы виброизолятор обладал требуемыми свойствами, малой частотой собственных колебаний и достаточной несущей способностью – необходимо, чтобы он обладал нелинейной силовой характеристикой с пологим участком в рабочей точке. Конструкции с подобной характеристикой получили название систем с квазинулевой жесткостью [4].

Многолетний опыт авторов по исследованию систем с квазинулевой жесткостью показывает, что данные системы имеют огромный потенциал в виброизоляции, однако достижение данного эффекта на надежном уровне вызывает проблемы [5]. Многие ученые, занимающиеся виброзащитными устройствами с квазинулевой жесткостью, подчеркивают их большую теоретическую виброизоляционную способность, однако обзор современных достижений в данной области показывает, что практических реализаций, даже на уровне прототипов, немного. Авторы данной статьи полагают, что такая ситуация, вероятно, кроется в попытках различных авторов создавать достаточно сложные конструкции еще на уровне теоретических разработок для достижения наибольшего эффекта виброзащиты. Однако при попытке реализовать разработки в прототипах сложные конструкции ведут себя нестабильно из-за наличия множества подвижных узлов. Обилие большего количества подвижных элементов также обеспечивает высокий уровень трения в конструкции, что окончательно расстраивает достаточно тонкий виброизолятор с квазинулевой жесткостью [6]. Авторы полагают, что развитие виброизоляторов с квазинулевой жесткостью, на данный момент, наиболее актуально с минимальным количеством элементов – желательно, с единственным, что обеспечит наибольшую простоту и, при этом, высокую надежность. Стоит отметить, что в данном случае падает теоретическая максимальная виброизоляционная способность данных систем, однако простота и надежность в практической реализации перекрывает данный недостаток. Поэтому, простые виброизоляторы с квазинулевой жесткостью могут обходить их сложные аналоги по суммарной эффективности.

Таким образом, авторы сконцентрировались на разработке именно таких простых и надежных виброизоляторов с квазинулевой жесткостью. На рисунке 1 представлены прототипы виброизоляторов с квазинулевой жесткостью тарельчатой формы, изготовленные из полиуретана.



Рисунок 1. Разработанные прототипы виброизолятора с квазинулевой жесткостью

Авторами установлено, что к данным виброизоляторам частично применима теория тарельчатых пружин, которая является хорошо известной, однако создание отдельной теории под данные виброизоляторы с квазинулевой жесткостью является актуальной задачей. На рисунке 2 представлено сравнение теоретической силовой характеристики данных виброизоляторов с точки зрения теории тарельчатых пружин и результатов экспериментальных данных.

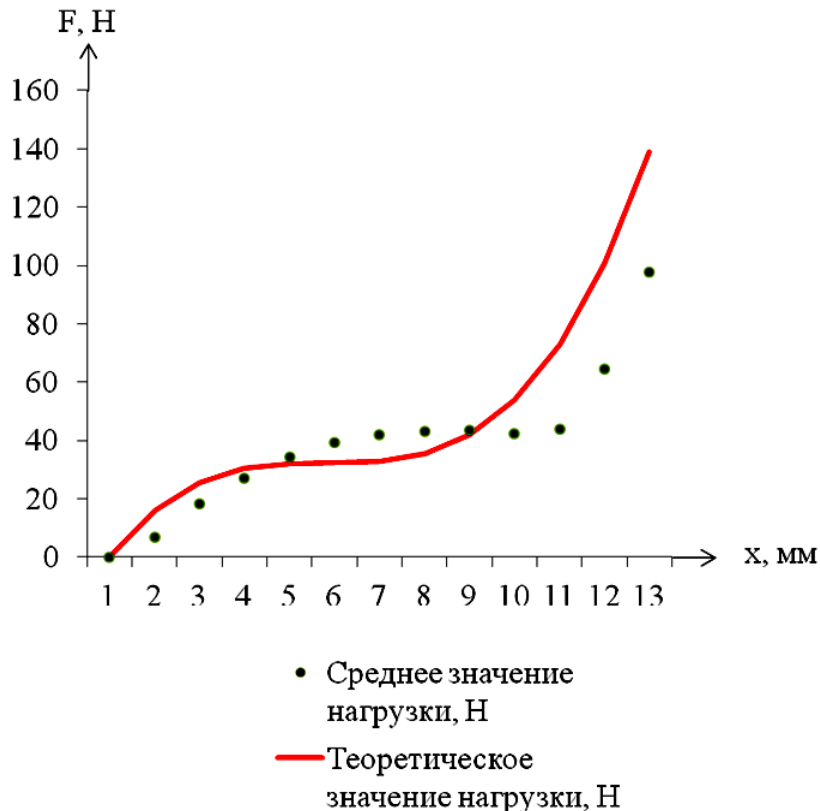


Рисунок 2. Силовая характеристика тарельчатого виброизолятора

Восстанавливающая сила тарельчатого виброизолятора рассчитывается по формуле 1 [7]:

$$F(x) = \frac{8 \cdot \pi \cdot E \cdot s \cdot \lambda_1}{(D-d)^2} \cdot \left\{ (f - \lambda_1) \cdot \left( f - \frac{\lambda_1}{2} \right) \cdot \left[ \frac{D+d}{(D-d) \cdot 2} - \frac{1}{\ln \left[ \frac{D}{d} \right]} \right] + \frac{s^2 \cdot \ln \frac{D}{d}}{12} \right\}, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости материала пружины, Па;  
 $s$  – толщина конуса пружины, мм;  
 $f$  – полная высота внутреннего конуса, мм;  
 $D$  – наружный диаметр тарельчатой пружины, мм;  
 $d$  – внутренний диаметр тарельчатой пружины, мм;  
 $\lambda_1$  – осадка пружины, мм.

Экспериментальная характеристика определялась при помощи электронного датчика силы и шаговых двигателей, управляемых при помощи компьютера через контроллер. Шаговые двигатели позволили получить высокую точность измерения деформации виброизолятора (с точностью до 0,01 мм). Характеристика на рисунке 2 показывает качественное наличие участка с квазиулевой жесткостью, однако различие номинальных нагрузок и положение участка квазиулевой жесткости очевидно. Также принципиально важно отличие фактического поведения виброизолятора в зоне за квазиулевой жесткостью по сравнению с теоретическими расчетами. В целом, подробное теоретическое изучение данного виброизолятора является интересной и актуальной задачей.

При изготовлении разработанных виброизоляторов с квазиулевой жесткостью тарельчатой формы следовало уделять большое внимание выбору материала. Виброизолятор должен претерпеть определенную деформацию, чтобы выйти на участок с квазиулевой жесткостью. Это значит, что материал виброизолятора должен выдерживать высокую относительную деформацию. Также данный материал должен обладать с одной стороны достаточно высокой упругостью, с другой стороны относительно высокой прочностью. После анализа современных полимерных материалов установлено, что вышеперечисленным требованиям отвечает материал двухкомпонентный заливочный полиуретан VytaFlex 60, со следующими параметрами, приведёнными в таблице 1.

Таблица 1. Свойства полиуретанового материала VytaFlex 60

Наименование параметра	Значение
Твердость по Шору А	60
Соотношение компонентов (по объёму и массе)	1А:1В
Цвет	белый
Время жизни, мин	30
Время отверждения, час	16
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1040
Вязкость, Па·с	2
Удлинение при разрыве, %	480
Соппротивление разрыву, МПа	6,0
Соппротивление разрыву, Н/мм <sup>2</sup>	6,07
Усадка	менее 0,1%

Эскиз исследуемого прототипа представлен на рисунке 3 .

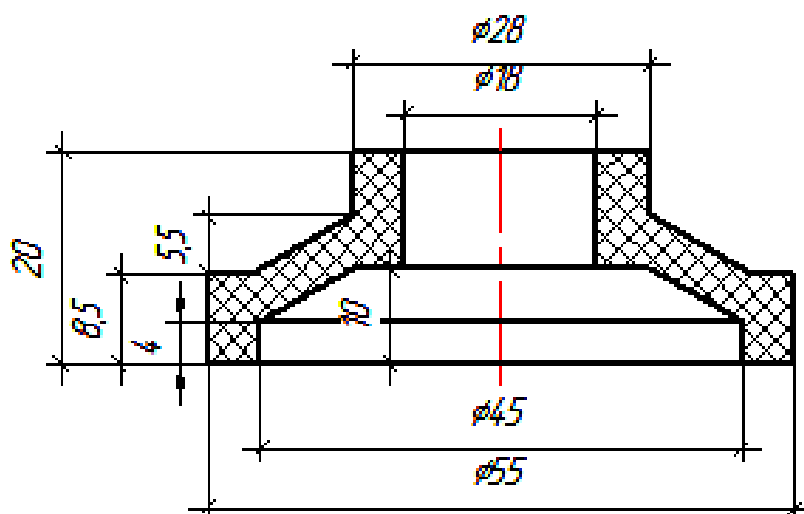


Рисунок 3. Эскиз исследуемого прототипа виброизолятора с квазиулеевой жесткостью тарельчатой формы

Целью экспериментальных исследований в данной статье стала оценка эффективности разработанных виброизоляторов с квазиулеевой жесткостью тарельчатой формы.

Для этих целей использовалась экспериментальная установка, имитирующая работающий агрегат. Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 4. Основной составной частью установки является

стальная плита 1, выполняющая функцию рамы насосного агрегата, в которой для крепления электродвигателя были выплавлены 4 отверстия для приварки шпилек 3. Для жесткого соединения электродвигателя с платформой использовались монтажные крепежи и гайки М6 как стопорные элементы. В качестве источника колебаний, имитирующий работу насоса, использовался электродвигатель переменного тока с частотным регулированием. Управляющее устройство (блок управления) был вынесен в отдельный пункт управления. Кроме того, для измерения поперечной и осевой составляющих виброскорости были предусмотрены две приварные пластины 2.

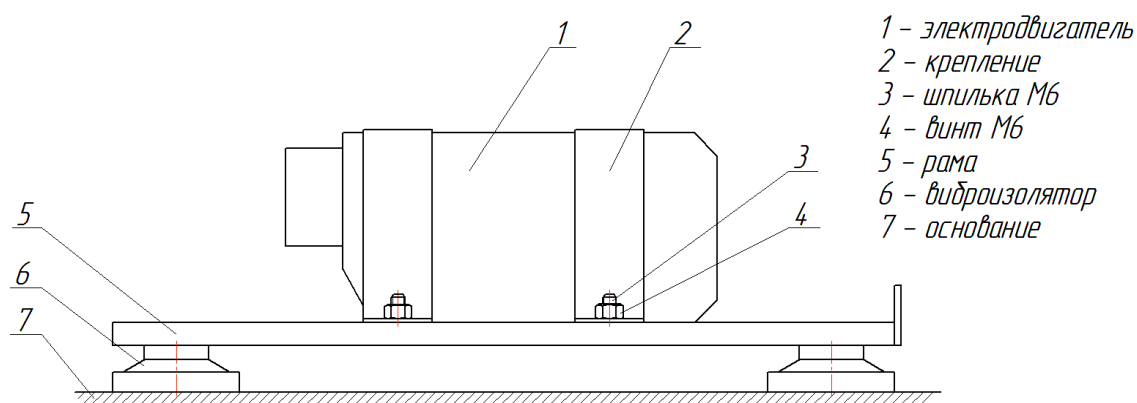


Рисунок 4. Общий вид экспериментальной установки

Для оценки работы эффективности разработанного виброизолятора с квазиулевым жесткостью был применён восьмиканальный синхронный регистратор-анализатор вибросигналов «Диана-8», предназначенный для практического диагностирования состояния оборудования. Датчики представлены пьезоакселерометрами типа ИСР. Они устанавливались в вертикальном, поперечном и осевом направлениях для измерения соответствующих составляющих виброскорости. Предел основной допускаемой относительной погрешности прибора при измерении общего уровня вибрации составляет менее 5%. Диапазоны измерения регистратора-анализатора вибросигналов «Диана-8»:

- 1) виброускорение - 0,3-100 мм/с<sup>2</sup>;
- 2) виброскорость - 0,3-100 мм/с;
- 3) виброперемещение - 5,0-500 мкм.

Схема полной экспериментальной установки указана на рисунке 5.



Рисунок 5. Экспериментальная установка для исследования прототипа виброизолятора с квазинулевой жесткостью тарельчатой формы  
 1 – компьютер; 2 – регистратор-анализатор вибросигналов «Диана-8»;  
 3 – блок управления; 4 – датчик №1; 5 – опытная установка;  
 6 – электродвигатель; 7 – датчик №3; 8 – пригрузки; 9 – датчик №2

Согласно рисунку 5 датчик №1 располагался на боковой приварной пластине для измерения поперечной составляющей виброскорости, датчик №2 – у источника колебаний (электродвигателя) для измерения вертикальной составляющей, датчик № 3 был установлен на боковой приварной пластине для измерения осевой составляющей виброскорости, датчик №4 был закреплен на каркасе основания стола.



Для получения значения виброскорости без учёта влияния сил трения и случайных ошибок определены усредненные значения виброскорости между прямым и обратным ходом.

Было проведено три серии экспериментов: анализировалась эффективность разработанных виброизоляторов с квазиулевым жесткостью из полиуретана, виброизоляторов традиционной формой из полиуретана и виброизоляторов традиционной формы из резины. Исследование виброизоляторов из различных материалов позволяет определить, насколько особенность формы разработанных виброизоляторов с квазиулевым жесткостью позволяет повысить эффективность виброизоляции, а также, насколько применяемый материал Vyta Flex 60 лучше, чем традиционная резина (резина МБС). Резина является популярным материалом в упругих элементах при виброизоляции оборудования на производстве, поэтому поиск материалов, которые могут качественно ее заменить, является актуальной задачей.

На рисунке 6 приведены результаты экспериментальных исследований в виде значений виброскорости на исследуемом стенде. Согласно полученным результатам эффективность применения разрабатываемых виброизоляторов с квазиулевым жесткостью в два раза выше по сравнению с традиционными упругими виброизоляторами из полиуретана и в три раза по сравнению с резиновой амортизирующей прокладкой.

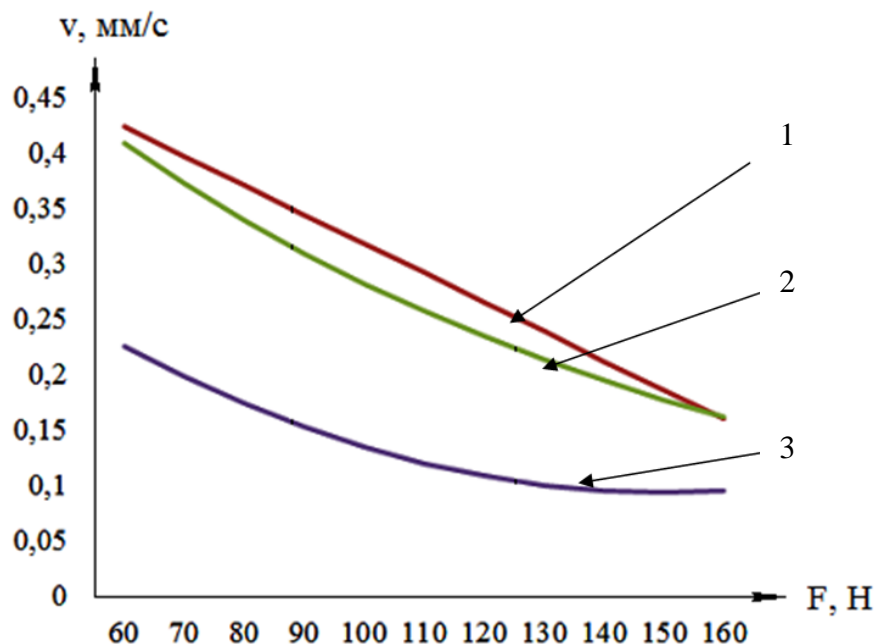


Рисунок 6. Сопоставление эффективности виброизоляции различных виброизоляторов. Значение виброскорости на исследуемом стенде  
1 - традиционный виброизолятор из резины; 2 - традиционный виброизолятор из полиуретана; 3 - разрабатываемый виброизолятор с квазиулевым жесткостью

## Выводы

В результате исследований было выяснено, что, разработанный авторами виброизолятор обладает повышенными параметрами благодаря как особенной форме, так и специально выбранному материалу.

Проведенный ряд теоретических и экспериментальных работ показывает эффективность виброзащитных свойств виброизолятора с квазинулевой жесткостью тарельчатой формы.

## Литература

1. Вибрационный контроль технического состояния газотурбинных газоперекачивающих агрегатов / Васильев Ю.Н. [и др.]. М.: Недра, 1987. 197 с.
2. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удар. Л.: Политехника, 1990. 272 с.
3. Алабужев П.М., Гритчин А.А. Виброзащитные системы с квазинулевой жесткостью. Л.: Машиностроение, 1986. 96 с.
4. Carella A., Brennan M., Waters T. Static analysis for a passive vibrationisolator with quasi-zero stiffness characteristic // Journal of Sound and Vibration, 2007. 12 p.
5. Валеев А.Р., Коробков Г.Е., Саньков В.Я. Экспериментальное исследование виброизолятора малой жесткости для защиты нефте- и газоперекачивающих агрегатов // Нефтегазовое дело. 2011. Т. 9, №2. С. 29 – 33.
6. Валеев А.Р., Зотов А.Н. Защита от вибрации и ударов системами с квазинулевой жесткостью. Уфа: Нефтегазовое дело, 2013. 166 с.
7. Андреева Л. Е. Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение, 1981. 391 с.

## References

1. Vibratsionnyy kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya gazoturbinnnykh gazoperekachivayushchikh agregatov / Vasil'yev YU.N. i dr. M.: Nedra, 1987. 197 s. [in russian]
2. Panovko YA.G. Osnovy prikladnoy teorii kolebaniy i udar. L.: Politekhnika, 1990. 272 s. [in russian]
3. Alabuzhev P.M.,Gritchichin A.A Vibrozashchitnyye sistemy s kvazinulevoy zhestkost'yu. L.: Mashinostroyeniye, 1986. 96 s. [in russian]
4. Carella A., Brennan M., Waters T. Static analysis for a passive vibrationisolator with quasi-zero stiffness characteristic // Journal of Sound and Vibration, 2007. 12 p.
5. Valeyev A.R., Korobkov G.Ye., San'kov V.Ya. Eksperimental'noye issledovaniye vibroizolyatora maloy zhestkosti dlya zashchity nefte- i

gazoperekachivayushchikh agregatov // Neftegazovoye delo. 2011. Tom 9, №2. S. 29–33 [in russian]

6. Valeev A.R., Zotov A.N. Zashchita ot vibratsii i udarov sistemami s kvazinulevoy zhestkost'yu. Ufa: Neftegazovoye delo, 2013. 166 s. [in russian]

7. Andreyeva L. Ye. Uprugiye elementy priborov. M.: Mashinostroyeniye, 1981. 391 s. [in russian]

### **Сведения об авторах**

Валеев А. Р., канд. техн. наук, ассистент кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа» ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

A.R. Valeev, Ph.D., assistant of chair “Transportation and storage of oil and gas” FSBEI HPE USPTU, Ufa, Russian Federation

Харисов Ш. А., аспирант кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа» ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Sh. A. Harisov, post-graduate student of chair “Transportation and storage of oil and gas” FSBEI HPE USPTU, Ufa, Russian Federation

Зотов А. Н., д-р техн. наук, проф. кафедры «Механика и конструирование машин» ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

A.N. Zotov, Ph.D., prof. of chair “Mechanics and machine construction” FSBEI HPE USPTU, Ufa, Russian Federation

Саубанов О.М., студент группы БМТ-10-01 ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

O.M. Saubanov, student of gr. BMT-10-01, FSBEI HPE USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: anv-v@yandex.ru