

На правах рукописи



**ФАХРИЕВА КРИСТИНА РИНАТОВНА**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДУЛЯ  
ВИБРОГАСИТЕЛЯ НА ДИНАМИКУ РАБОТЫ  
ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНОЙ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ**

Специальность: 05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы»  
(нефтегазовая отрасль)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Уфа-2016**

Работа выполнена на кафедре «Технологические машины и оборудование»  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Габдрахимов Мавлитзян Сагитьянович**

Официальные оппоненты: **Ефанов Владимир Николаевич,**  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
авиационный технический университет»/  
кафедра электроники и биомедицинских  
технологий, профессор  
**Вахитова Роза Ильгизовна,**  
кандидат технических наук ГБОУ ВО  
«Альметьевский государственный нефтяной  
институт»/ кафедра «Промышленная  
теплоэнергетика», заместитель заведующего

Ведущая организация ООО «РН-УфаНИПИнефть», г. Уфа

Защита состоится 23 сентября 2016 года, в 16:00 ч. на заседании  
диссертационного совета Д 212.289.05 при ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной технический университет» по адресу: 450062,  
Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный нефтяной технический университет» и на сайте [www.rusoil.net](http://www.rusoil.net).  
Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2016 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Абуталипова Елена Мидхатовна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

В России одним из основных способов эксплуатации скважин является добыча нефти с помощью установок электроцентробежных насосов (УЭЦН). За последние двадцать пять лет доля нефти, поднятой на поверхность с помощью погружных электроцентробежных насосов, выросла более чем в два раза. Данная тенденция имеет устойчивое развитие, которая сохранится в будущем.

Установка электроцентробежного насоса является сложной технической системой, на которую оказывает влияние вибрация. Анализ научных работ показал значимость влияния вибрации на работу электроцентробежного насоса. Исследования показали, что в последнее время наблюдается увеличение числа отказов электроцентробежных насосов вследствие воздействия вибрации. Причиной отказов и «полетов» погружного оборудования является воздействие продольных колебаний на УЭЦН.

Одним из распространенных способов снижения вибрации является вибродемпфирование. Для предотвращения отказов, связанных с воздействием вибрации на УЭЦН, используют такие технические средства, как демпферы, гасители колебаний, и многие другие. Недостатками таких устройств являются: низкая продолжительность работы в скважине, неэффективное снижение вибрации УЭЦН. Поэтому разработка устройства, способствующего снижению вибрации установки электроцентробежного насоса, остается актуальной.

**Область исследования** соответствует паспорту специальности 05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы» (нефтегазовая отрасль): п. 5. Разработка научных и методологических основ повышения производительности машин, агрегатов и процессов и оценки их экономической эффективности и ресурса.

### **Цель работы**

Снижение вибрации УЭЦН за счет уменьшения амплитуды колебания установки с модулем виброгасителя.

Для реализации поставленной цели решены **следующие задачи:**

1 Исследование и анализ причин возникновения отказов установок электроцентробежных насосов.

2 Математическое моделирование антивибрационной компоновки УЭЦН. Определение упругих и демпфирующих характеристик модуля виброгасителя.

3 Разработка стенда для исследования работоспособности натурной модели рабочих ступеней модуля виброгасителя. Лабораторные исследования модели виброгасителя для определения количества его виброзащитных ступеней.

4 Создание опытного варианта модуля виброгасителя. Стендовые исследования характеристик модуля виброгасителя в компоновке УЭЦН.

### **Научная новизна**

1 Аналитически решена задача определения коэффициентов жесткости и демпфирования модуля виброгасителя при работе с электроцентробежным насосом путем создания и исследования математической модели УЭЦН с дополнительной массой хвостовика.

2 Установлена зависимость амплитуды колебания антивибрационной компоновки от упругих и демпфирующих характеристик модуля виброгасителя для разных частот вращения вала электроцентробежного насоса.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в научном обосновании возможности преобразования механической энергии УЭЦН в энергию упругих колебаний рабочих ступеней модуля виброгасителя, что позволяет снизить вибрацию установки.

Практическая значимость работы заключается в следующем.

1 Разработан лабораторный стенд для исследования вибрации рабочих ступеней модуля виброгасителя. Данный стенд используется в учебном процессе для проведения лабораторных работ по дисциплине «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» в филиале ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Октябрьском.

2 Автором разработана конструкция модуля виброгасителя. На конструкцию получен патент РФ на изобретение (патент № 2455452 от

10.07.2012 г.). Опытный экземпляр модуля виброгасителя изготовлен на Октябрьском заводе нефтепромышленного оборудования (справка № 2701-03-243 от 18.09.2014 г.) и принят для использования в образовательной программе по дисциплинам «Техника и технология добычи и подготовки нефти и газа», «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов» кафедры «Нефтепромышленные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Октябрьском.

### **Методология и методы решения задач**

Методология исследований заключалась в анализе причин возникновения отказов установок электроцентробежных насосов, изучении причин возникновения вибраций в УЭЦН и методов их устранения. При этом применялись:

- разработанный при участии автора лабораторный стенд для исследования вибрации рабочих ступеней модуля виброгасителя;
- метод математического моделирования.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1 Математическая модель установки электроцентробежного насоса с модулем виброгасителя и включением в компоновку дополнительной массы хвостовика.

2 Упругие и демпфирующие характеристики модуля виброгасителя в компоновке УЭЦН.

3 Амплитудно-частотная характеристика установки электроцентробежного насоса в компоновке с модулем виброгасителя.

4 Экспериментальные исследования компоновки электроцентробежного насоса с модулем виброгасителя на испытательном стенде прокатно-ремонтного цеха № 4 ООО «Нефтекамский завод нефтепромышленного оборудования».

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность результатов работы обеспечивалась путем применения широко апробированных, а также оригинальных методов и методик экспериментальных исследований, реализованных на оборудовании, прошедшем

государственную поверку. Перед построением графических зависимостей все экспериментальные данные обрабатывались с использованием подходов теории ошибок эксперимента и математической статистики.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на VIII Международной заочной научно-практической конференции «Современные вопросы науки XXI век» (г. Тамбов, 2011 г.); II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки» (г. Тамбов, 2011 г.); Международной научно-технической конференции «Современные технологии в нефтегазовом деле» (г. Октябрьский, 2012 г.); Международной научно-методической конференции «Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля – фундамент подготовки специалистов будущего» (г. Салават, 2012 г.); научном семинаре кафедры «Нефтепромысловые машины и оборудование» Октябрьского филиала УГНТУ (г. Октябрьский, 2013 г.).

### **Публикации**

Основные положения диссертационного исследования опубликованы в 12 научных работах соискателя, в числе которых 4 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 1 патент на изобретение РФ. В данных работах изложены основные идеи и результаты диссертационного исследования.

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, библиографического списка и приложений. Работа изложена на 152 страницах машинописного текста, содержит 58 рисунков, 4 таблицы и 3 приложения.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна выполненных исследований, их теоретическая и практическая значимость.

**Первая глава** посвящена анализу исследований по определению причин возникновения отказов электроцентробежных насосов.

Исследованы научные работы А.Х. Мирзаджанзаде, В.Е. Питолина, А.Р. Атнагулова, Ю.В. Пахарукова, Г.Г. Халаева, связанные с анализом причин

возникновения отказов установок электроцентробежных насосов. В главе приведены методы и устройства повышения долговечности установки электроцентробежного насоса, рассмотренные в работах Р.И. Вахитовой, Н.Н. Матаева, Д.М. Ломако и И.И. Лепешко

Представлена динамика наработки на отказ установок электроцентробежных насосов на предприятии ООО «Башнефть-Добыча» НГДУ «Туймазанефть» (рисунок 1).

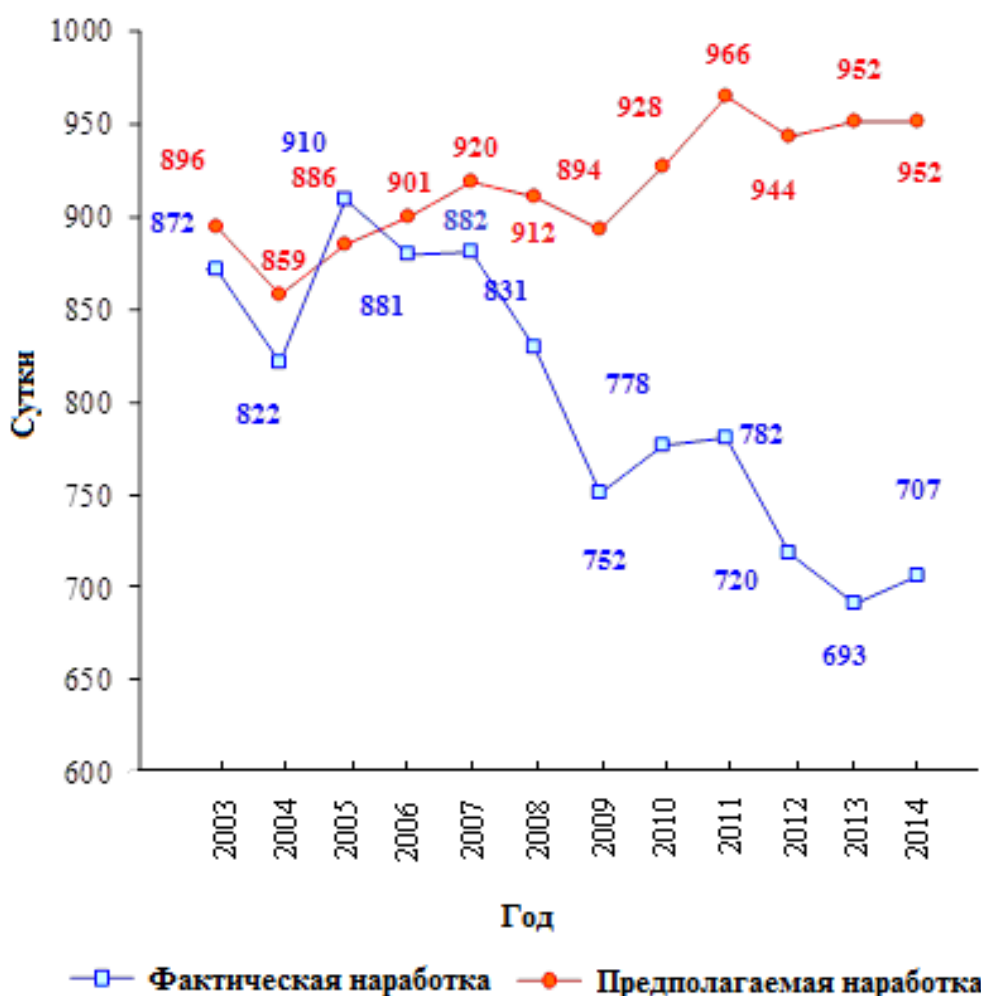


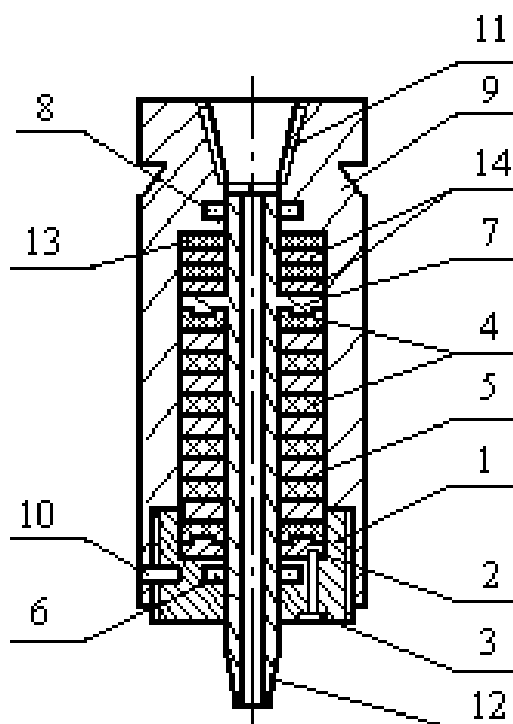
Рисунок 1 – Динамика наработки на отказ по нефтяному фонду скважин с УЭЦН НГДУ «Туймазанефть» ООО «Башнефть-Добыча» за 2003–2014 годы

Анализ нефтяного фонда УЭЦН показал снижение фактической наработки на отказ за последние двенадцать лет. Высокая обводненность добываемой продукции и наклонно направленный характер профиля ствола скважины вносят

значительные осложнения в технологию механизированной добычи нефти и являются причиной увеличения отказов УЭЦН. Основной причиной снижения наработки на отказ является рост числа полетов элементов установки электроцентробежного насоса, вызванный воздействием вибрации при работе УЭЦН.

**Во второй главе** представлена конструкция модуля виброгасителя. Виброгаситель устанавливается в компоновке УЭЦН.

Конструкция модуля виброгасителя представлена на рисунке 2.



1 – ниппель; 2 – нижний кулачок ниппеля; 3 – болт; 4 – упругие элементы; 5 – кулачок; 6, 8 – уплотнение; 7 – шток с верхним кулачком; 9 – корпус; 10 – штифт; 11 – присоединительная резьба к НКТ; 12 – присоединительная резьба к ЭЦН; 13 – резиновые упругие элементы 14 – металлические кольца

Рисунок 2 – Конструкция модуля виброгасителя

Модуль виброгасителя состоит из корпуса, штока ниппеля и резиновых упругих элементов, выполненных из нефтебензостойкой резины марки Г-9304. Устройство соединяется с насосом посредством присоединительной резьбы 12, а с



колонной насосно-компрессорных труб – посредством присоединительной резьбы 11.

Сжимающие нагрузки гасятся упругими элементами, установленными между верхним кулачком штока и корпусом. С целью эффективного гашения колебаний, возникающих при работе глубинного скважинного электроцентробежного насоса, его верхний кулачок выполнен заодно со штоком. Нижний кулачок соединен через ниппель с корпусом. Между кулачком штока и корпусом установлены упругие шайбы с чередованием металлических дисков.

Существенным отличием модуля виброгасителя от существующих демпфирующих устройств является снабжение штока верхним кулачком, а ниппеля – нижним кулачком (рисунок 3).

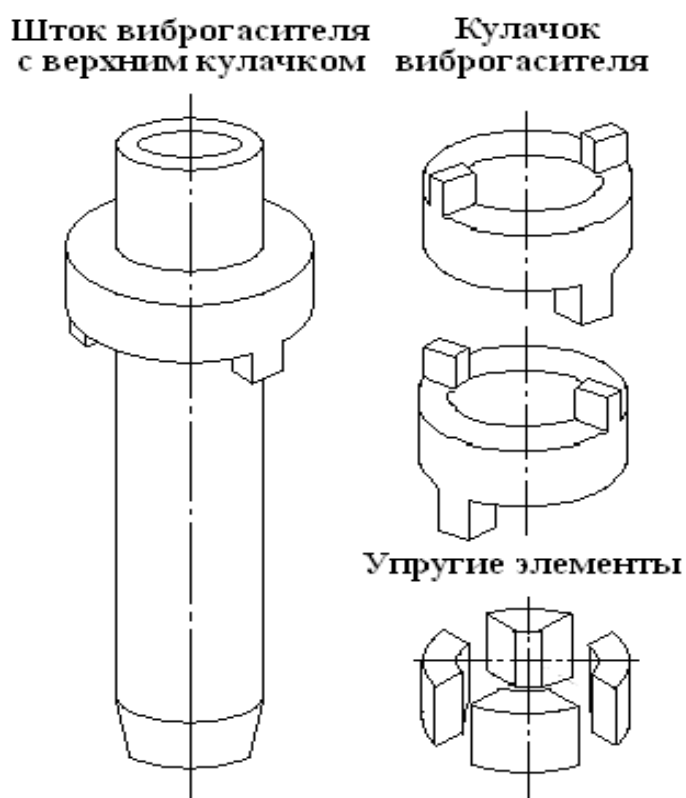


Рисунок 3 – Конструкция штока, кулачка и упругих элементов модуля виброгасителя

Взаимодействие штока и нижнего кулачка осуществляется через набор кулачков, между которыми установлены упругие элементы. В результате работы

насоса кулачки модуля виброгасителя осуществляют вращательные и продольные перемещения. Продольные колебания гасятся за счет осевого сжатия и разжатия упругих резиновых элементов. Поэтому при сборке модуля виброгасителя кулачки устанавливаются с возможностью осевого перемещения на 3–4 мм.

Для рассмотрения воздействия продольных колебаний на УЭЦН конструкция кулачков и упругих элементов модуля виброгасителя упрощена. Виброзащитные элементы модуля виброгасителя выполнены в виде металлических и резиновых дисков.

Учитывая, что колонна НКТ с УЭЦН является упругим элементом большой протяженности и существенно влияет на колебательные процессы, вызываемые работой компоновки УЭЦН, разработана математическая модель антивибрационной компоновки установки электроцентробежного насоса.

С целью разработки математической модели были рассмотрены два варианта размещения модуля виброгасителя в колонне с целью обеспечения неподвижности установки ЭЦН (рисунок 4).

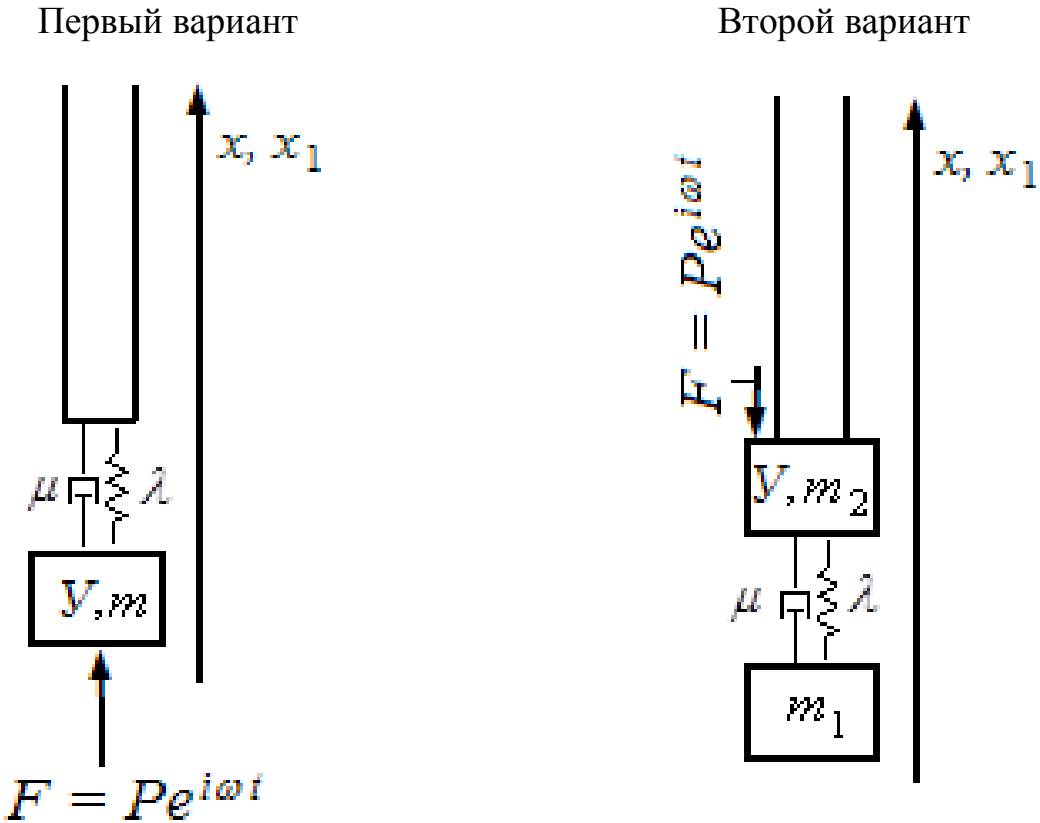


Рисунок 4 – Схемы размещения модуля виброгасителя в компоновке УЭЦН

В первом варианте модуль виброгасителя размещен над электроцентробежным насосом, во втором варианте модуль виброгасителя установлен под УЭЦН, ниже которого расположен хвостовик массой  $m_1$ .

Выясним, какими должны быть жесткость виброгасителя  $\lambda$  и коэффициент, характеризующий демпфирующие свойства виброгасителя  $\mu$ .

Первый случай размещения модуля виброгасителя в компоновке УЭЦН записывается следующим образом. Для удобства исследования силу  $P \cdot \cos \omega t$  представим в комплексной форме  $P \cdot e^{i\omega t}$ . Колебания колонны и установки будут описываться уравнениями:

$$\begin{cases} u_{tt} + b \cdot u_t - a^2 \cdot u_{xx} = 0, \\ m \cdot \ddot{x}_1 = P \cdot e^{i\omega t} - \lambda \cdot [x_1 - u(0,t)] - \mu \cdot [\dot{x}_1 - \dot{u}(0,t)]; \end{cases}$$

и граничными условиями:

$$\begin{cases} u(\infty, t) = 0, \\ E \cdot S \cdot u_x(0, t) = \lambda \cdot [u(0, t) - x_1] + \mu \cdot [\dot{u}(0, t) - \dot{x}_1]; \end{cases}$$

без начальных условий, так как рассматриваем установившееся движение. Мы обозначили:  $\dot{u}(0, t) = u_t(0, t)$ ,

где:  $b$  – коэффициент, характеризующий вязкое трение  $\text{с}^{-1}$ ;

$a$  – скорость распространения продольных колебаний в колонне, м/с;

$m$  – масса установки, кг;

$E$  – модуль Юнга материала колонны, Па;

$S$  – площадь поперечного сечения колонны,  $\text{м}^2$ ;

$u = u(x, t)$  – продольное смещение поперечного сечения  $x$  колонны в момент времени  $t$ , м.

Здесь  $x_1 = x_1(t)$  – смещение установки.

Допустим, установка не должна смещаться при установившихся колебаниях колонны, тогда должно быть  $x_1 = \dot{x}_1 = \ddot{x}_1 = 0$ . Теперь задача сводится к определению функции  $u$ , удовлетворяющей уравнениям:

$$\begin{cases} u_{tt} + b \cdot u_t - a^2 \cdot u_{xx} = 0, \\ E \cdot S \cdot u_x(0, t) = -P \cdot e^{i\omega t}; \end{cases} \quad (1)$$

и граничным условиям:

$$\begin{cases} u(\infty, t) = 0, \\ \mu \cdot \dot{u}(0, t) + \lambda \cdot u(0, t) = -P \cdot e^{i\omega t}. \end{cases} \quad (2)$$

Зависимость продольного смещения  $u$  от координаты  $x$  поперечного сечения колонны и от времени  $t$  представлена в виде:

$$u = A \cdot e^{-kx + i\omega t} + B \cdot e^{kx + i\omega t}, \quad (3)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $k$  – константы, подлежащие определению. Решая первое уравнение системы уравнений (1), получено выражение относительно  $k$ :

$$k = r \cdot (\cos \varphi + i \cdot \sin \varphi) = F + i \cdot G, \quad (4)$$

где

$$F = r \cdot \cos \varphi = \frac{\omega}{\sqrt{2} \cdot a} \sqrt{\sqrt{1 + \frac{b^2}{\omega^2}} - 1}, \quad G = r \cdot \sin \varphi = \frac{\omega}{\sqrt{2} \cdot a} \sqrt{\sqrt{1 + \frac{b^2}{\omega^2}} + 1},$$

где  $\varphi$  – относительная угловая координата положения колонны,  $r$  – радиус закручивания.

Показано, что

$$\begin{cases} F \geq 0, \\ G > 0. \end{cases} \quad (5)$$

Константы  $F$  и  $G$  равны:

$$F = -\frac{\lambda}{E \cdot S}, \quad G = -\frac{\omega \cdot \mu}{E \cdot S}.$$

Полученное значение  $G$  противоречит условию (5). В данном случае обеспечить полную неподвижность установки невозможно.

Рассмотрим второй случай размещения модуля виброгасителя в компоновке УЭЦН, в которой:

– первым условием принимается: нижний конец колонны жестко связан с установкой «У» массой  $m_2$ ;

– установка через модуль виброгасителя соединена с хвостовиком массой  $m_1$ ;

– на установку действует гармоническая сила  $P \cdot e^{i\omega t}$ , где  $\omega$  – угловая частота,  $i$  – мнимая единица;

– установка при колебаниях колонны остается в состоянии установившегося режима.

Из первого условия следует, что смещения установки массы  $m_2$  совпадают со смещениями нижнего конца колонны, т. е. равны  $u(0, t)$ .

Поэтому продольные колебания всей системы будут описываться уравнениями:

$$\begin{cases} u'' + b \cdot u' - a^2 \cdot u = 0, \\ m_1 \cdot \ddot{x}_1 = -\lambda \cdot [x_1 - u(0,t)] - \mu \cdot [\dot{x}_1 - \dot{u}(0,t)], \\ m_2 \cdot \ddot{u}(0,t) = E \cdot S \cdot u_x(0,t) - P \cdot e^{i\omega t} - \lambda \cdot [u(0,t) - x_1] - \mu \cdot [\dot{u}(0,t) - \dot{x}_1]; \end{cases} \quad (6)$$

и граничным условием:

$$u(\infty, t) = 0, \quad (7)$$

где  $m_2$  – масса установки, кг;

$m_1$  – масса груза, кг.

Здесь  $x_1 = x_1(t)$  – смещение груза.

Решение системы уравнений (6), удовлетворяющее условию (7), имеет вид:

$$m_1 \cdot \omega^2 - \lambda = i \cdot \omega \cdot \mu. \quad (8)$$

Отсюда находим условия неподвижности установки:

$$\lambda = m_1 \cdot \omega^2, \mu = 0. \quad (9)$$

Итак, при выполнении условия (9) амплитуда колебаний установки равна нулю. Если же условия (9) не выполняются, то модуль амплитуды колебаний  $A$  будет равен:

$$A = P \cdot [(\lambda - m_1 \cdot \omega^2)^2 + (\omega \cdot \mu)^2]^{1/2}. \quad (10)$$

В данном случае увеличение коэффициентов жесткости и демпфирования приведут к росту амплитуды колебания. Изменение угловой частоты вращения вала насоса  $\omega$  может существенно повлиять на вибрацию установки, поскольку, как видно из формулы (10), снижение частоты вращения вала насоса позволит уменьшить амплитуду колебания.

Проведем исследование изменений амплитуды колебаний  $A(\lambda, \mu)$  вблизи значений (9). В качестве примера рассмотрим установку электроцентробежного

насоса с модулем виброгасителя и хвостовиком массой 500 кг, имеющую следующие параметры:

$$ES = 897 \cdot 10^6 \text{ Н}, \quad P = 10^4 \text{ Н}, \quad m_1 = 500 \text{ кг}, \quad m_2 = 1000 \text{ кг}, \quad a = 5160 \text{ м/с}, \quad b = 3 \text{ с}^{-1}$$

Примем частоту вращения  $n$  равной 50 об/с и  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n = 314,16 \text{ рад/с}$ .

Определим, как будет меняться амплитуда колебания УЭЦН при изменении частоты вращения вала насоса. На рисунке 5 приведены графики амплитуды  $A$  при частоте вращения  $n$  равной 44, 46 и 48 об·с<sup>-1</sup>. На рисунке 5а графики построены при  $\mu = 0$ , на рисунке 5б – при  $\lambda = m_1 \cdot \omega^2$  где в обоих случаях  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$ .

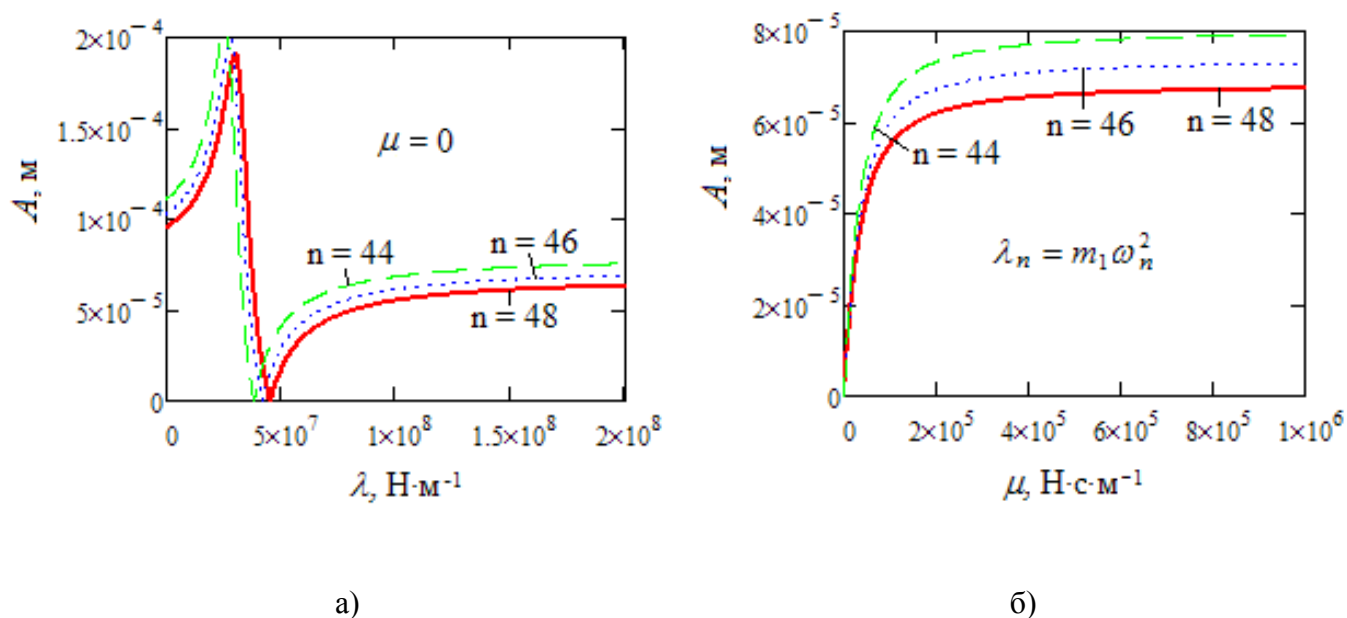


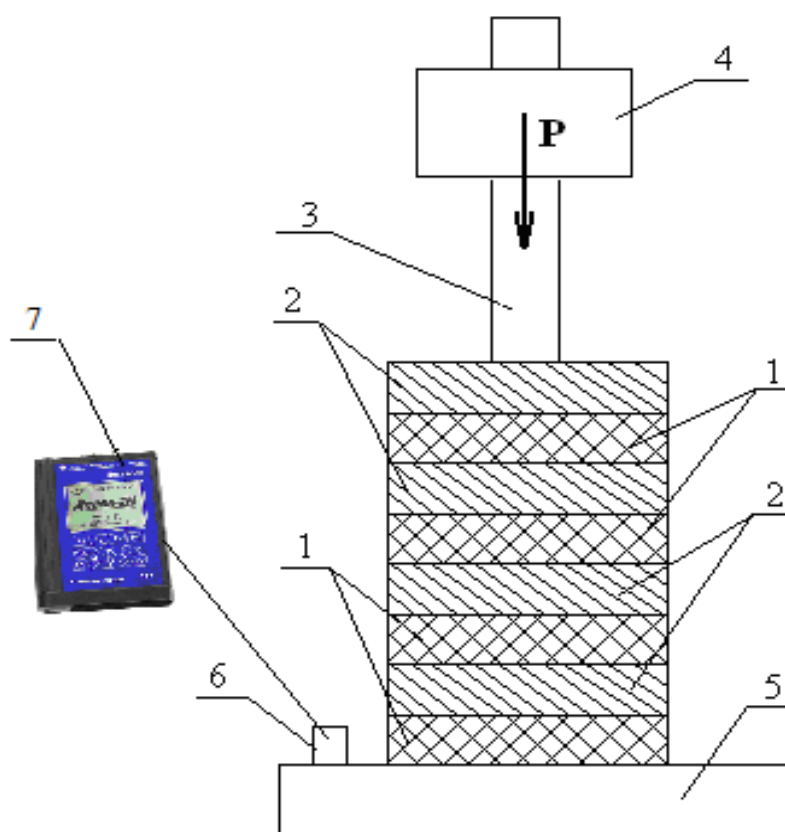
Рисунок 5 – Зависимость амплитуды колебания УЭЦН от частоты вращения вала насоса

Анализ графиков зависимости амплитуды колебания УЭЦН с модулем виброгасителя, коэффициент жесткости которого определяется как зависимость  $\lambda = m_1 \cdot \omega^2$  и коэффициент демпфирования  $\mu$  равен 0, показывает, что с уменьшением частоты вращения вала насоса  $n$  представляется возможным значительно снизить амплитуду колебаний установки и повысить длительность ее эксплуатации.

Второй вариант размещения модуля виброгасителя с использованием хвостовика приводит к эффективному снижению вибрации УЭЦН по сравнению с вариантом размещения модуля виброгасителя между НКТ и насосом. Однако, использование хвостовика приводит к дополнительным материальным затратам.

**Третья глава** посвящена моделированию конструкции модуля виброгасителя. Разработан лабораторный стенд для исследования работоспособности натурной модели рабочих ступеней модуля виброгасителя. На основании проведенных испытаний осуществлен выбор количества рабочих элементов виброгасителя.

На стенде показана физическая модель рабочих ступеней модуля виброгасителя с установкой датчика виброанализатора «Диана-2М» (рисунок 6).



1 – упругие элементы (марка резины Г-9304); 2 – металлические диски; 3 – шток; 4 – груз;  
5 – основание; 6 – датчик; 7 – виброанализатор «Диана-2М»

Рисунок 6 – Конструкция стенда для выбора количества ступеней модуля виброгасителя



Модель состоит из основания 5, на которое установлен металлический шток 3. Один конец штока жестко закреплен на основании, другой находится в свободном состоянии. На шток посажены металлические 2 и виброгасящие диски (эластомеры) 1. Эластомеры изготовлены из нефтебензостойкой резины твердостью по Шору 65–75 А, металлические диски и шток из стали 40.

Для определения количества рабочих ступеней модуля виброгасителя и изучения его демпфирующих свойств, посредством датчика виброанализатора «Диана-2М» проведены измерения вибрации и получены спектральные характеристики модели рабочих ступеней модуля виброгасителя. На основании проведенных исследований выявлены значения максимальной амплитуды колебания ( $A_{max}$ ) в момент удара груза при установке от одной до четырех ступеней. Результаты измерений сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Значения максимальной амплитуды колебания ( $A_{max}$ ) при установке разного количества ступеней

Количество ступеней, шт.	Количество дисков, шт.	№ опыта							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		$A_{max}$ , МКМ							
1	2	8,582	10,112	9,94	10,567	9,578	8,752	10,12	8,34
2	4	6,352	6,212	6,91	6,767	6,981	6,782	6,72	6,84
3	6	2,521	2,221	1,91	2,367	1,581	1,732	1,92	2,94
4	8	2,342	2,115	1,51	1,977	1,751	1,672	1,83	1,84

Как показывают результаты измерений, максимальная амплитуда колебаний рабочих ступеней модели виброгасителя при установке трех рабочих ступеней модели виброгасителя в момент удара снизилась более чем в 3 раза, что свидетельствует об эффективном снижении динамических нагрузок. При установке третьей и четвертой ступени модуля виброгасителя максимальная амплитуда колебаний практически не изменяется. На основании полученных

результатов сделан вывод, что трех ступеней модуля виброгасителя достаточно для эффективного гашения динамических нагрузок.

**Четвертая глава** посвящена проведению промышленных испытаний модуля виброгасителя в компоновке УЭЦН. Промысловые испытания проводились для проверки работоспособности модуля виброгасителя, определения степени гашения колебаний УЭЦН.

Исследование работы модуля виброгасителя проводилось на стенде для испытаний ЭЦН и ПЭД прокатно-ремонтного цеха электропогружных установок № 4 (ПРЦЭПУ-4) Нефтекамского завода нефтепромышленного оборудования (рисунок 7).



Рисунок 7 – Испытание модуля виброгасителя

Испытаниям подвергалась установка, состоящая из виброгасителя, электроцентробежного насоса ЦНПЗВ5-80-1550 и погружного двигателя БПЭД-45-117 Бугульминского электронасосного завода.

В результате исследований получены спектральные характеристики УЭЦН с модулем виброгасителя и без него при давлении 5, 8, 10 и 14 МПа. В таблице 2 приведены максимальные значения амплитуды колебания УЭЦН при различных давлениях.

Таблица 2 – Значения максимальной амплитуды колебаний УЭЦН

Вариант компоновки УЭЦН	Давление, МПа	№ опыта							
		1	2	3	4	5	6	7	8
		Значения амплитуды колебания УЭЦН, мкм							
без модуля виброгасителя	5	143,7	149,9	160,6	162,3	158,78	155,2	153,1	159,87
	8	180,7	177,8	180,9	177,5	169,23	164,4	181,9	179,46
	10	193,6	194,5	197,2	195,9	198,26	187,8	185,9	190,23
	14	207,42	203,6	205,7	209,7	207,12	201,2	200,5	203,7
с модулем виброгасителя	5	73,98	74,1	74,86	75,1	73,25	72,87	75,98	74,98
	8	78,56	76,54	80,26	75,34	79,89	77,23	82,9	81,47
	10	84,28	87,36	81,78	89,43	92,3	85,56	85,7	86,92
	14	93,28	94,58	98,78	95,58	93,98	94,28	98,56	95,58

В качестве примера показаны спектральные характеристики УЭЦН с модулем виброгасителя и без него при давлении 14 МПа (рисунок 8).

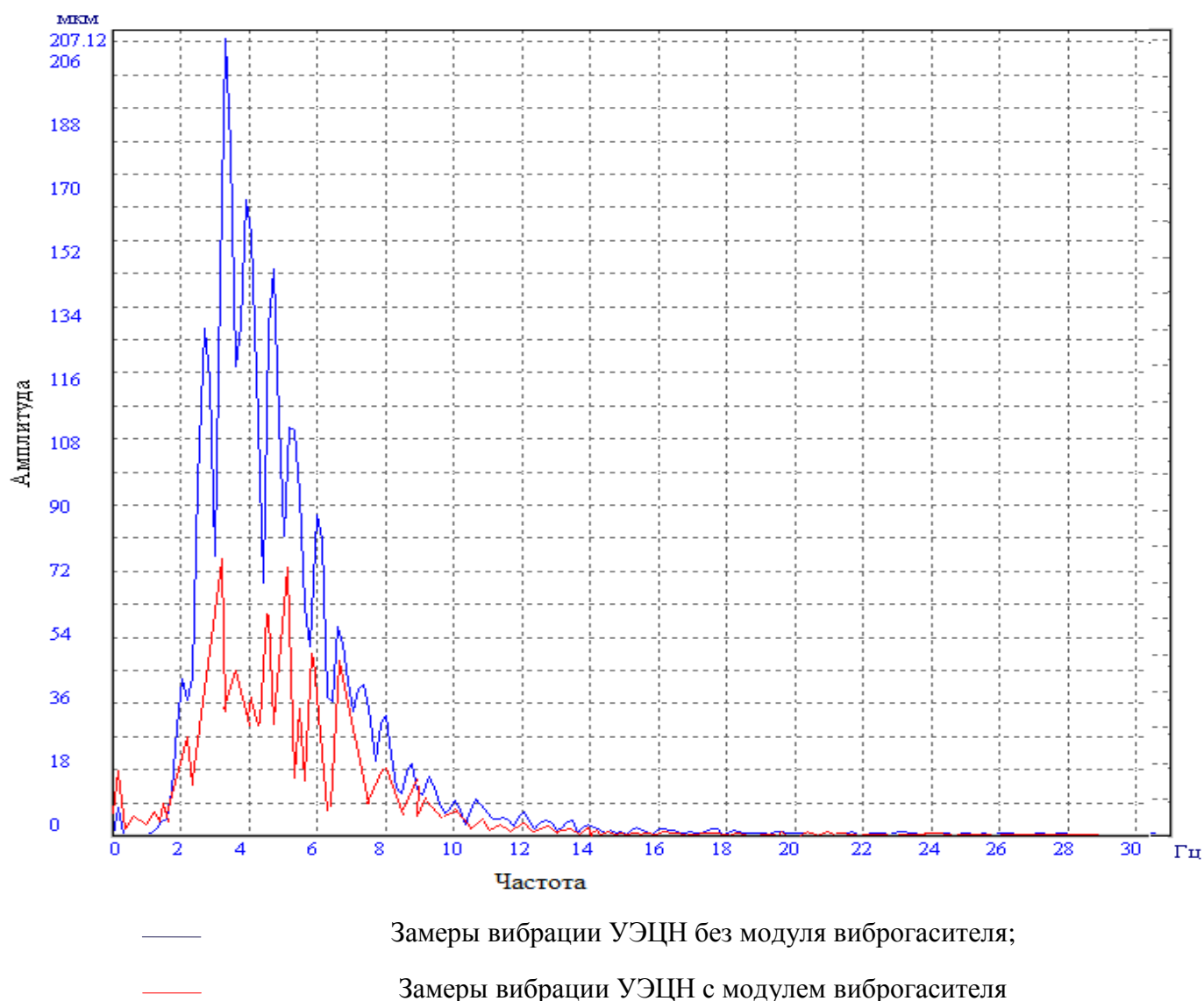


Рисунок 8 – Спектральная характеристика УЭЦН при устьевом давлении 14 МПа

Спектральный анализ вибрации установки электроцентробежного насоса при различных давлениях показал, что после установки в компоновку модуля виброгасителя наблюдается снижение максимальной амплитуды колебаний УЭЦН.

Результаты экспериментальных исследований доказали, что применение модуля виброгасителя приводит к снижению вибрации установки ЭЦН и повышению ее виброзащитных свойств.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 Аналитическими исследованиями математической модели установки электроцентробежного насоса с модулем виброгасителя, параметры  $\lambda$  и  $\mu$  которого находятся вблизи значений  $\lambda = m_1 \cdot \omega^2, \mu = 0$ , доказана возможность снижения амплитуды колебаний установки.

2 На основе анализа известных публикаций установлено, что доминирующее влияние на работу установки электроцентробежного насоса оказывает вибрация, вызываемая причинами механического, электротехнического и гидродинамического происхождения.

3 Разработан лабораторный стенд физической модели рабочих ступеней модуля виброгасителя, показывающий, что установка трех ступеней виброизоляции достаточна для гашения вибрации и динамических нагрузок, возникающих при работе насоса.

4 Установлена зависимость изменения амплитуды колебания УЭЦН с модулем виброгасителя от его коэффициентов упругости и демпфирования для разных частот вращения вала насоса.

5 Разработана конструкция модуля виброгасителя (патент № 2455452). Экспериментальными исследованиями доказано, что применение модуля виброгасителя снижает амплитуду колебаний компоновки УЭЦН, а установка дополнительной массы хвостовика приводит к полному гашению вибрации.

### **Основные результаты диссертационной работы опубликованы**

**– в российских ведущих рецензируемых научных журналах по перечню ВАК при Минобрнауки РФ:**

1. Габдрахимов, М.С. Анализ отказов установок электроцентробежных насосов НГДУ «Туймазанефть» / М.С. Габдрахимов, К.Р. Фахриева // Нефтегазовое дело: электрон. журн./УГНТУ. - 2013. - № 1. - С. 240–247. URL: [http://ogbus.ru/authors/FakhrievaKR/FakhrievaKR\\_1.pdf](http://ogbus.ru/authors/FakhrievaKR/FakhrievaKR_1.pdf)

2. Габдрахимов, М.С. Динамические нагрузки скважинного оборудования и виброзащита УЭЦН / М.С. Габдрахимов, К.Р. Фахриева // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса: науч.-техн. журн. - 2013. - № 5. - С. 17–21.

3. Габдрахимов, М.С. Обоснование основных параметров виброгасителя установки электроцентробежного насоса / М.С. Габдрахимов, К.Р. Фахриева, Л.М. Зарипова, Т.Н. Шамсутдинов // Нефтепромысловое дело: науч.-техн. журн. - 2014. - № 7. - С. 43–49.

4. Галеев, А.С. Расчет математической модели компоновки установки электроцентробежного насоса с виброгасителем / А.С. Галеев, К.Р. Фахриева // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности: науч.-техн. журн. - 2015. - № 7. - С. 25–29. - (Отечественный и зарубежный опыт)

*– в других изданиях:*

5. Габдрахимов, М.С. Стендовые исследования электроцентробежного насоса / М.С. Габдрахимов, К.Р. Фахриева, И.Р. Хасанов // Современные технологии в нефтегазовом деле: материалы междунар. науч.-техн. конф.- Октябрьский, 2013. Т. 2. – С. 126.

6. Сулейманов, Р.И. Снижение радиальных нагрузок в погружных электроцентробежных насосах / Р.И. Сулейманов, К.Р. Фахриева, Г.Р. Зиннатуллина // Актуальные проблемы науки: материалы науч.-практ. конф. - Тамбов, 2011. Т. 2. - С. 138.

7. Фахриева, К.Р. Выбор количества ступеней виброгасителя / К.Р. Фахриева, М.С. Габдрахимов // Современные технологии в нефтегазовом деле-2014: материалы междунар. науч.-техн. конф. - Октябрьский, 2014. Т.1. - С. 383.

8. Габдрахимов, М.С. Отказы скважинного оборудования установок ЭЦН / М.С. Габдрахимов, К.Р. Фахриева, Р.Р. Хаертдинов // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля – фундамент подготовки специалистов будущего: материалы междунар. науч.-метод. конф. - Салават, 2012. Т. 1. - С. 218.

9. Габдрахимов, М.С. Изменения вибрации электронасосной установки на стенде испытаний ЭЦН / М.С. Габдрахимов, К.Р. Фахриева // Современные технологии в нефтегазовом деле: материалы междунар. науч.-техн. конф. - Октябрьский, 2013. Т. 2. - С. 120.

10. Габдрахимов, М.С. Виброзащита компоновки установок электроцентробежных насосов / М.С. Габдрахимов, К.Р. Фахриева, Р.И. Сулейманов, Л.М. Зарипова // Современные технологии в нефтегазовом деле: материалы междунар. науч. – техн. конф. - Октябрьский, 2013. Т. 2. - С. 114.

11. Габдрахимов, М.С. Продольные колебания скважинного оборудования установок электроцентробежного насоса / М.С. Габдрахимов, К.Р. Фахриева // Материалы 40-й науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов.- Октябрьский, 2013. Т.2. – С. 112.

**– патент РФ на изобретение:**

12. Виброгаситель растягивающих, сжимающих и крутильных колебаний» / Габдрахимов М.С., Фахриева К.Р., Сулейманов Р.И., Зарипова Л.М. – № 2010149025/032014 (070798): пат. на изобр. № 2455452.