

ОТЗЫВ

официального оппонента,
кандидата технических наук, доцента **Борейко Дмитрия Андреевича**
на диссертационную работу **Шестаковой Евгении Владимировны**
на тему: **«Вероятностно-статистическая оценка технической системы
«винтовой забойный двигатель – фрезерный инструмент»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.5.21 – «Машины, агрегаты и технологические процессы»
(технические науки)

Диссертационная работа Шестаковой Евгении Владимировны на тему
«Вероятностно-статистическая оценка технической системы «винтовой
забойный двигатель – фрезерный инструмент», представленная для отзыва,
выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном
учреждении высшего образования «Уфимский государственный нефтяной
технический университет».

1. Актуальность темы выполненной работы.

Актуальность диссертационной работы Шестаковой Е. В. обусловлена
необходимостью решения прикладной задачи по созданию системы
мониторинга и оценки технического состояния технико-технологического
комплекса, применяемого при вторичном вскрытии продуктивного пласта в
режиме реального времени. Данный комплекс включает малогабаритный
секционный винтовой забойный двигатель и специализированный фрезерный
инструмент для выполнения операций по фрезерованию «окон» в обсадных
колоннах при строительстве боковых стволов скважин.

Востребованность данной разработки продиктована современными
отраслевыми тенденциями: широким внедрением интеллектуальных систем
контроля и переходом к активной разработке месторождений на поздней
стадии эксплуатации, где технологии увеличения нефтеотдачи приобретают
критически важное значение. При этом технология создания боковых стволов
через фрезерованные «окна» является высокорискованной операцией, где
отказ инструмента или двигателя приводит к значительным экономическим
потерям и аварийным ситуациям.

Существующие методы мониторинга не в полной мере адаптированы
для оценки состояния системы «винтовой забойный двигатель – фрезерный
инструмент» в режиме реального времени. В то же время анализ её
технологических параметров, представленных в виде временных рядов,
содержит важную диагностическую информацию. Таким образом, применение

вероятностно-статистических методов для обработки сигналов и разработка на их основе специализированной системы мониторинга является своевременной и научно обоснованной задачей, соответствующей актуальным потребностям нефтегазодобывающей отрасли страны.

2. Достоверность и степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертационной работе, являются в достаточной мере обоснованными и корректно сформулированными. Соискателем проведён широкий анализ литературных источников, посвящённых теме исследования и отражающих результаты работ ведущих учёных в данной области. Достоверность результатов исследования обеспечена использованием комплекса аналитических, численных и экспериментальных исследований, включающих систематизацию теоретических знаний и практического опыта, методов статистической обработки данных, математического моделирования и экспериментальных исследований, осуществленных на оборудовании, прошедшем государственную поверку.

3. Научная новизна диссертации.

Научная новизна исследования, выполненного Шестаковой Е. В., заключается в разработке новых методических и алгоритмических решений для мониторинга и диагностики технической системы «винтовой забойный двигатель – фрезерный инструмент» и подтверждается следующими конкретными положениями:

1. Впервые для условий фрезерования «окон» в обсадной колонне на основе управления кинематическими параметрами компоновки получены и проанализированы фазовые траектории движения металлической стружки в потоке технологической жидкости, что позволило определить режимы течения и устойчивости процесса.

2. Впервые для данной технической системы установлены количественные пороговые значения диагностических критериев, позволяющие в режиме реального времени идентифицировать ключевые неисправности: заклинивание и подклинивание винтового забойного двигателя; износ фрезерного инструмента; нестабильную работу насосного оборудования и системы в целом.

3. Разработаны варианты диагностической матрицы, основанные на теореме Байеса, для совместного вероятностного анализа статистически независимых колебаний осевой нагрузки и давления технологической

жидкости. Для каждого критерия определена количественная мера его диагностической ценности, что повышает достоверность оценки технического состояния в реальном времени.

4. Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в разработке нового вероятностно-статистического метода оценки технического состояния комплекса «винтовой забойный двигатель – фрезерный инструмент» и расширении теоретических основ диагностики бурового оборудования. Метод основан на анализе в режиме реального времени колебаний технологических параметров: давления технологической жидкости и осевой нагрузки на инструмент – в процессе фрезерования «окон» в обсадных колоннах различного типа и размера. Установлены закономерностей движения металлической стружки при фрезеровании обсадной колонны и пороговые значения критериев диагностирования.

Значимость диссертационной работы Шестаковой Е. В. для практики подтверждается конкретными результатами внедрения в производственную, образовательную и научно-техническую сферы:

1. Разработанный защищённый патентом РФ на изобретение (№ 2819317) диагностический критерий, который успешно апробирован на испытательном стенде компании ООО «Перфобур» для оценки состояния системы «винтовой забойный двигатель – фрезерный инструмент» в условиях, моделирующих фрезерование «окон» в обсадных колоннах различных типоразмеров и групп прочности. В ходе испытаний установлены контрольные значения критерия для основных технологических ситуаций. Это позволяет на практике прогнозировать отказы и повышать надёжность системы, что документально подтверждено соответствующими актами.

2. Основные результаты исследования внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет». На их основе подготовлено учебное пособие «Вероятностно-статистическая оценка состояния бурового оборудования», которое используется на кафедре «Машины и оборудование нефтегазовых промыслов» при подготовке магистрантов направления 21.04.01 «Нефтегазовое дело», что способствует повышению качества инженерного образования в отрасли.

3. Разработан и зарегистрирован специализированный программный продукт (свидетельства о государственной регистрации программ на ЭВМ № 2024680895, № 2024688420), реализующий разработанные алгоритмы для автоматизированного определения технического состояния оборудования в процессе фрезерования «окон».

Совокупность этих результатов свидетельствует о высокой теоретической и практической ценности выполненного исследования.

5. Оценка содержания диссертации.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка использованных источников из 177 наименований и пяти приложений. Работа изложена на 181 странице машинописного текста, содержит 44 рисунка и 18 таблиц.

Во введении содержится развернутое и логически последовательное обоснование актуальности темы, сформулированы цель и задачи исследования. Автором обозначены положения, выносимые на защиту, а также раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава посвящена анализу современных технологий вторичного вскрытия продуктивных пластов для разработки трудноизвлекаемых запасов. Рассмотрены различные методы перфорации обсадных колонн (кумулятивная, гидропескоструйная и др.) и их недостатки, а также перспективная технология резки боковых и горизонтальных стволов через фрезерованные «окна». Проведен исторический обзор развития горизонтального бурения и эволюции конструкций фрезерного инструмента в России и за рубежом. Установлено, что современные технологии ориентированы на применение малогабаритных технических систем, таких как ООО «Перфобур», включающих секционные винтовые забойные двигатели и специальный фрезерный инструмент, что позволяет бурить каналы малого диаметра с заданной кривизной.

Патентный и научно-технический анализ показал, что основные разработки сосредоточены на совершенствовании конструкций торцевых и конусных фрез и их режущего вооружения. При этом выявлена ключевая проблема – отсутствие надежных методов оперативного мониторинга и диагностики технического состояния системы «винтовой забойный двигатель – фрезерный инструмент» в реальном времени, что повышает риски аварий и снижает общую эффективность работ.

Вторая часть главы представляет системный обзор вероятностно-статистических методов оценки технического состояния оборудования по косвенным признакам – колебаниям технологических параметров (давление, осевая нагрузка). Проанализированы преимущества и недостатки одиннадцати ключевых подходов, включая: коэффициент Джини, энтропийный анализ, коэффициент вариации, показатель Херста, анализ выбросов, корреляционную размерность, спектральный, фрактальный, рекуррентный и вейвлет-анализ, а также байесовский метод.

Установлено, что существующие методы не предлагают универсального решения для диагностики в реальном времени в условиях сложных случайных колебаний. На этом основании обоснована актуальность разработки нового диагностического критерия и автоматизированной системы для оценки состояния оборудования при фрезеровании «окон».

Во второй главе приведены описание математической модели и определение оптимальных параметров процесса фрезерования «окна» в обсадной колонне с помощью малогабаритного винтового забойного двигателя в условиях, имитирующих скважинные.

Проведен анализ существующих математических моделей процесса фрезерования обсадных колонн специальными винтовыми забойными двигателями. Установлено, что известные модели (для деревообработки и металлообработки на станках) неприменимы для описания скважинного процесса из-за его специфических особенностей. В качестве основы предложено использовать нелинейную модель Лоренца (систему из трех дифференциальных уравнений), способную описывать хаотические динамические системы. Параметры модели функционально связаны с технологическими и конструктивными факторами: частотой вращения двигателя, геометрией снимаемого слоя, амплитудой колебаний и др.

На основе модели Лоренца получены уравнения скорости, ускорения и перемещения инструмента; путем преобразований системы выведены критерии подобия, обеспечивающие перенос результатов моделирования на скважинный процесс. Ключевым результатом явилось качественное различие фазовых портретов системы в зависимости от состава компоновки:

1) без гидравлического нагружателя: фазовая траектория представляет «странный аттрактор», что свидетельствует о возникновении хаотического, неустойчивого режима с неконтролируемой нагрузкой и высоким риском отказа технической системы;

2) с гидравлическим нагружателем: фазовая траектория представляет собой устойчивый «предельный цикл», что соответствует стабильному циркуляционному движению стружки и удовлетворительной работе системы. Теоретически доказана эффективность и необходимость применения гидронагружателя, работающего в режиме автомата подачи и демпфера продольных колебаний.

Описан испытательный стенд ООО «Перфобур», обеспечивающий физическое и математическое подобие скважинным условиям. Методами планирования эксперимента (полный факторный эксперимент, центральный композиционный план) получены адекватные (с доверительной вероятностью 95 %) уравнения регрессии, связывающие механическую

скорость фрезерования с ключевыми факторами: частота вращения фрезы, осевая нагрузка на фрезерный инструмент, крутящий момент на валу винтового забойного двигателя и перепада давления технологической жидкости.

В третьей главе решена ключевая прикладная задача работы: разработка и апробация методики оперативного диагностирования и прогнозирования технического состояния системы «винтовой забойный двигатель – фрезерный инструмент».

На основе экономического критерия Гувера предложен диагностический критерий, адаптированный для оценки технического состояния оборудования. Критерий представляет собой отношение текущего значения показателя работоспособности по Гуверу к его значению в начале стабильного этапа фрезерования и вычисляется отдельно для колебаний давления технологической жидкости и осевой нагрузки на фрезерный инструмент.

В результате комплекса стендовых испытаний для различных сочетаний типов фрезерного инструмента и характеристик обсадных колонн определены конкретные числовые пороговые значения критерия. Эти диапазоны однозначно соответствуют основным технологическим ситуациям: стабильной работе системы, износу инструмента, нестабильной работе насосного оборудования и системы в целом, подклиниванию и заклиниванию винтового забойного двигателя, а также отключению датчиков.

Разработана и реализована на языке «Python» автоматизированная программа, выполняющая в реальном времени сбор данных, расчет критериев, их сравнение с контрольными значениями, формирование диагноза и выдачу рекомендаций оператору. На реальных записях продемонстрирована её работоспособность: показано, как превышение пороговых значений предшествует аварийной ситуации (например, заклиниванию винтового забойного двигателя).

Описан вероятностно-статистический метод распознавания на основе уравнения Байеса. Для статистически независимых критериев построены соответствующие матрицы и оценена диагностическая ценность различных интервалов обследования. Установлено, что для надёжного распознавания режимов работы в реальном времени достаточно использования одного разработанного критерия, что позволяет упростить систему мониторинга.

Приведенный в главах материал носит комплексный характер – от анализа проблемы и теоретического моделирования до разработки практического инструментария. Полученные результаты направлены на повышение эффективности технологии фрезерования «окон» в промышленных условиях.

6. Оценка содержания и оформления реферата.

Автореферат диссертации в полной мере отражает краткое содержание работы. Оформление автореферата соответствует требованиям, предъявляемым к оформлению кандидатских диссертаций.

7. Апробация и публикации по работе.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на конференциях различного уровня. Результаты исследований опубликованы в 16 научных работах автора. В их числе – 5 статей в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации. Практико-ориентированные результаты работы защищены одним патентом Российской Федерации на изобретение и двумя свидетельствами о государственной регистрации программы для ЭВМ. Также по теме диссертации опубликовано одно учебное пособие. Совокупность опубликованных работ в полной мере раскрывает основное научное содержание диссертации.

8. Вопросы и замечания по работе.

1. В работе недостаточно подробно раскрыта методология выбора конкретных вероятностно-статистических методов анализа из представленного обширного перечня (коэффициент Джини, энтропийный анализ, метод Байеса и др.). Автор ограничивается лишь перечислением методов без обоснования их применимости к исследуемой задаче. Как обоснован выбор конкретных вероятностно-статистических методов анализа из представленного перечня?

2. В диссертации отсутствует анализ и количественная оценка повышения эффективности диагностики по сравнению с существующими методами.

3. В работе недостаточно внимания уделено анализу погрешностей измерений при сборе экспериментальных данных. При использовании вероятностно-статистических методов важно учитывать влияние погрешностей на результаты диагностики, однако этот аспект раскрыт достаточно поверхностно. Каким образом учитывались погрешности измерений при сборе экспериментальных данных и как они могли повлиять на результаты диагностики?

4. В теоретической части диссертации слабо освещены вопросы адаптации разработанных методик к различным условиям эксплуатации.

Недостаточно исследовано влияние таких факторов как тип породы, параметры бурового раствора, температура при осуществлении процесса фрезерования на итоговую точность диагностики.

5. В работе не представлен сравнительный анализ эффективности предложенного критерия диагностирования по Гуверу с существующими аналогами. Отсутствует обоснование преимуществ нового критерия перед традиционными методами оценки технического состояния оборудования.

6. Следует дополнительно пояснить, каким образом определялись пороговые значения критериев диагностирования для различных видов неисправностей?

7. Какие ограничения применимости разработанных методик выявлены в процессе исследования и как обеспечивается работоспособность предложенного критерия диагностирования в условиях реального производства?

9. Заключение.

Диссертация Шестаковой Евгении Владимировны на тему «Вероятностно-статистическая оценка технической системы «винтовой забойный двигатель – фрезерный инструмент» является завершённой, самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, посвящённой актуальной проблеме и содержащей новые научные результаты, выводы и рекомендации.

Разработанные научные результаты обеспечивают возможность непрерывного контроля и диагностики рабочего состояния оборудования в процессе фрезерования «окна» в обсадной колонне. Созданная методология позволяет выявлять возникающие неисправности в системе «винтовой забойный двигатель – фрезерный инструмент» и формировать рекомендации по эксплуатации оборудования. Внедрение предложенных разработок вносит значимый вклад в повышение технологической надежности и эффективности работ при зарезке боковых стволов, что представляет существенную ценность для развития отечественной нефтегазовой отрасли.

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.5.21 – «Машины, агрегаты и технологические процессы» (технические науки) по пункту 8 – «Разработка и повышение эффективности методов предиктивного анализа, технического обслуживания, диагностики, ремонтпригодности и технологии ремонта машин и агрегатов в целях обеспечения надежной и безопасной эксплуатации».

По актуальности, научной новизне и практической значимости диссертация Шестаковой Евгении Владимировны соответствует требованиям,

предъявляемым к кандидатским диссертациям, согласно п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.21 – «Машины, агрегаты и технологические процессы» (технические науки).

Официальный оппонент,
канд. техн. наук, доцент

 Д. А. Борейко




Заведующий сектором
управления делопроизводства
и контроля документооборота
 Е.Р. Яковлева
19. 01. 2026

Борейко Дмитрий Андреевич – кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры бурения скважин Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

Инженерная специальность: 130602 – «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов».

Научная специальность: 05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы» (в нефтяной и газовой промышленности).

Адрес: 199106, г. Санкт-Петербург, линия 21-я В.О., д. 2.

Тел.: +7 (812) 328-8478

E-mail: boreyko_da@pers.spmi.ru

Я, Борейко Д. А., даю свое согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку

 / Д. А. Борейко /