

## МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.23.05

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИИ КОЛТЮБИНГОВЫХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

### ASSURANCE OF STRUCTURAL RELIABILITY OF COILED TUBING UNITS IN THE FAR NORTH

Васильев Владимир Владимирович<sup>1</sup>,  
аспирант, e-mail: [verizar@rambler.ru](mailto:verizar@rambler.ru)

Vasilev Vladimir V.<sup>1</sup>, Post graduate student

Кондрашов Пётр Михайлович<sup>1</sup>,  
канд. техн. наук, e-mail: [pkondrashov@sfsu-kras.ru](mailto:pkondrashov@sfsu-kras.ru)

Kondrashov Petr M.<sup>1</sup>, C.Sc. (Engineering)

Зеньков Игорь Владимирович<sup>2</sup>,

докт. техн. наук, e-mail: [zenkoviv@mail.ru](mailto:zenkoviv@mail.ru)

Zenkov Igor V.<sup>2</sup>, Dr.Sc. (Engineering)

<sup>1</sup>Сибирский федеральный университет, 660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

<sup>1</sup>Siberian Federal University, 79 Svobodny Prospect Krasnoyarsk 660041 Russia

<sup>2</sup>Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука» КНЦ СО РАН, 660049, Россия, г. Красноярск, пр. Мира, 53.

<sup>2</sup>Special Design and Technological Bureau "Nauka" KSC SB RAS, 53 Mira Prospect Krasnoyarsk 660049 Russia

**Аннотация:** В данной статье обосновывается необходимость совершенствования применяемых технологий ремонта скважин и конструирования колтюбинговых установок для эксплуатации в регионах Крайнего Севера при температурах до - 55°C. Приведены статистические данные по неисправностям колтюбинговых установок с их последующим анализом. Сформулированы предпосылки к разработке методики по оценке качества колтюбинговых установок для эксплуатации в суровых климатических условиях, на основе анализа надежности их работы. Затронуты возможные перспективы развития отечественного колтюбинга.

**Abstract:** This article explains the need to improve the technologies used for well workover and coiled tubing unit design which are used in regions of the Far North at temperatures below - 55 ° C. The statistical data on coiled tubing unit faults and their subsequent analysis are presented. Prerequisites are formulated for developing methodology on assessing the quality of coiled tubing units, which are used in harsh environments, on the basis of the reliability analysis of their work. The possible prospects for developing domestic coiled tubing are mentioned.

**Ключевые слова:** колтюбинг; колтюбинговые технологии; колтюбинговые установки; ремонт скважин; надежность; методика; Крайний Север.

**Keywords:** coiled tubing; coiled tubing technology; coiled tubing units; workover; reliability; technique; Far North.

В настоящее время, работы по освоению новых мест для добычи нефти и газа в Красноярском крае постепенно смещаются на территории за северным полярным кругом, где специалисты сталкиваются с новыми трудностями, связанными, помимо всего прочего, с ремонтом газовых и газо-конденсатных скважин. Суровые климатические условия регионов Крайнего Севера зачастую приводят к резкому увеличению трудоемкости большинства ремонтных операций, а также способствуют повышению вероятности возникновения риска аварийных ситуаций, что, в первую очередь,

связано с воздействием отрицательных температур, наличием в скважинах мерзлых пород и возможным гидратообразованием [1-3]. В условиях Севера возрастает влияние человеческого фактора во всех областях трудовой деятельности. Как следствие, возникает необходимость в совершенствовании существующих технологий ремонта скважин и решении сопутствующих задач, связанных с сокращением сроков проведения ремонтных работ, увеличением надежности эксплуатируемого оборудования, автоматизацией процессов монтажа/демонтажа и контроля над оборудованием.

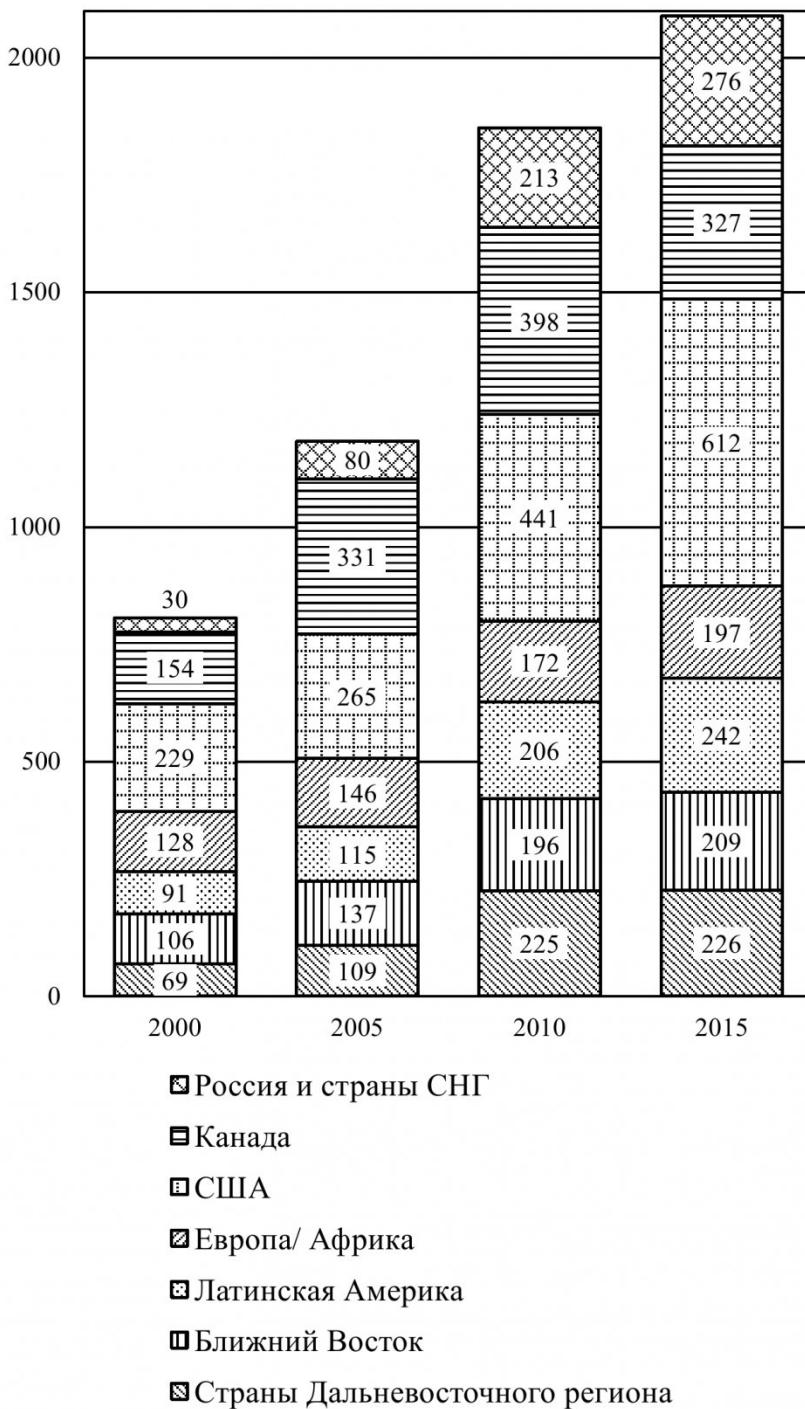


Рис. 1. Количество колтюбинговых установок в мире

Одним из возможных путей решения вышеизложенных проблем может стать применение колтюбинговых технологий. На данный момент времени, колтюбинг входит в группу наиболее перспективных и быстроразвивающихся направлений нефтегазовой отрасли, в том числе и для ремонта скважин. Согласно данным ассоциации специалистов по колтюбинговым технологиям и внутристкважинным работам (ICoTA) (рис. 1) [4], общее число эксплуатируемых колтюбинговых установок в мире демонстрирует неуклонный рост практически повсеместно, и по состоянию на 2015

год составляет 2089 единиц.

Согласно этой статистике, число работающих колтюбинговых установок в России и странах СНГ в течение последних 10 лет выросло примерно в 3,5 раза, что свидетельствует о быстрорастущем спросе на колтюбинговые технологии в отечественных нефтегазодобывающих компаниях. Это связано с широким спектром осуществляемых операций, его постоянным расширением и существенными преимуществами перед традиционными технологиями по ремонту скважин. Среди основных достоинств колтюбинговых технологий

Таблица 1. Неисправности механической части колтюбинговой установки

№	Инжектор	Узел намотки безмуфтовых длинномерных труб (БДТ)	Двигатель / ходовая часть
1	Поломка пальцев звена цепи (20.07.14 / Флот 2)	Замена вала укладчика (апрель 2014 г. / Флот 1)	Замена двигателя ЯМЗ 7511.10-06 (03.12.13 / Флот 1)
2	Замена датчика нагрузки (01.09.14 / Флот 2)	Замена диска нажимного на механизме укладки ГТ (26.05.14 / Флот 2)	Замена уплотнительных колец на механизме включения карданного вала (КОМ) (ноябрь 2014 г. / Флот 1)
3	Износ, замена роликов на направляющем желобе (21.11.14 / Флот 2)	Замена диска сцепления (сентябрь 2015 г. / Флот 1)	Замена уплотнительных колец на механизме включения карданного вала (КОМ) (январь 2015 г. / Флот 1)
4	Поломка пальцев звена цепи, полная замена цепей (16.09.15 / Флот 2)	Замена диска сцепления (февраль 2015 г. / Флот 2)	Замена уплотнительных колец на механизме включения карданного вала (КОМ) (июль 2015 г. / Флот 2)
5	Замена гидроцилиндра на натяжении цепи (23.09.15 / Флот 2)	Замена диска сцепления (июль 2014 г. / Флот 1)	Замена уплотнительных колец на механизме включения карданного вала (КОМ) (декабрь 2014 г. / Флот 2)
6	Замена уплотнительных колец на гидроцилиндре на прижим цепей (15.12.15 / Флот 2)	Замена поводка механизма укладки ГТ (26.05.14 / Флот 2)	Замена двигателя ЯМЗ 7511.10-06 (июнь 2015 г. / Флот 2)
7	Ремонт цепи инжектора (июнь 2013 г. / Флот 1)		
8	Замена гидравлического насоса инжектора (август 2015 г. / Флот 1)		

можно выделить:

- работу без подъема глубинно-насосного оборудования;
- возможность проведения неограниченного количества обработок призабойной зоны за одну спуско-подъемную операцию;
- возможность проведения работ по капитальному ремонту скважины без глушения;
- значительное снижение продолжительности ремонта и его стоимости;
- высокую экологичность [5].

Сопоставляя проблемы, возникающие при ремонте газовых и газоконденсатных скважин в условиях Крайнего Севера и преимущества колтюбинговых технологий, очевидно, что колтюбинг в большей степени способствует решению поставленных задач. Однако, наряду с безусловными достоинствами колтюбинговых технологий,

возникает ряд проблем, связанных непосредственно с их эксплуатацией в жестких условиях Крайнего Севера, где температура воздуха может опускаться до отметки -55°C, в то время как максимально допустимая температура эксплуатации современных установок находится в диапазоне от -40°C до + 40°C. Работа оборудования при запредельных отрицательных температурах ведет к значительному снижению надежности оборудования и увеличению вероятности возникновения отказов. В тоже время, невозможно с высокой точностью спрогнозировать, что явится причиной возможных отказов оборудования, следовательно, установить их количество и распределение во времени. В какой-то мере отказы являются случайным событием, и для оценки вероятности выхода оборудования из строя той или иной группы узлов и агрегатов необходимо использовать веро-

Таблица 2. Неисправности гидравлической части колтюбинговой установки

№	Гидросистема	Привод насосов
1	Замена гидравлического шланга на выдвижении лапы (09.09.14 / Флот 1)	Замена редуктора привода гидравлических насосов (май 2014 г. / Флот 1)
2	Замена сальника редуктора верхнего оборудования (24.09.15 / Флот 2)	Замена редуктора привода гидравлических насосов, замена гидравлического насоса приоритетного давления (июнь 2012 г. / Флот 2)
3	Ремонт гидронасоса ГНКТ (01.08.14 / Флот 2)	Замена редуктора привода гидравлических насосов (июль 2013 г. / Флот 2)
4	Замена регулятора пульта управления на натяжении цепи (15.06.14 / Флот 2)	Замена редуктора привода гидравлических насосов (октябрь 2014 г. / Флот 2)
5	Ремонт гидронасоса (август 2014 г. / Флот 1)	

ятно-статистический подход. Общая ориентировочная оценка может быть определена по статистическому анализу отказов, имевших место в предыдущие годы эксплуатации.

На основе статистических данных по отказам колтюбинговых установок за период с 2012 по 2015 год (табл. 1, табл. 2), предоставленных предприятиями, проводящими операции с использованием гибких насосно-компрессорных труб (ГНКТ) в Красноярском крае, были построены следующие графики: гистограмма количества отказов ГНКТ, распределенных по месяцам за период с 2012 по 2015 годы (рис. 2); график отказов ГНКТ, распределенных по месяцам за 2014 год (рис. 3); график отказов ГНКТ, распределенных по месяцам за 2015 год (рис. 4); совмещенный график отказов колтюбинговых установок за период 2014 – 2015

гг. (рис. 5); круговая диаграмма отказов ГНКТ в отдельных узлах в процентном соотношении (рис. 6).

Анализируя график распределения отказов по месяцам за 2014 г. (рис. 3) можно отметить следующее:

- январь – март – отказы отсутствуют;
- апрель – май - стремительный рост числа отказов, достижение пикового годового значения в 20 % от их общего количества за год;
- май – июнь - уменьшение числа отказов до отметки в 6,67 %;
- июнь – сентябрь - незначительный рост числа отказов, с последующим установившимся значением в 13,32 %;
- сентябрь – декабрь - периодическое уменьшение/увеличение количества отказов в интервале

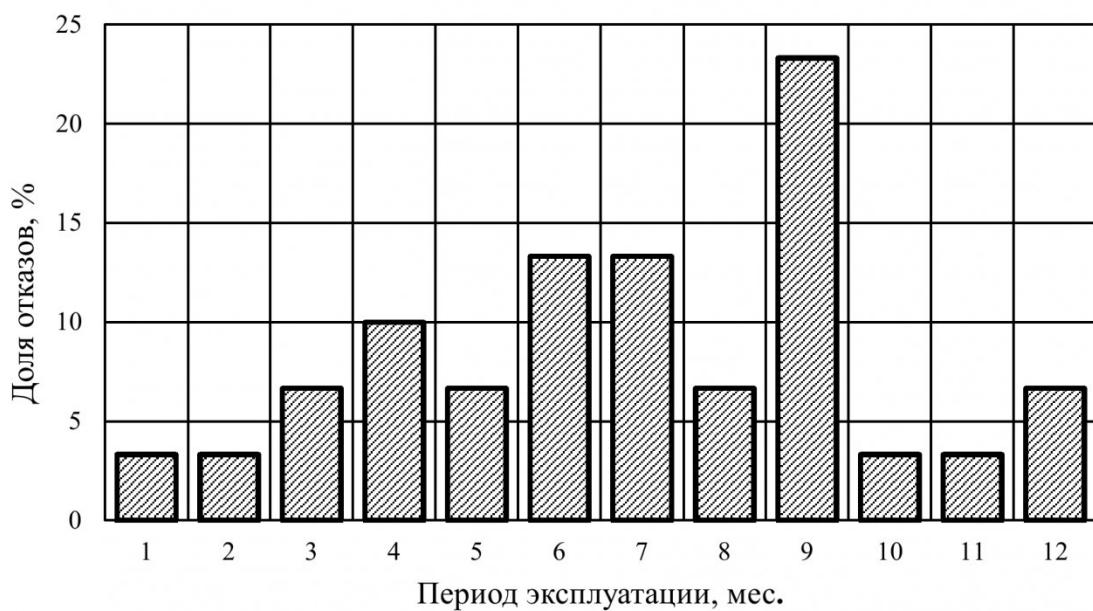


Рис. 2. Распределение отказов по месяцам за период 2012 – 2015 гг.

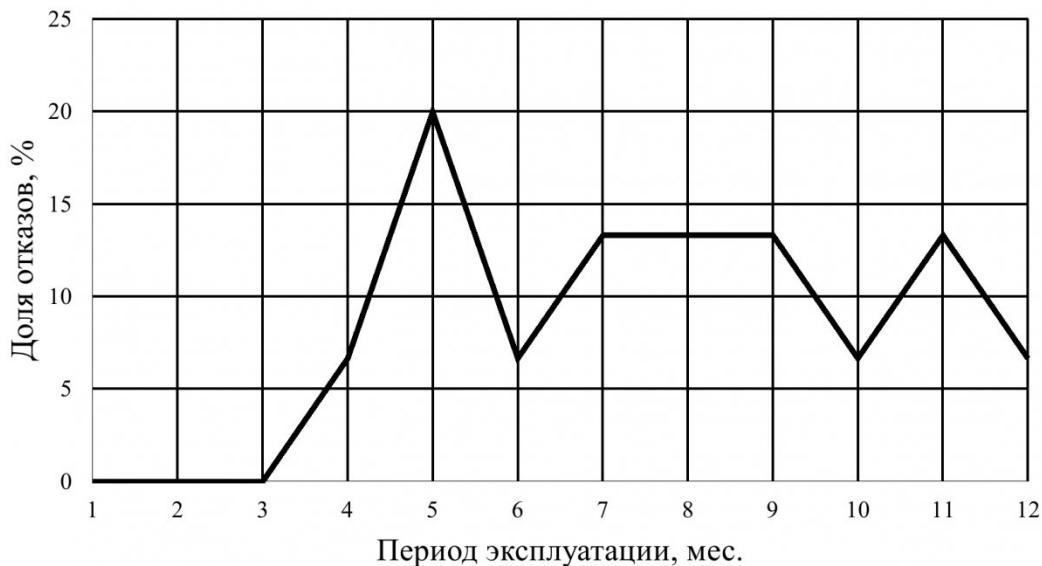


Рис. 3. Распределение отказов по месяцам за 2014 г.

от 6,67 % до 13,32 %.

На графике распределения отказов по месяцам за 2015 г. (рис. 4) можно наблюдать следующее:

- январь – февраль – число отказов установилось на значении в 10 % от общего количества отказов за год;

- март – май – отказы отсутствуют;

- май – июнь - увеличение числа отказов до отметки 20 %;

- июнь – июль - незначительное уменьшение числа отказов до отметки 10 %;

- июль – август – установившееся количество отказов;

- август – сентябрь – резкое увеличение количества отказов, достижение пикового годового значения в 40 % от их общего количества за год;

- сентябрь – декабрь – отказы отсутствуют.

Статистический анализ неисправностей колтюбинговых установок показал, что частота

отказов имеет определенную связь со сменой времени года (рис. 2, рис. 5). Наибольшее их количество приходится на сентябрь. Одной из причин возникающего потока отказов может быть резкая смена температуры (сезонные колебания температуры), свойственная для данного региона.

Анализируя данные, показанные на рис. 6, можно сделать вывод, что наибольшее число отказов приходится на инжектор (27 %), по 20 % приходится на двигатель/ ходовую часть и узел намотки БДТ, 17 % - на гидравлическую систему.

Наиболее характерными неисправностями являются: для инжектора - износ, поломка пальцев звеньев цепи; узел намотки БДТ – износ диска сцепления; гидросистема – поломка гидронасоса ГНКТ; привод насосов – поломка редуктора привода гидравлических насосов; двигатель, ходовая часть - износ уплотнительных колец на механизме включения карданного вала (КОМ).



Рис. 4. Распределение отказов по месяцам за 2015 г.



Рис. 5. Совмещенный график распределение отказов по месяцам за 2014-2015 гг.

Несмотря на то, что на гидравлическую систему приходится только 17 % от общего числа зарегистрированных отказов, исходя из многолетнего опыта эксплуатации гидравлических систем в условиях низких температур можно ожидать, что этот показатель увеличится в несколько раз [6-9].

В настоящее время имеются методы повышения надежности колтюбинных установок, в первую очередь, направленные на устранение проблем, возникающих при эксплуатации установки, путем улучшения физико-механических и физико-химических свойств отдельных узлов и агрегатов, подвергающихся наибольшим нагрузкам и износу, что позволяет, в определенной степени, поддерживать работоспособность оборудования. В основе этих методов заложен принцип локального решения проблем, среди достоинств которого можно выделить возможность быстрого устранения возникающих отказов отдельных узлов и агрегатов оборудования. Основной недостаток таких методов в том, что они преимущественно ориентированы на повышение эксплуатационной надежности уже существующего оборудования. Исходя из общих понятий качества и надежности машин и схемы влияния факторов проектирования, производства и эксплуатации на уровень надежности машин (рис. 7), можно сделать вывод, что подобный подход позволяет устранять последствия проблем, но не причины их возникновения, т.к. основа надежности любого устройства закладывается на самых ранних этапах проектирования. [10-12]

Проблема несовершенства существующих методов повышения надежности особо остро встает при эксплуатации оборудования в условиях Крайнего Севера, где к нефтегазодобывающему оборудованию предъявляются особо жесткие требования. В этом плане, существенное влияние оказы-

вает экономическая эффективность оборудования, которая, наряду с общей надежностью машины, обеспечивается еще на стадии проектирования. С этой точки зрения, компенсирующий характер существующих методов повышения эксплуатационной надежности приводит к неудовлетворительным результатам.

Принимая во внимание вышесказанное, становится очевидно, что надежность колтюбиновой установки (КУ) необходимо задавать непосредственно на этапах проектирования, посредством разработки методики анализа, оценки и обеспечения безотказной работы установки с учетом:

- рассмотрения конструкций и принципа действия современных установок с использованием безмуфтовых длинномерных труб, направленного на определение общности и составления принципиальной конструктивной схемы колтюбиновой установки;

- детального изучения узлов и агрегатов установки, объединения их в группы по общему признаку, позволяющего упростить задачу по определению надежности установки в целом;

- выявления факторов, способных повлиять на функционирование установки при эксплуатации в заданных условиях;

- необходимости выявления и составления классификации отказов для каждой группы узлов и агрегатов по ключевым признакам (тип отказа, характер возникновения, причина и т.д.);

- необходимости формулирования понятия «общей надежности колтюбиновой установки», которое включало бы: установление свойств надежности; определение показателей для выбора характеристик надежности; установление требований по надежности; ввод математических зависимостей для оценки надежности;

- анализа существующего оборудования на



Рис. 6. Отказы ГНКТ в отдельных узлах

предмет несоответствия установленным требованиям по надежности;

- осуществления комплекса мер для достижения требуемого уровня по надежности;

- сравнения требуемых и полученных показателей надежности, проведения оценки надежности разработанной конструкции.

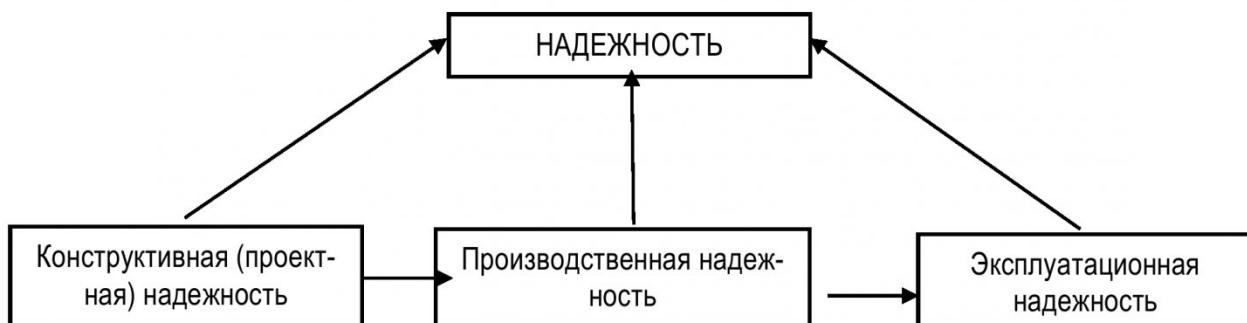


Рис. 7. Упрощенная схема влияния факторов проектирования, производства и эксплуатации на уровень надежности

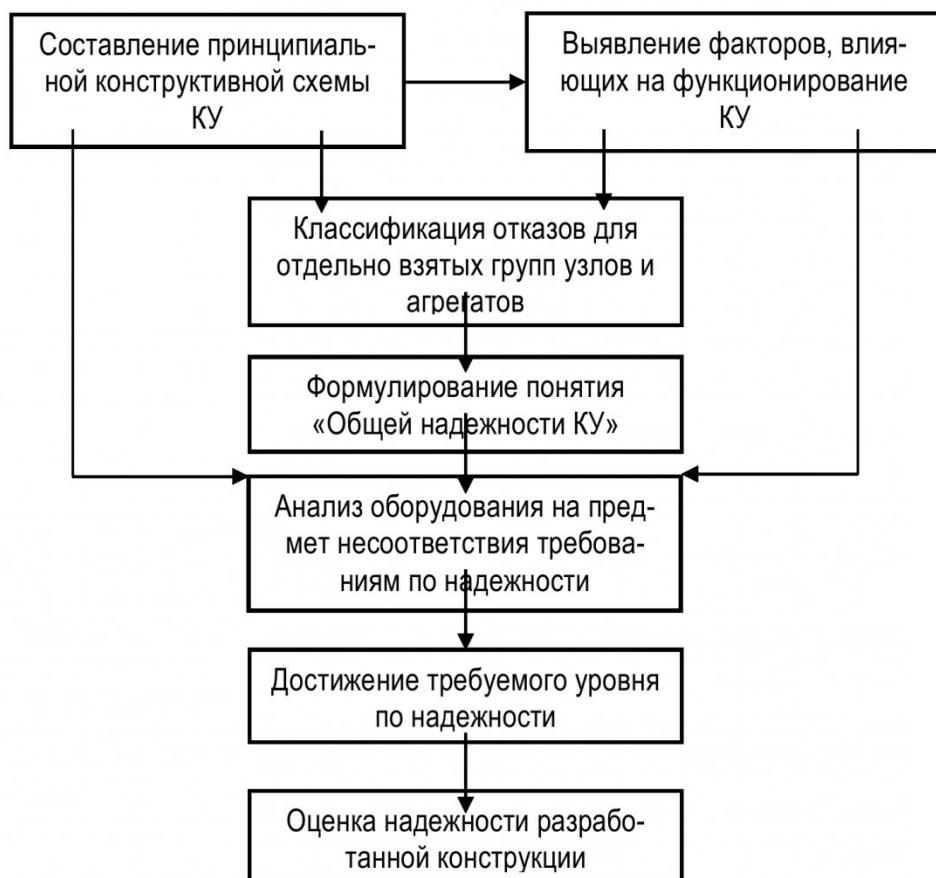


Рис. 8. Алгоритм анализа надежности колтюбинговой установки

На рис. 8 показан алгоритм осуществления оценки качества колтюбинговой установки при эксплуатации в суровых климатических условиях, с целью отображения зависимостей между основными положениями методики.

Применительно к условиям Крайнего Севера, предложенные методы обеспечения работоспособности колтюбинговых установок позволяют существенно повысить их надежность на протя-

жении всего жизненного цикла путем критического анализа конструкции, установления требований по надежности, их достижения и итоговой оценки качества разработанного оборудования

Внедрение такого рода методики наиболее перспективно в отношении отечественного производства. Согласно данным анализа российского рынка, лидерами среди поставщиков колтюбингового оборудования, являются такие компании, как

Fidmash - около 70 % рынка, Hydra Rig - около 13 %, Stewart&Stevenson - около 4 %. Около 13 % эксплуатируемых установок были произведены в России, однако общая доля выполняемых ими работ составляет не более 5 %. Низкий спрос на отечественное оборудование связан, в первую очередь, с его недостаточным уровнем надежности,

повышенной ресурсоемкостью и несоблюдением требований эргономики. Рассмотренная методика может стать одним из способов решения этих проблем, повысив конкурентоспособность отечественного оборудования на внутреннем рынке и, тем самым, оказать влияние на дальнейшее развитие колтюбинговых технологий в России.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зозуля Г.П., Гейхман М.Г., Чабаев Л.У. Применение колтюбинговых технологий при ликвидации открытого нефтегазового фонтана. // Coiled tubing times. 2008. № 25. С. 26-32.
2. Зозуля Г.П., Листак М.В., Попова Ж.С. Комплексный подход к ремонту газовых скважин с помощью колтюбинговых технологий. // Известия вузов. Нефть и газ. 2007. №7. С. 13-19.
3. Земляной А.А., Зозуля Г.П., Долгушин В.А., Дмитрук В.В., Журавлев В.В. О перспективах совершенствования колтюбинговой техники и технологий для условий Крайнего Севера. // Десятая Международная конференция по мерзлотоведению (TICOP): Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире. Том5: Расширенные тезисы на русском языке. – Тюмень, Россия: Печатник, 2012. – 384 с.
4. Coiled Tubing Industry Statistics. // Intervention and coiled tubing association. Режим доступа: <http://www.icota.com/ctrigcount.htm>
5. Булатов А.И. Колтюбинговые технологии при бурении, закачивании и ремонте нефтяных и газовых скважин: справочное пособие. – Краснодар: Изд-во «Просвещение-ЮГ», 2008. – 370 с.
6. Леоненко А.С. Обеспечение надежности горных машин в условиях Севера прогнозированием их технического состояния. // Вестник ИрГТУ. 2010. №2 (42). С. 117-119.
7. Зудов Г.Ю., Ишков А.М., Левин А.И. Методика расчета срока службы техники, эксплуатируемой в условиях холодного климата. // Вестник ИрГТУ. 2016. №6 (77). С. 112-116.
8. Сорокин А.В. Двухканальная система управления приводов экскаваторов, эксплуатирующих при низких температурах. // Вестник ИрГТУ. 2010. №2 (42). С. 126-130.
9. Долгих Е.С., Махно Д.Е. Анализ надежности фронтальных погрузчиков на горнодобывающих предприятиях Севера. // Вестник ИрГТУ. 2014. №6 (89). С. 54-58.
10. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
11. ГОСТ Р 27.001-2009. Надежность в технике. Система управления надежностью. Основные положения.
12. ГОСТ Р 27.301-2011. Надежность в технике. Управление надежностью. Техника анализа безотказности.

## REFERENCES

1. Zozulya G.P., Geykhman M.G., Chabaev L.U. Primenie koltyubingovykh tekhnologiy pri likvidatsii otkrytogo neftegazovogo fontana. // Coiled tubing times. 2008. № 25. S. 26-32.
2. Zozulya G.P., Listak M.V., Popova Zh.S. Kompleksnyy podkhod k remontu gazovykh skvazhin s pomoshch'yu koltyubingovykh tekhnologiy. // Izvestiya vuzov. Neft' i gaz. 2007. №7. S. 13-19.
3. Zemlyanoy A.A., Zozulya G.P., Dolgushin V.A., Dmitruk V.V., Zhuravlev V.V. O perspektivakh sovershenstvovaniya koltyubingovoy tekhniki i tekhnologiy dlya usloviy Kraynogo Severa.// Desyataya Mezhdunarodnaya konferentsiya po merzlotovedeniyu (TICOP): Resursy i riski regionov s vechnoy merzlotoy v menyayushchemsyia mire. Tom5: Rasshirennyye tezisy na russkom yazyke. – Tyumen', Rossiya: Pechatnik, 2012. – 384 s.
4. Coiled Tubing Industry Statistics// Intervention and coiled tubing association. Rezhim dostupa: <http://www.icota.com/ctrigcount.htm>
5. Bulatov A.I. Koltyubingovye tekhnologii pri burenii, zakachivanii i remonte neftyanykh i gazovykh skvazhin: spravochnoe posobie. – Krasnodar: Izd-vo «Prosveshchenie-Yug», 2008. – 370 s.
6. Leonenko A.S. Obespechenie nadezhnosti gornykh mashin v usloviyah Severa prognozirovaniem ikh tekhnicheskogo sostoyaniya. // Vestnik IrGTU. 2010. №2 (42). S. 117-119.
7. Zudov G.Yu., Ishkov A.M., Levin A.I. Metodika rascheta sroka sluzhby tekhniki, ekspluatiruemoy v usloviyah kholodnogo klimata. // Vestnik IrGTU. 2016. №6 (77). S. 112-116.
8. Sorokin A.V. Dvukhkanal'naya sistema upravleniya privodov ekskavatorov, ekspluatiruyushchikh pri nizkikh temperaturakh. // Vestnik IrGTU. 2010. №2 (42). S. 126-130.
9. Dolgikh E.S., Makhno D.E. Analiz nadezhnosti frontal'nykh pogruzchikov na gornodobyvayushchikh predpriyatiyakh Severa. // Vestnik IrGTU. 2014. №6 (89). S. 54-58.
10. GOST 27.002-89. Nadezhnost' v tekhnike. Osnovnye ponyatiya. Terminy i opredeleniya.
11. GOST R 27.001-2009. Nadezhnost' v tekhnike. Sistema upravleniya nadezhnost'yu. Osnovnye polozheniya.
12. GOST R 27.301-2011. Nadezhnost' v tekhnike. Upravlenie nadezhnost'yu. Tekhnika analiza bezotkaznosti.