

УДК 622.24

**ВОЗМОЖНОСТИ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ ПОВЕРХНОСТНОГО
СЛОЯ РОТОРОВ ВИНТОВЫХ ЗАБОЙНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**
POSSIBILITIES TO EXTEND THE LIFETIME OF SCREW DOWNHOLE MOTOR
ROTORS SURFACE LAYER

**А. В. Ошибков, М. В. Двойников, С. А. Фролов, В. Н. Светашов, В. Н. Паньков,
Р. А. Хлопотов**

A. V. Oshibkov, M. V. Dvoynikov, S. A. Frolov, V. N. Svetashov, V. N. Pan'kov,
P. A. Khlopotov

*Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень
Национальный минерально-сырьевой университет "Горный", г. Санкт-Петербург
ООО «Производственная фирма Сокол», г. Пермь*

**Ключевые слова: винтовой забойный двигатель; поверхностное напыление;
защитное покрытие ротора**

Key words: screw downhole motor; surface sputtering; protection coating of rotors

Строительство нефтяных и газовых скважин практически повсеместно осуществляется с применением винтовых забойных двигателей (ВЗД), причем в России данный привод долота обеспечивает более 70 % всего объема бурения [1].

Увеличение глубин скважин, наличие сложнопостроенных проектных траекторий профилей, содержащих совокупность участков набора, снижения и стабилизации зенитного угла, приводит к необходимости создания надежных и долговечных двигателей [2, 3]. Немаловажным фактором, обеспечивающим сохранность основных элементов двигателя ротор — статор, является снижение твердой фазы в системе бурового раствора. Содержание абразивных частиц, в том числе наличие песка, приводит к увеличению износа винтовой поверхности ротора. В свою очередь конструктивная особенность героторного механизма ВЗД предусматривает вращение ротора относительно собственной оси, направленной по часовой стрелке, и переносное движение относительно оси статора в противоположном направлении [4]. Планетарное движение ротора относительно статора, контакт их зубьев определяют наличие трения качения (во впадине) и трения скольжения, отмечающихся от основания зуба статора до его вершины [5]. Как правило, это приводит к износу периферийной левой стороны эластомера статора и износу покрытия ротора. Износ ротора обычно представлен отслоением поверхностного слоя, который наносится на винтовую поверхность в завершающей стадии его изготовления.

На рис. 1 представлен ротор двигателя до (а) и после его отработки (б) в скважине от 200 до 300 часов при содержании песка в буровом растворе от 0,2 до 0,5 %.



Рис.1. Ротор до (а) и после его отработки (б) в скважине

Дефекты поверхностного слоя ротора приводят к кратному износу эластомера статора, снижению герметичности камер двигателя и, как следствие, снижению общего дифференциального перепада давления, определяющего нагрузочную способность ВЗД. Увеличение срока эксплуатации винтового забойного двигателя с сохранением

его энергетических характеристик возможно при разработке автоматической линии и технологии нанесения защитного покрытия ротора с последующим оплавлением.

Для проведения более детального анализа способов покрытия роторов рассмотрим некоторые традиционные технологии защитного покрытия, отработанные многими предприятиями отрасли. Наиболее распространенная из них — хромовое покрытие поверхностного слоя. Данная технология имеет следующие недостатки: отсутствие стойкости к агрессивным средам (соляная кислота); большое количество ядовитых выделений; достаточно небольшая толщина хромового слоя (0,05–0,2 мм); склонность к скалыванию; отсутствие возможности местного восстановления хромового покрытия.

Также известно, что на протяжении двух десятков лет успешно применяется технология газопламенного нанесения защитного покрытия (на основе самофлюсующихся порошков) для повышения износостойкости и повышения коррозионной стойкости плунжеров штанговых глубинных насосов. Однако, применив аналогичную технологию по нанесению защитного слоя для роторов винтовых забойных двигателей на практике, выявлены следующие проблемы: неравномерность наплавляемого слоя ввиду сложной геометрии; возможность оплавления только газовой горелкой; перегрев обрабатываемой детали и, как следствие, поводки и внутренние напряжения; сложность автоматизации процесса (необходимо контролировать появление зеркальной поверхности).

Предлагаемая технология газопламенного напыления с последующим оплавлением лазером лишена всех вышеперечисленных проблем.

В качестве преимуществ лазерной наплавки можно обозначить: равномерность оплаваемого слоя на детали любой геометрической формы ввиду сложной геометрии; возможность оплавления (выглаживания) поверхности для уменьшения шероховатости; отсутствие перегрева обрабатываемой детали; простота автоматизации процесса (необходим робот-манипулятор для перемещения лазерной головки).

Однако можно отметить следующие недостатки: дороговизна оборудования, низкая производительность. Для сравнения в таблице представлены технические характеристики разных видов поверхностной обработки.

Технические характеристики разных видов поверхностной обработки

| Метод нанесения покрытия | Газопламенное напыление | Плазменное напыление | Высокоскоростное напыление | Газопламенное напыление с последующим оплавлением лазером, 2 кВт |
|--|-------------------------|----------------------|----------------------------|--|
| Производительность, кг/час | 3–15 | 2–10 | 8–10 | 0,8 |
| Адгезия, МПа | 100 | 100 | 200 | 360 |
| Пористость, % | 7–20 | 12 | 1 | 0 |
| Толщина, мм | 0,5–15 | 0,05–20 | 0,03–10 | 0,01–5,0 |
| Значительное термическое воздействие на деталь | да | да | да | нет |
| Требуется удаление органических и неорганических загрязнений | да | да | да | Достаточно удаления органических загрязнений |

Предложенный метод напыления роторов двигателей, представленный газопламенным напылением с последующим оплавлением лазером, является наиболее приемлемым (см. табл.). Например, адгезионные свойства практически в 1,5 раза превышают показатели существующих аналогов. При этом наблюдается минимальное термическое воздействие на металлическую поверхность на протяжении всего процесса обработки ротора.

Ранее было отмечено, что технология нанесения защитного покрытия ротора с последующим оплавлением предусматривает наличие автоматической линии его нанесения и контроля. Линия по нанесению защитных покрытий представляет собой совокупность блоков, выполняющих разные функции, объединенные в одну систему с общим пультом управления.

Для понятия общего принципа работы системы рассмотрим кратко состав блоков и их назначение. На рис. 2 представлен блок пневмоабразивной очистки, содержащий камеру 1 с системой перемещения и регулировки скорости 2; систему зажима вращения ротора, включающую в себя неподвижную 3 и подвижную 4 опоры; установку дробеструйной очистки 5; систему подготовки и циркуляции технологической среды 6; компрессор 7; систему вытяжной вентиляции 8 и контроллер управления 9.

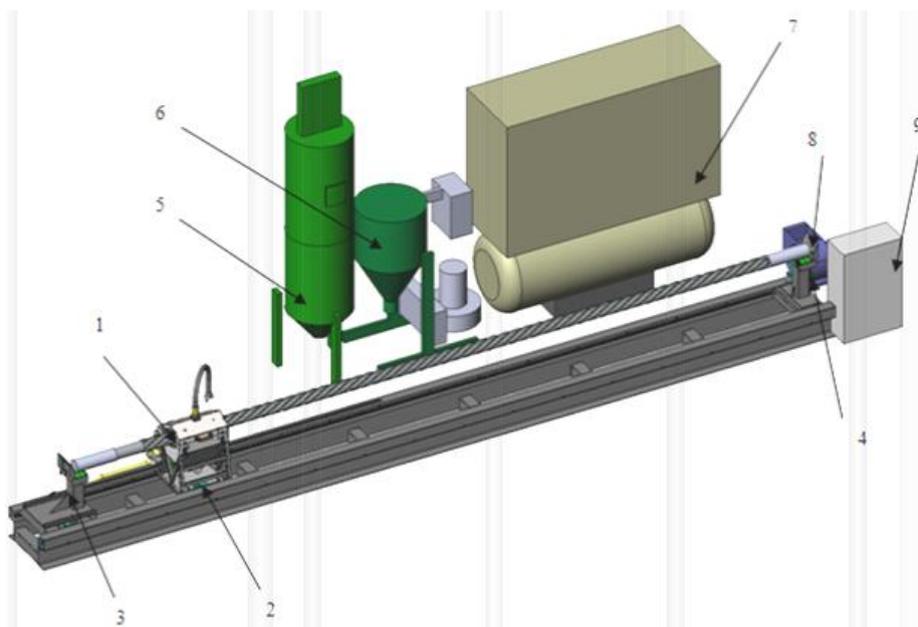


Рис. 2. Блок пневмоабразивной очистки

Пневмоабразивная очистка осуществляется следующим образом. После установки заготовки ротора на опоры, предварительно установленные, в соответствии с выбранной программой, на необходимое расстояние опоры (в зависимости от длины ротора), в камеру, охватывающую часть ротора, подается технологическая среда (абразив), и производится перемещение камеры для очистки поверхности ротора. Подача технологической среды из бункера, входящего в состав установки дробеструйной обработки, осуществляется с помощью сжатого воздуха. Забор отработанной технологической среды из камеры производится с помощью вакуумного насоса системы подготовки и циркуляции. После очистки технологическая среда с помощью системы подготовки и циркуляции поступает обратно в бункер. Затем технологическая среда (дробь) собирается в конический бункер системой автоматического сбора при помощи вакуумного насоса, создающего вакуум в бункере-сепараторе. В бункере-сепараторе производится ступенчатая очистка от пыли и крупных частиц, а затем попадает в пескоструйный аппарат. Загрязненный пылью воздух очищается, проходя через фильтр, выбрасывается в атмосферу.

Герметичность камеры (рис. 3) во время операции мойки обеспечивается резиновыми пыльниками 1, герметично отделяющими отсек очистки 2 камеры от шлюзовых отсеков 3, и системой вытяжной вентиляции, которая создает разрежение воздуха в шлюзовых отсеках камеры.

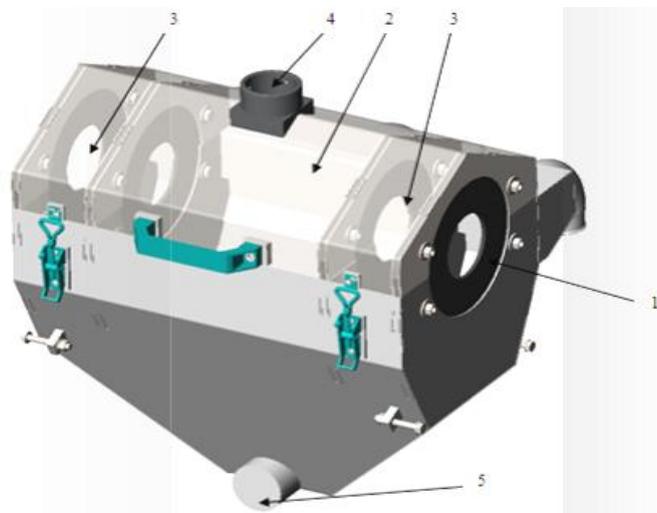


Рис. 3. Камера блока пневмоабразивной очистки (крышка камеры показана прозрачной)

Подача технологической среды осуществляется с помощью специального сопла, установленного в держатель 4. Забор технологической среды осуществляется с помощью патрубка 5, соединенного с системой подготовки и циркуляции технологической среды гибким шлангом.

Перемещение камеры и подвижной опоры происходит по профильным линейным направляющим с помощью передачи шестерня — зубчатая рейка, приводимой в движение шаговым двигателем. Контроль местоположения при этом производится вычислением числа оборотов шагового двигателя при известных параметрах передачи шестерня — зубчатая рейка.

Неотъемлемой частью системы является блок контроля геометрических параметров, работа которого основана на сканировании поверхности ротора 2D-сканером по принципу оптической триангуляции (рис. 4). Излучение полупроводникового лазера формируется в виде линии и проецируется на объект.

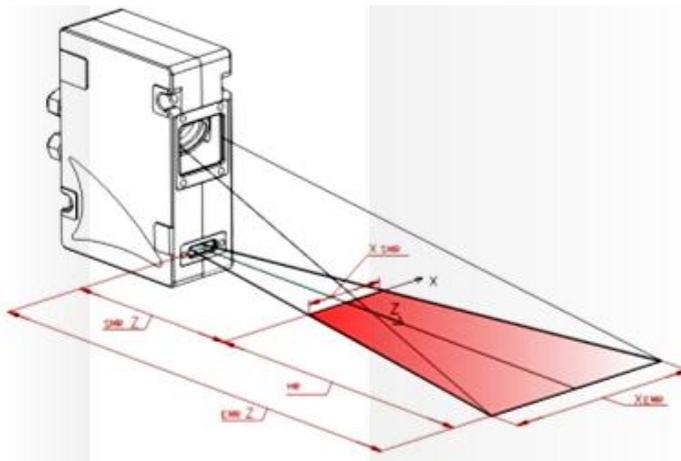


Рис. 4. 2D-сканер контроля геометрических параметров

Рассеянное на объекте излучение объективом собирается на двумерной CMOS-матрице. Полученное изображение контура объекта анализируется сигнальным про-

цессором, который рассчитывает расстояние до объекта (координата Z) для каждой из множества точек вдоль лазерной линии на объекте (координата X). Сканеры характеризуются началом рабочего диапазона (SMR) по координате Z, рабочим диапазоном (MR) по координате Z, рабочим диапазоном по координате X в начале рабочего диапазона по Z (Xsmr) и в конце рабочего диапазона по Z (Xemr).

Так как сканер считывает координаты точек только по лазерной линии, необходимо обеспечить перемещение в двух направлениях: концентрично вокруг оси ротора и линейно вдоль оси ротора. При этом, для создания 3D-модели ротора необходимо точно получать данные о положении сканера, как об угловом, так и о линейном. Для этого решено использовать оптические энкодеры, обеспечивающие достаточную точность определения положения и способные работать с высокой скоростью.

Энкодер — система, включающая в себя считывающую головку, представляющую сверхбыструю миниатюрную цифровую камеру, выполняющую снимки шкалы, которая представляет собой длинный неповторяющийся штриховой код. В управляющей системе энкодера выполняется анализ этих снимков для определения их положения с достаточно высоким разрешением — до 1 нм.

Передача данных от энкодера RESOLUTE осуществляется в чистом последовательном формате. Контроллер посылает слово запроса, в которое включен заранее определенный передний или задний фронт бита критических данных; это дает команду считывающей головке зафиксировать отсчет данных положения, тем самым «ставится штамп времени» при сборе данных. В этот момент на энкодере осуществляется вспышка светодиодного источника света, и делается снимок шкалы. Определяющим фактором выбора энкодера является то, что разность по времени между фронтом бита критических данных и выполнением снимка контролируется с точностью до нескольких наносекунд. Это обстоятельство является одним из тех существенных признаков, которые делают его исключительно подходящим для использования в данной линии.

Ранее было отмечено, что ротор опирается на подвижную и неподвижную опоры. Причем подвижная опора перемещается по станине заготовки, изготовленной из металлического швеллера и не связанной с измерительной станиной для исключения деформации из-за веса ротора. Неподвижная опора ротора представляет собой кулачковый патрон, установленный на станине заготовки. Также на станине заготовки установлены лазерные излучатели, соосные с датчиками пространственного положения каретки. При отклонении каретки эти датчики фиксируют ее положение, и при построении трехмерной модели ротора на основе данных, полученных с этих датчиков, компенсируется положение сканера.

Данные с 2D-сканера передаются на систему управления на базе персонального компьютера по беспроводной сети. Такое решение принято для отказа от проводов, физически связывающих измерительную каретку и систему управления для снижения нагрузки и обеспечения равномерности перемещения измерительной каретки. Общий вид модели блока контроля геометрических параметров представлен на рис. 5

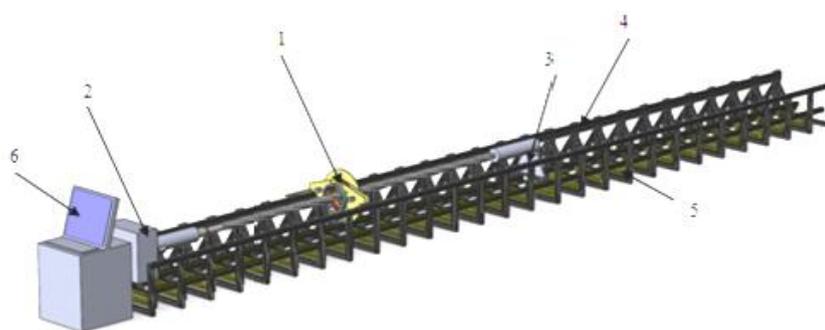


Рис. 5. Блок контроля геометрических параметров:

1 — измерительная каретка, 2 — неподвижная опора, 3 — подвижная опора, 4 — измерительная станина, 5 — станина заготовки, 6 — система управления

В завершение необходимо затронуть работу одного из основных элементов линии — блока нанесения защитных покрытий. Нанесение защитного покрытия производится газопламенным методом, с помощью пистолета, закрепленного на кронштейне, установленном на запястье робота-манипулятора (рис. 6).

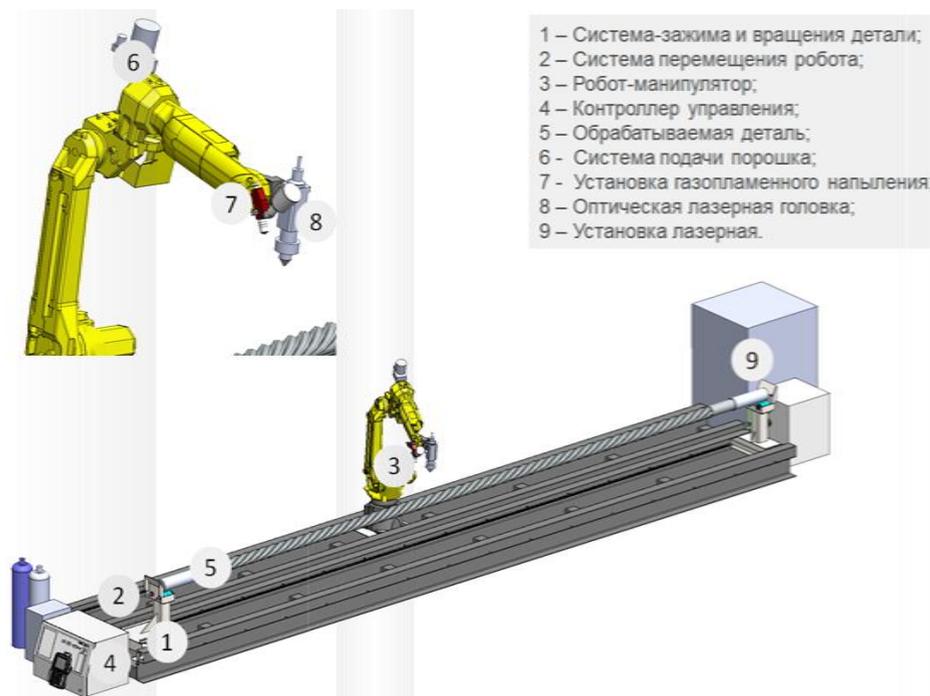


Рис. 6. Принципиальная схема блока нанесения защитных покрытий

Подача порошка производится с помощью питателя порошка, который предназначен для смешения и дозирования порошка с транспортирующим газом с целью доставки смеси до пистолета для газопламенной наплавки. Контроль и регулировка параметров газов (расход, давление), необходимых для обеспечения работы пистолета для газопламенной наплавки, производится с помощью пневмогазовой станции.

Установка лазерного оплавления состоит из лазера, предназначенного для генерации лазерного излучения с высокой интенсивностью, chillера — охлаждения лазера; оптической головки, обеспечивающей фокусирование лазерного луча на поверхности обрабатываемой детали. Оптическая головка, закрепленная на кронштейне, смонтирована на запястье робота-манипулятора. Перемещение робота вдоль ротора осуществляется с помощью системы перемещения робота-манипулятора, состоящей из рамы с направляющими, системы привода и каретки, на которую с механизмом поворота устанавливается робот-манипулятор. Все приводные элементы системы оснащены датчиком положения, информация с которого передается в систему управления для определения положения в пространстве пистолета для газопламенной наплавки или оптической головки. Система зажима ротора также имеет датчик углового положения ротора, данные с которого контроллер робота-манипулятора обрабатывает для построения программы наплавки/оплавления. Причем контроллер осуществляет управление приводами и прочими исполнительными элементами блока. В свою очередь программное обеспечение, используемое на контроллере, обеспечивает возможность настройки,

программирования и записи положений робота, запуска системы, диагностики и контроля состояния работы всей системы автоматической линии.

В заключение можно сказать, что использование разработанной автономной линии нанесения покрытий на поверхность винтовой линии роторов повысит надежность винтовых забойных двигателей при эксплуатации их в более сложных скважинных условиях (повышенная абразивность, химическая стойкость, температура)*.

*Примечание: Работа выполнена совместно с Тюменским государственным нефтегазовым университетом и производственной фирмой ООО «Сокол» по комплексному проекту создания высокотехнологичного производства «Разработка, проектирование, изготовление и монтаж линии по нанесению защитных покрытий», шифр 2014-218-05-128. Проект реализуется за счет субсидии на государственную поддержку кооперации российских высших учебных заведений, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

Список литературы

1. Двойников М. В. Бурение нефтяных и газовых скважин модернизированными винтовыми забойными двигателями (научное обобщение, результаты исследований и внедрения) / Дисс. докт. техн. наук – Тюмень, 2011. – С. 129-150
2. Ошибков А. В., Двойников М. В. Анализ проектных решений и технологических приемов проектирования и реализации профилей наклонно направленных и горизонтальных скважин // Известия вузов. Нефть и газ. – 2013. – № 4. – С. 40-44.
3. Ковенский И. М., Ошибков А. В., Фролов С. А., Двойников М. В. Упрочнение поверхностного слоя роторов винтовых забойных двигателей газотермическими покрытиями // Известия вузов. Нефть и газ. – 2014. – № 5. – С. 89-92.
4. Балденко Д. Ф., Балденко Ф. Д., Гноевых А. Н. Одновинтовые гидравлические машины: В 2 т. – М.: ООО «ИРЦ Газпром». – 2007. – Т 2. Винтовые забойные двигатели. – С. 3-20.
5. Карапетов Р. В. Повышение эффективности бурения скважин с применением винтовых забойных двигателей за счет увеличения их моторесурса: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М., 2006. – С. 6.

Сведения об авторах

Ошибков Александр Валерьевич, директор Департамента стратегического развития, Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, тел. 89323211256, e-mail: oshibkov@mail.ru

Двойников Михаил Владимирович, д. т. н., профессор кафедры «Бурение скважин», НМСУ «Горный», г. Санкт-Петербург, тел. 89224715684, e-mail: dvoinik72@gmail.com

Фролов Сергей Андреевич, директор Экспериментального завода буровой техники, Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, тел. 89068203000, e-mail: frolov_72@inbox.ru

Светашов Владимир Николаевич, начальник конструкторского отдела Экспериментального завода буровой техники, Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, тел. 792204444764, e-mail: svetashov@mai.ru

Паньков Владимир Николаевич, генеральный директор ООО «Производственная фирма Сокол», тел. 89226489144, e-mail: pankov@pfsokol.ru

Хлопотов Роман Андреевич, инженер-конструктор Экспериментального завода буровой техники, Тюменский государственный нефтегазовый университет, г. Тюмень, тел. 89097425685, e-mail: roman.khlopotov@gmail.com

Information about the authors

Oshibkov A. V., Director of the Department for strategic development. Tyumen State Oil and gas University, phone: 89323211256, e-mail: oshibkov@mail.ru

Dvoinikov M. V., Doctor of Engineering, professor of the chair «Drilling of wells», NMSU «Gorny», St. Petersburg, phone: 89224715684, e-mail: dvoinik72@gmail.com

Frolov S. A., Director of the experimental plant for drilling technique, Tyumen State Oil and gas University, phone: 89068203000, e-mail: frolov_72@inbox.ru

Svetashov V. N., head of the design-engineering department, of the experimental plant for drilling technique, Tyumen State Oil and gas University, phone: 792204444764, e-mail: svetashov@mai.ru

Pan'kov V. N., General director of the experimental plant for drilling technique, Tyumen State Oil and gas University, phone: 89226489144, e-mail: pankov@pfsokol.ru

Khlopotov R. A., design engineer of the experimental plant for drilling technique, Tyumen State Oil and gas University, phone: 89097425685, e-mail: roman.khlopotov@gmail.com