

DOI: <https://doi.org/10.25689/NP.2026.2.231-252>

EDN VHBQPS

УДК 622.24:534.8

Анализ механизмов и методов снижения stick–slip вибраций при бурении нефтяных и газовых скважин

¹Романов Г.Р., ²Шакирова Э.В., ³Солдатенко П.А.

¹⁻³*Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Иркутск, Россия*

²*Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Уфа, Россия*

Analysis of mechanisms and mitigation methods stick–slip vibrations in oil and gas well drilling

¹G.R. Romanov, ²E.V. Shakirova, ³P.A. Soldatenko

¹⁻³*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

²*Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia*

E-mail: viva160@mail.ru

Аннотация. В статье представлен обзор современных подходов к изучению и снижению крутильных вибраций типа stick–slip, возникающих в процессе бурения нефтяных и газовых скважин. Рассмотрены физические механизмы возникновения stick–slip вибраций, их связь с режимными параметрами бурения, конструкцией бурильной колонны и особенностями взаимодействия долота с породой. Проанализированы экспериментальные и полевые исследования, подтверждающие нелинейный характер крутильных колебаний и их взаимосвязь с осевыми и боковыми вибрациями. Отдельное внимание уделено методам моделирования и диагностики stick–slip, а также программным и техническим решениям, направленным на снижение вибрационных нагрузок. Показано, что эффективное подавление stick–slip требует комплексного подхода, основанного на сочетании предиктивного моделирования, оптимизации компоновки низа бурильной колонны и адаптивного управления режимами бурения.

Ключевые слова: бурение скважин, stick–slip, крутильные вибрации, динамика бурильной колонны, КНБК, моделирование вибраций

Для цитирования: Романов Г.Р., Шакирова Э.В., Солдатенко П.А. Анализ механизмов и методов снижения stick–slip вибраций при бурении нефтяных и газовых скважин // Нефтяная провинция.-2026.-№2(46).-С. 231-252. - DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2026.2.231-252>. - EDN VHBQPS

Abstract. The paper presents a review of modern approaches to the analysis and mitigation of torsional stick–slip vibrations occurring during oil and gas well drilling. The physical mechanisms responsible for the onset of stick–slip vibrations and their dependence on drilling parameters, drill string configuration, and bit–rock interaction are discussed. Experimental and field studies confirming the nonlinear nature of torsional vibrations and their interaction with axial and lateral vibration modes are analyzed. Particular attention is paid to modeling and diagnostic methods, as well as software and technical solutions aimed at reducing vibration loads. It is shown that effective stick–slip mitigation requires a comprehensive approach combining predictive modeling, bottom-hole assembly optimization, and adaptive control of drilling parameters.

Key words: *oil and gas drilling, stick–slip, torsional vibrations, drill string dynamics, BHA, vibration modeling*

For citation: G.R. Romanov, E.V. Shakirova, P.A. Soldatenko Analiz mekhanizmov i metodov snizheniya stick–slip vibratsiy pri burenii neftyanykh i gazovykh skvazhin [Analysis of mechanisms and mitigation methods stick–slip vibrations in oil and gas well drilling]. Neftyanaya Provintsiya, No. 2(46), 2026. pp. 231-252. DOI <https://doi.org/10.25689/NP.2026.2.231-252>. EDN VHBQPS (in Russian)

Введение

Эффективность бурения нефтяных и газовых скважин существенно ограничивают вибрационные осложнения, возникающие при работе бурильной колонны. Среди различных форм динамических воздействий особое место занимает явление stick–slip (залипание–проскальзывание), представляющее собой самовозбуждающиеся крутильные колебания, проявляющиеся в неустойчивом вращении долота. Данный тип вибраций сопровождается значительными флуктуациями угловой скорости и крутящего момента, что приводит к повышенному износу долот, элементов компоновки низа бурильной колонны (КНБК) и снижению надёжности бурового инструмента.

Систематические исследования крутильных колебаний типа stick–slip в бурильных системах начали активно развиваться в конце XX века и заложили основы современных представлений о нелинейной динамике буриль-

ной колонны и взаимодействии долота с породой. В частности, в фундаментальных работах показано, что различие между статическим и динамическим трением, а также особенности взаимодействия режущих элементов долота с забоем являются ключевыми факторами формирования самовозбуждённых крутильных колебаний [1, 2].

Несмотря на значительный объём накопленных исследований, проблема stick–slip сохраняет актуальность и в настоящее время. Результаты многочисленных работ показывают, что развитие крутильных вибраций может приводить к сокращению ресурса долот, увеличению непроизводительного времени (НПВ), а также к росту вероятности отказов телеметрических систем и роторных управляемых систем (РУС). Передача крутильных колебаний вверх по бурильной колонне способствует возникновению повышенных нагрузок в резьбовых соединениях, что усложняет спуско-подъёмные операции (СПО) и требует дополнительного контроля технического состояния бурильных труб.

В связи с этим в последние десятилетия активно развиваются как фундаментальные модели, описывающие физическую природу stick–slip вибраций, так и прикладные методы их диагностики и снижения. Особое внимание уделяется вопросам моделирования динамики бурильной колонны, экспериментальным исследованиям, а также внедрению программных и технических решений, направленных на стабилизацию режима вращения долота.

Целью настоящей работы является обзор и систематизация основных подходов к изучению и контролю stick–slip вибраций, включая теоретические модели, экспериментальные исследования и современные промышленные методы управления крутильной динамикой бурильной колонны. Отличительная особенность статьи заключается в том, что рассмотренные подходы объединены в единую структуру: от механизмов возникновения и факторов развития колебаний до методов моделирования/диагностики и программно-технических решений по снижению вибрационных нагрузок.

При вращательном бурении бурильная колонна приводится во вращение верхним приводом или ротором, и частота вращения на поверхности обычно поддерживается на заданном уровне. Однако угловая скорость долота на забое может существенно отличаться от поверхностной из-за динамических колебаний, связанных с ограниченной крутильной жёсткостью бурильных труб. На развитие этих колебаний влияют характеристики привода, трение колонны о стенки ствола и особенности взаимодействия долота с породой.

При бурении бурильная колонна подвержена различным видам вибраций, среди которых традиционно выделяют осевые, крутильные и боковые. Осевые вибрации приводят к периодическим отскокам долота от забоя, крутильные проявляются в виде залипания и последующего проскальзывания, а боковые сопровождаются вихревыми движениями колонны и ударными нагрузками на стенки ствола. Каждый из указанных типов вибраций оказывает негативное влияние на процесс бурения, снижая механическую скорость проходки и сокращая ресурс бурового инструмента [3].

Особое внимание в научных исследованиях уделяется крутильным вибрациям типа *stick-slip*, которые характеризуются чередованием двух фаз — прилипания и проскальзывания. Суммирует характерные признаки двух фаз (Табл. 1) *stick-slip* и типичные последствия для элементов КНБК и забойных систем, что позволяет использовать её как краткий ориентир при интерпретации проявлений крутильных вибраций.

Таблица 1

Характеристика фаз stick-slip вибраций

Фаза	Суть процесса	Последствия
Прилипание	Долото практически останавливается; вращение верхнего привода продолжается; в колонне накапливается крутящий момент.	Рост напряжений в бурильной колонне, перегрузка КНБК, повышение риска усталостных разрушений.

Фаза	Суть процесса	Последствия
Проскальзывание	Накопленная энергия резко высвобождается; долото вращается с угловой скоростью, значительно превышающей частоту вращения на поверхности (в 10–15 раз).	Удары в забое, износ долота, повреждения систем MWD/LWD, рост вибраций по всей колонне.

В фазе прилипания долото частично или полностью останавливается, тогда как вращение на поверхности сохраняется. Из-за крутильной деформации колонны накапливается упругая энергия. При достижении критического момента происходит срыв, и начинается фаза проскальзывания. В этот момент угловая скорость долота может значительно превышать заданную скорость вращения на устье, что приводит к рассогласованию между поверхностным и забойным режимами вращения [4]. Схематично показано (Рис. 1) рассогласование частоты вращения на поверхности и на забое, характерное для фаз прилипания и проскальзывания.

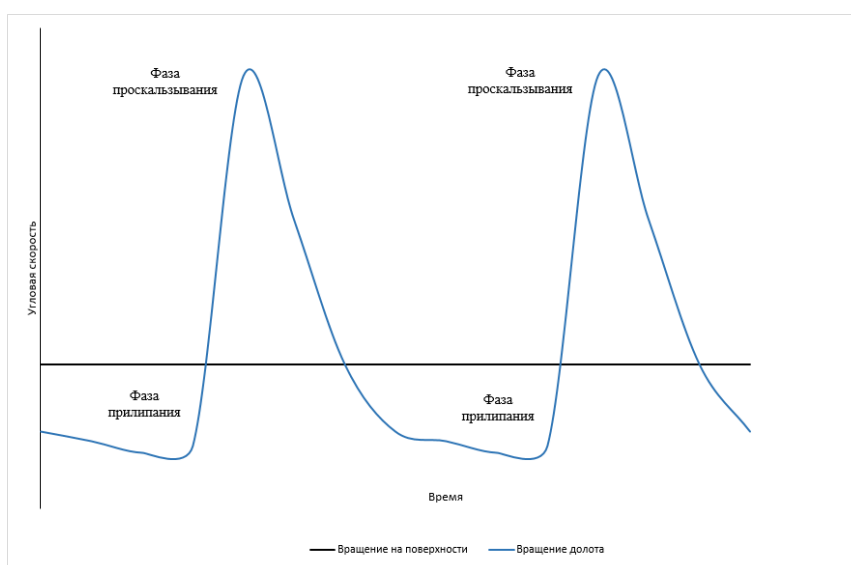


Рис. 1. Схематичное представление изменения угловой скорости на поверхности и на забое при stick–slip вибрациях

Явление stick–slip обусловлено различиями между статическим и динамическим трением. Когда коэффициент динамического трения ниже статического, при остановке долота в колонне накапливается крутящий мо-

мент. При срыве вращения момент резко снижается, что провоцирует переход в режим крутильных колебаний [5]. Периоды таких колебаний, как правило, составляют от нескольких секунд до десятков секунд, в зависимости от параметров бурения и свойств бурильной системы.

Экспериментальные и полевые данные показывают: при интенсивном stick–slip угловая скорость долота в фазе проскальзывания может существенно превышать поверхностную [6]. Это сопровождается ростом динамических нагрузок и ускоренным износом элементов КНБК.

Данный эффект связан с особенностями нелинейного взаимодействия долота с породой, при котором рост угловой скорости сопровождается снижением сопротивляющего момента, что приводит к неустойчивости вращения и периодическому срыву режима [7].

Значительное влияние на развитие stick–slip оказывают конструктивные особенности и состояние долота, в частности долота с поликристаллическими алмазными резцами (PDC). Износ режущей структуры и изменение геометрии резцов приводят к росту колебательных составляющих крутящего момента и увеличению склонности системы к самовозбуждённым крутильным колебаниям. Таким образом, даже при постоянной осевой нагрузке динамика взаимодействия долота с породой может инициировать переход к неустойчивому режиму вращения [8].

Дополнительным фактором, влияющим на устойчивость вращения, является изменчивость осевой нагрузки на долото. Показано, что при достижении критических значений нагрузки система может переходить из устойчивого режима вращения в режим циклических крутильных вибраций [9]. Для анализа подобных процессов широко применяются сосредоточенные динамические модели, позволяющие воспроизводить основные механизмы возникновения stick–slip и оценивать условия устойчивой работы бурильной колонны.

Понимание совокупности параметров, влияющих на развитие stick–slip, имеет принципиальное значение для разработки эффективных методов его предотвращения. Обобщенные основные режимные и конструктивные параметры, повышающие вероятность stick–slip и показывающие, что устойчивость вращения определяется сочетанием нескольких факторов, а не отдельной настройкой одного параметра, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры бурения и их эффект на возникновение stick–slip

Параметр	Эффект на stick–slip
Вес на долоте (WOB)	При увеличении WOB возможно достижение критического значения, после которого система переходит в режим циклических вибраций
Скорость вращения (RPM)	Повышение RPM может усилить неустойчивость крутильного режима и вызвать колебания; при оптимизации снижает вероятность stick–slip
Расход бурового раствора	Влияет на удаление шлама, охлаждение долота и устойчивость давления в стволе; косвенно влияет на динамику вибраций
Состояние долота (износ резцов PDC)	Изменение контактных сил и давления на забое усиливает склонность системы к самовозбуждённым колебаниям
Разница статического и динамического трения	Низкий коэффициент динамического трения относительно статического вызывает накопление момента и последующий срыв (цикл stick–slip)
Жёсткость буровой колонны	Низкая жёсткость способствует накоплению упругой энергии и её резкому высвобождению в фазе проскальзывания.
Конфигурация ВНА/КНБК	Неправильный выбор компоновки может усилить амплитуды вибраций; оптимизация конструкции снижает их проявление.

В рамках настоящей работы, указанные факторы рассмотрены не изолированно, а в виде взаимосвязанной системы, где режимные параметры, свойства колонны и условия контакта долота с породой формируют единый механизм развития stick–slip. Такое представление позволяет более наглядно проследить причинно-следственные связи между источниками

возбуждения и динамической реакцией бурильной системы. Параметры в виде причинно-следственной схемы представлены на рис. 2, отражающий взаимосвязь ключевых факторов, которые совместно формируют предпосылки к развитию stick-slip вибраций.

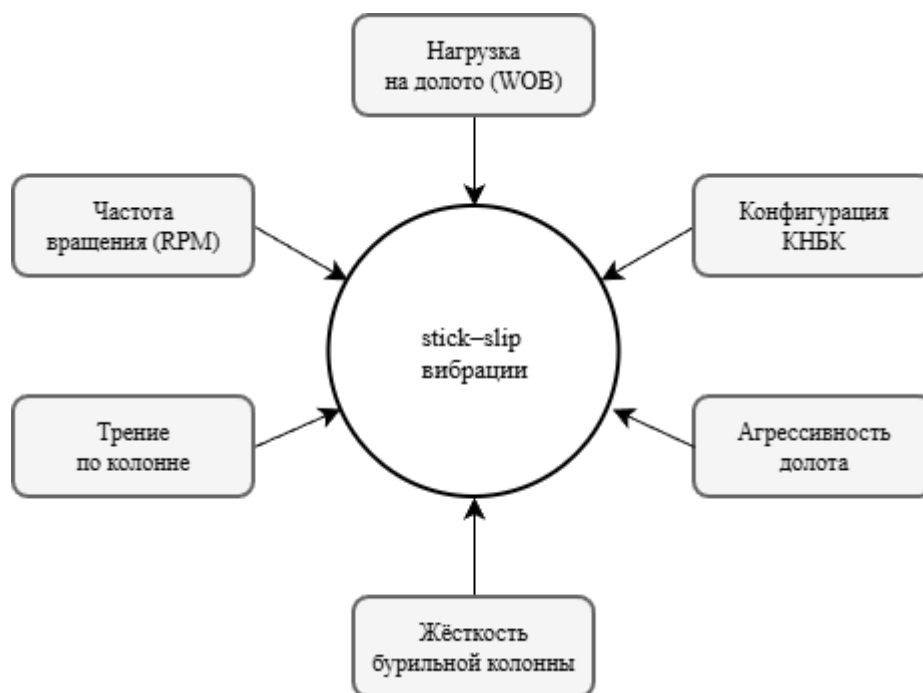


Рис. 2. Основные факторы, влияющие на возникновение stick-slip вибраций

С практической точки зрения, снижение амплитуды stick-slip достигается за счёт комплексного подхода, включающего оптимизацию режимных параметров, применение демпфирующих элементов и модификацию конструкции КНБК [10].

Классическим направлением развития данных методов является использование принципов активного управления, основанных на введении отрицательной обратной связи по скорости вращения, что легло в основу современных систем стабилизации крутильной динамики бурильной колонны [10].

Несмотря на то, что stick-slip традиционно рассматривается как крутильная форма вибраций, на практике данный режим редко реализуется в

изолированном виде. Многочисленные исследования показывают, что крутильные колебания тесно связаны с осевыми и боковыми вибрациями бурильной колонны, формируя сложную нелинейную динамическую систему.

Осевые вибрации, проявляющиеся в виде периодических отскоков долота (*bit bounce*), могут существенно влиять на условия контакта долота с породой. Колебания осевой нагрузки приводят к изменению силы трения и реактивного крутящего момента на долоте, что, в свою очередь, способно инициировать или усилить развитие *stick-slip*. В условиях неустойчивого контакта долота с забоем даже незначительные флуктуации нагрузки могут приводить к переходу системы из устойчивого режима вращения в режим циклических крутильных колебаний.

Боковые вибрации, связанные с завихрениями бурильной колонны и ударами о стенки ствола, также оказывают существенное влияние на развитие *stick-slip*. Возрастание боковых сил увеличивает трение между колонной и стенками скважины, что способствует накоплению упругой энергии в крутильном направлении. В результате возрастает вероятность резкого срыва вращения долота и появления характерных фаз проскальзывания. Особенно выраженной данная взаимосвязь становится при бурении протяжённых наклонно-направленных и горизонтальных интервалов, где распределённое трение по колонне играет доминирующую роль.

Важно отметить, что взаимодействие различных форм вибраций носит двусторонний характер. С одной стороны, осевые и боковые колебания могут выступать триггером для возникновения *stick-slip*, с другой — интенсивные крутильные вибрации способны усиливать боковые удары и осевые перегрузки, приводя к комплексному ухудшению динамического состояния бурильной системы. В таких условиях локальное подавление лишь одного типа вибраций не всегда приводит к ожидаемому эффекту и может сопровождаться перераспределением энергии в другие формы колебаний.

С практической точки зрения данное обстоятельство подчёркивает необходимость комплексного подхода к анализу и управлению динамикой бурильной колонны. Эффективное снижение проявлений stick–slip требует одновременного учёта осевых, боковых и крутильных вибраций, а также их взаимного влияния при выборе режимов бурения, компоновки КНБК и средств подавления колебаний. Такой системный подход рассматривается в современных обзорных работах по динамике бурения и вибрационным осложнениям, где подчёркивается важность интеграции методов диагностики и управления различными типами вибраций в рамках единой стратегии управления процессом бурения [11].

Экспериментальные исследования играют важную роль в изучении крутильных вибраций типа stick–slip, поскольку позволяют в контролируемых условиях воспроизводить динамику бурильной колонны и анализировать влияние отдельных параметров на устойчивость вращения.

Для изучения stick–slip современные лаборатории используют специализированные стенды, моделирующие бурильную колонну в уменьшенном масштабе [12]. За счёт сниженной крутильной жёсткости, регулируемой нагрузки и тормозных устройств удаётся воспроизводить переход между фазами прилипания и проскальзывания и детально анализировать динамику колебаний.

Как правило, экспериментальные стенды включают механическую часть, обеспечивающую вращение колонны, измерительные элементы для регистрации крутящего момента и угловой скорости, а также систему сбора и обработки данных. Использование программных средств управления позволяет реализовывать регулирование частоты вращения, нагрузки на долото и других параметров, а также синхронизировать процессы управления и измерений.

В исследованиях особое внимание уделяется точности регистрации динамических параметров. Показано, что частота дискретизации сигналов

оказывает существенное влияние на корректность диагностики stick–slip вибраций. При низкой частоте сбора данных фиксируются лишь усреднённые характеристики процесса, тогда как высокочастотные компоненты колебаний, включая начало фаз прилипания и пики проскальзывания, могут оставаться не выявленными.

Результаты наблюдений свидетельствуют о том, что при частоте регистрации порядка единиц герц значительная часть динамических особенностей stick–slip не фиксируется. Увеличение частоты дискретизации до десятков герц позволяет отчётливо выделять фазы залипания и проскальзывания, включая кратковременные обратные вращения. Наиболее полная картина динамики достигается при использовании высокой частоты регистрации, что обеспечивает надёжную оценку амплитуд и длительности крутильных колебаний.

Анализ экспериментальных данных показывает, что при низких значениях частоты вращения система склонна к развитию выраженных stick–slip вибраций, сопровождающихся полной остановкой долота в фазе прилипания. С увеличением частоты вращения характер колебаний изменяется, и система может переходить в более устойчивый режим с меньшими амплитудами крутильных колебаний. Подобные переходы имеют принципиальное значение для практики бурения, поскольку позволяют определить диапазоны режимных параметров, обеспечивающие более стабильное вращение долота.

Таким образом, исследования подтверждают, что для корректной диагностики и анализа stick–slip вибраций требуется применение высокочастотной регистрации параметров и комплексный подход к интерпретации полученных данных. Полученные результаты служат основой для разработки и верификации математических моделей, а также для совершенствования методов управления динамикой бурильной колонны.

Моделирование и диагностика stick–slip вибраций позволяют уточнять механизмы возникновения крутильных колебаний и разрабатывать методы их снижения.

Особую сложность данные процессы представляют при бурении протяжённых наклонно-направленных и горизонтальных участков, где распределённое трение по бурильной колонне существенно влияет на динамику вращения.

Современные исследования в данной области опираются на сочетание математического моделирования и анализа полевых данных, получаемых как на поверхности, так и на забое скважины. При этом выделяются два взаимодополняющих подхода к снижению stick–slip вибраций: поверхностное управление режимами вращения и оптимизация забойных параметров бурения.

Поверхностные системы управления реализуют сглаживание крутильных колебаний за счёт регулирования скорости вращения и крутящего момента верхнего привода. Однако их эффективность может быть ограничена, поскольку в ряде случаев проявления stick–slip фиксируются преимущественно на забое и слабо отражаются в поверхностных измерениях. Это обуславливает необходимость привлечения забойных данных и более детального анализа динамики бурильной колонны.

Альтернативным и дополняющим направлением является использование забойных инструментов и конструктивных решений, направленных на снижение агрессивности долота и ограничение роста реактивного крутящего момента. К таким решениям относятся долота с контролируемой глубиной реза и элементы компоновки, обеспечивающие дополнительное демпфирование крутильных колебаний.

Для анализа stick–slip применяются динамические модели, в которых бурильная колонна рассматривается как упругая система в кручении. Сосредоточенные и распределённые модели типа «масса–пружина–демпфер»

описывают передачу крутильных возмущений по колонне и позволяют оценивать устойчивость режима вращения. Ключевой элемент таких моделей — закон зависимости момента на долоте от угловой скорости, учитывающий нелинейное трение в зоне контакта долота с породой.

Одним из ключевых параметров, используемых для оценки устойчивости вращения, является отношение момента на долоте к осевой нагрузке, характеризующее агрессивность долота. Рост данного параметра, как правило, сопровождается увеличением амплитуды крутильных колебаний и повышением склонности системы к развитию stick–slip вибраций. Анализ полевых данных подтверждает, что изменение агрессивности долота оказывает существенное влияние на динамику бурения, в том числе при активной работе поверхностных систем управления [12].

Сопоставление результатов моделирования с данными забойных измерений показывает, что достоверное воспроизведение stick–slip вибраций возможно только при комплексном учёте распределения трения по бурильной колонне, закона взаимодействия долота с породой и параметров агрессивности долота. Указанные факторы оказывают взаимное влияние и определяют, как характер колебаний, так и эффективность применяемых методов их снижения.

Таким образом, результаты моделирования и диагностики свидетельствуют о том, что устранение stick–slip невозможно обеспечить исключительно за счёт поверхностного управления режимами вращения. Для достижения устойчивого бурения требуется оптимизация как поверхностных, так и забойных параметров, основанная на интеграции математических моделей и данных полевых измерений.

Современные подходы к снижению stick–slip вибраций в значительной степени опираются на использование специализированных программных комплексов и технических средств, предназначенных для анализа ди-

намики бурильной колонны и оптимизации режимов бурения. Данные решения позволяют выявлять неблагоприятные сочетания параметров, прогнозировать развитие крутильных колебаний и принимать корректирующие меры на этапах проектирования и бурения скважин.

Одним из направлений развития является применение программных комплексов, основанных на физически обоснованных моделях бурильной колонны. Такие инструменты позволяют анализировать влияние геометрии колонны, свойств материалов, параметров бурового раствора и траектории ствола на динамику вращения. В результате формируются карты вибрационных режимов, на которых выделяются диапазоны частоты вращения с повышенным риском крутильных, осевых и боковых колебаний, включая stick–slip [12].

Предиктивное моделирование отличается от традиционных методов диагностики тем, что позволяет выявлять потенциально опасные режимы до начала бурения или на ранних стадиях процесса. Это создаёт предпосылки для корректировки траектории скважины, компоновки низа бурильной колонны и режимных параметров с целью снижения вибрационных нагрузок и повышения устойчивости работы долота.

Обобщённый анализ практики применения подобных программных комплексов показывает, что исключение резонансных режимов вращения и оптимизация параметров бурения способствуют снижению динамических нагрузок и уменьшению проявлений stick–slip. Основной эффект при этом достигается за счёт согласования режимов вращения с динамическими характеристиками системы «бурильная колонна — долото».

Отдельное развитие получили интегрированные системы, сочетающие предиктивное моделирование с анализом вариантов компоновки низа бурильной колонны. Такие системы применяются при бурении сложных интервалов, включая протяжённые наклонно-направленные участки и опера-

ции расширения ствола. Предварительное моделирование динамики позволяет оценить влияние различных конфигураций КНБК на уровень вибраций и выбрать решения, обеспечивающие более стабильную работу бурильной системы.

Использование интегрированных методов моделирования способствует снижению вероятности развития stick–slip за счёт оптимизации геометрии компоновки, распределения масс и жёсткости элементов КНБК. Существенным фактором при этом является согласование забойных параметров с возможностями поверхностных систем управления.

Помимо программных решений, в практике бурения применяются специализированные технические средства, предназначенные для пассивного и активного подавления крутильных колебаний. Пассивные устройства, устанавливаемые в составе КНБК, обеспечивают демпфирование за счёт поглощения части упругой энергии и снижения пиковых значений крутящего момента. Их применение направлено на стабилизацию вращения долота и защиту чувствительных элементов бурового инструмента.

Активные системы управления реализуют подавление stick–slip за счёт динамического регулирования скорости вращения и крутящего момента на поверхности. Анализ параметров в реальном времени позволяет формировать управляющие воздействия, ограничивающие распространение торсионных колебаний по бурильной колонне и расширяющие диапазон устойчивых режимов бурения.

Практика применения активных систем показывает, что их эффективность во многом определяется корректной настройкой параметров управления с учётом жёсткости бурильной колонны и выбранных режимов бурения. В результате становится возможным повышение нагрузки на долото при снижении риска развития stick–slip.

Таким образом, программные комплексы и технические средства подавления крутильных вибраций следует рассматривать как элементы единой системы управления динамикой бурильной колонны. Таким образом иллюстрирует (Рис. 3) взаимосвязь этапов анализа (диагностика и моделирование) и практических мер (оптимизация параметров и компоновки). Это позволяет рассматривать снижение stick–slip как комплексную инженерную задачу, основанную на сочетании предиктивного моделирования, оптимизации компоновки и адаптивного управления режимами бурения.



Рис. 3. Основные подходы к изучению и снижению stick–slip вибраций

В рамках работы программные комплексы и технические средства снижения stick–slip сгруппированы по принципу воздействия на систему «диагностика и предиктивный анализ - оптимизация компоновки и режимов - пассивное/активное подавление», что позволяет сопоставлять решения по механизму действия и области применения.

В качестве практической иллюстрации применения активных средств подавления stick–slip вибраций рассмотрен интервал бурения горизонтальной скважины, на котором использовалась система активного управления

OptiTorque. Анализ выполнен по данным поверхностного мониторинга буровой установки одного из операторов, ведущих работы на месторождениях Восточной Сибири.

Фрагмент данных с выделением двух последовательных участков: до активации системы OptiTorque и после её включения представлен на рис. 4. Для интерпретации использованы регистрируемые на поверхности параметры, характеризующие режим работы бурильной колонны, включая крутящий момент верхнего привода, частоту вращения, осевую нагрузку и механическую скорость проходки. Рассматриваемый пример позволяет оценить изменение характера поверхностных сигналов при переходе от обычного режима управления к режиму активного подавления крутильных колебаний.

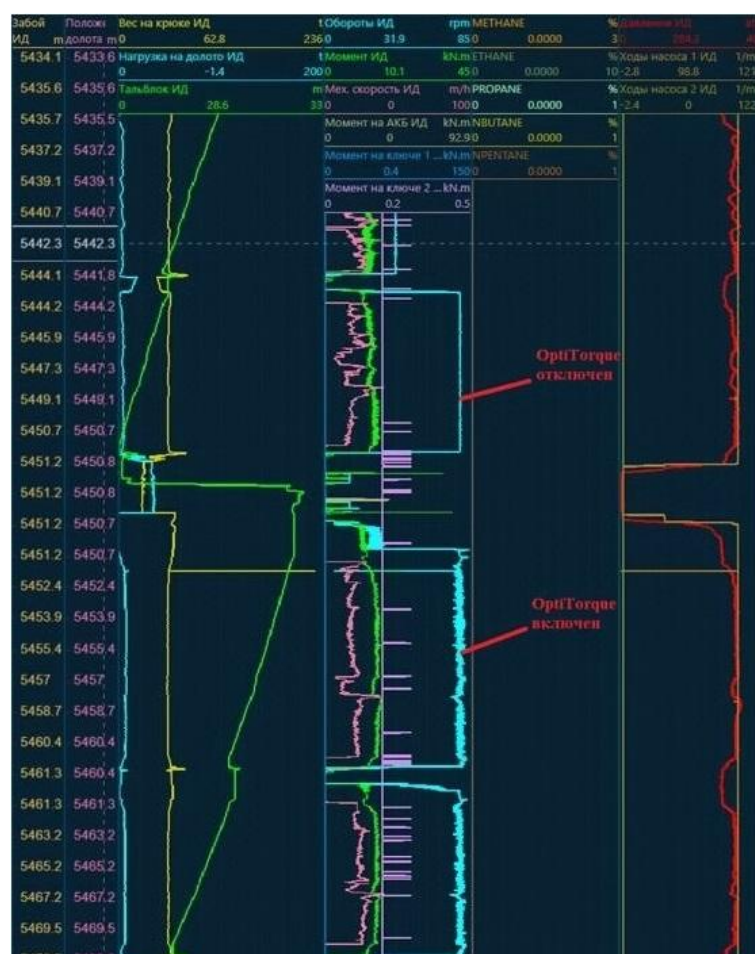


Рис. 4. Фрагмент данных поверхностного мониторинга до и после включения системы OptiTorque

В интервале до включения OptiTorque по данным поверхностного мониторинга наблюдался менее устойчивый характер изменения параметров бурения. После активации системы наиболее отчётливо проявилась визуальная стабилизация механической скорости проходки, тогда как изменение крутящего момента приобрело более ровный характер. Наблюдаемое изменение согласуется с принципом работы активных систем поверхностного управления, направленных на ограничение торсионных колебаний за счёт динамического регулирования скорости вращения и крутящего момента.

Следует отметить, что сделанные выводы основаны на поверхностных данных и потому должны интерпретироваться как косвенное подтверждение уменьшения проявлений stick–slip, а не как прямое доказательство полного подавления крутильных колебаний на забое. Такое ограничение является принципиально важным, поскольку при бурении протяжённых наклонно-направленных и горизонтальных интервалов часть динамических эффектов может проявляться преимущественно в нижней части бурильной колонны и не полностью отражаться в поверхностных измерениях. Вместе с тем представленный пример демонстрирует, что применение системы активного управления в реальных условиях бурения сопровождается стабилизацией поверхностных параметров и может рассматриваться как практическое подтверждение работоспособности данного подхода.

Заключение

Stick–slip вибрации остаются одной из наиболее сложных и значимых проблем во время бурения нефтяных и газовых скважин. Их развитие сопровождается ростом динамических нагрузок, ускоренным износом долот и элементов КНБК, увеличением непроизводительного времени и повышением риска отказов забойных и поверхностных систем.

Проведённый обзор показал, что явление stick–slip имеет сложную нелинейную природу и формируется под воздействием совокупности факторов, включающих характеристики бурильной колонны, режимные параметры бурения, особенности взаимодействия долота с породой, а также распределённое трение по колонне. При этом крутильные колебания, как правило, не реализуются изолированно, а находятся в тесной взаимосвязи с осевыми и боковыми вибрациями, что существенно усложняет диагностику и подавление данного вида динамических осложнений.

Современные подходы к изучению и предотвращению stick–slip можно условно разделить на три взаимодополняющих уровня. Первый уровень включает фундаментальные и численные модели, позволяющие объяснить механизмы возникновения крутильных колебаний и выявить ключевые параметры устойчивости системы. Второй уровень представлен программными комплексами предиктивного моделирования, обеспечивающими анализ динамики бурильной колонны и подбор режимов бурения с учётом возможных вибрационных рисков. Третий уровень охватывает промышленные технические решения, реализующие пассивное и активное подавление вибраций непосредственно на этапе бурения.

Анализ рассмотренных методов показывает, что универсального решения проблемы stick–slip не существует. Эффективность конкретных мер во многом определяется условиями бурения, конфигурацией КНБК и корректностью настройки систем управления. В этой связи наибольший практический эффект достигается при комплексном подходе, сочетающем предиктивное моделирование, оптимизацию компоновки бурильной колонны и адаптивное управление режимами бурения с учётом взаимодействия различных форм вибраций.

В перспективе дальнейшее развитие методов контроля stick–slip связано с интеграцией систем диагностики, моделирования и управления в единые цифровые платформы бурения, а также с применением адаптивных и

интеллектуальных алгоритмов, обеспечивающих учёт изменяющихся условий в реальном времени. Такой подход рассматривается как ключевое направление повышения устойчивости и эффективности процесса бурения в условиях усложняющихся геолого-технических задач.

Список литературы

1. Richard T., Germa C., Detournay E. A simplified model to explore the root cause of stick-slip vibrations in drilling systems with drag bits // *Journal of Sound and Vibration*. — 2007. — Vol. 305, No. 3. — P. 432–456.
2. Detournay E., Defourny P. A phenomenological model for the drilling action of drag bits // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. — 1992. — Vol. 29, No. 1. — P. 13–23.
3. Sharma A., Abid K., Srivastava S., Baena Velasquez A. F., Teodoriu C. A review of torsional vibration mitigation techniques using active control and machine learning strategies // *Petroleum*. — 2023. — DOI: 10.1016/j.petlm.2023.09.007.
4. Ершов М. С., Комков А. Н., Феоктистов Е. А. Вибрационные процессы низа буровой колонны при различных способах бурения скважин [Электронный ресурс]. — Санкт-Петербург: Горный институт ПетГГУ, 2023. — 10 с.
5. Yan B., Tian J., Meng X., Zhang Z. Stick-slip vibration characteristics study of the drill string based on PID controller // *Energies*. — 2023. — Vol. 16, No. 23. — Article 7902. — DOI: 10.3390/en16237902.
6. Jansen J. D., van den Steen L. Active damping of self-excited torsional vibrations in oil well drillstrings // *Journal of Sound and Vibration*. — 1995. — Vol. 179, No. 4. — P. 647–668.
7. Мингазов Р. Р., Ишбаев Г. Г., Балута А. Г., Драган А. Ю., Ямалиев В. У. Снижение вибрации в процессе бурения путем совершенствования конструкции PDC-долот // *Бурение и нефть*. — 2023. — № 6. — С. 32–38. — URL: https://burneft.ru/archive/issues/detail.php?ELEMENT_ID=62932 (дата обращения: 10.04.2026).
8. Tang L., Zhu X., Qian X., Shi C. Effects of weight on bit on torsional stick-slip vibration of oilwell drill string // *Journal of Mechanical Science and Technology*. — 2017. — Vol. 31, No. 10. — P. 4589–4597. — DOI: 10.1007/s12206-017-0905-7.
9. Овезов Б. А., Рахимов С. М., Абдуллаев Р. А. Снижение критических последствий торсионных вибраций в результате разрушения горной породы долотами PDC // *Горный журнал*. — 2022. — № 3. — С. 112–119. — DOI: 10.37482/0536-1028-2022-3-112-119.
10. Kyllingstad A. A comparison of stick-slip mitigation tools // *Proceedings of the SPE/IADC Drilling Conference*. — 2017. — Paper SPE/IADC 184658-MS. — DOI: 10.2118/184658-MS.
11. Sharma A., Srivastava S., Teodoriu C. Experimental design, instrumentation, and testing of a laboratory-scale test rig for torsional vibrations — the next generation // *Energies*. — 2020. — Vol. 13, No. 18. — Article 4750. — DOI: 10.3390/en13184750.
12. Dao N.-H., Menand S., Isbell M. Mitigating and understanding stick-slip in unconventional wells // *Proceedings of the SPE/IADC Drilling Conference*. — 2019. — Paper SPE/IADC 194117-MS. — DOI: 10.2118/194117-MS.

References

1. Richard T., Germaу C., Detournay E. A simplified model to explore the root cause of stick-slip vibrations in drilling systems with drag bits // *Journal of Sound and Vibration*. — 2007. — Vol. 305, No. 3. — pp. 432–456.
2. Detournay E., Defourny P. A phenomenological model for the drilling action of drag bits // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. — 1992. — Vol. 29, No. 1. — pp. 13–23.
3. Sharma A., Abid K., Srivastava S., Baena Velasquez A. F., Teodoriu C. A review of torsional vibration mitigation techniques using active control and machine learning strategies // *Petroleum*. — 2023. — DOI: 10.1016/j.petlm.2023.09.007.
4. Ershov M. S., Komkov A. N., Feoktistov E. A. Vibracionnye processy niza buril'noj kolonny pri razlichnyh sposobah bureniya skvazhin [Elektronnyj resurs]. — Sankt-Peterburg: Gornyj institut PetrGU, 2023. — P. 10 (in Russian)
5. Yan B., Tian J., Meng X., Zhang Z. Stick-slip vibration characteristics study of the drill string based on PID controller // *Energies*. — 2023. — Vol. 16, No. 23. — Article 7902. — DOI: 10.3390/en16237902.
6. Jansen J. D., van den Steen L. Active damping of self-excited torsional vibrations in oil well drillstrings // *Journal of Sound and Vibration*. — 1995. — Vol. 179, No. 4. — pp. 647–668.
7. Mingazov R. R., Ishbaev G. G., Baluta A. G., Dragan A. Yu., Yamaliev V. U. Snizhenie vibracii v processe bureniya putem sovershenstvovaniya konstrukcii PDC-dolot // *Burenie i neft'*. — 2023. — № 6. — pp. 32–38. — URL: https://burneft.ru/archive/issues/detail.php?ELEMENT_ID=62932 (in Russian)
8. Tang L., Zhu X., Qian X., Shi C. Effects of weight on bit on torsional stick-slip vibration of oilwell drill string // *Journal of Mechanical Science and Technology*. — 2017. — Vol. 31, No. 10. — pp. 4589–4597. — DOI: 10.1007/s12206-017-0905-7.
9. Ovezov B. A., Rahimov S. M., Abdullaev R. A. Snizhenie kriticheskikh posledstvij torsionnykh vibracij v rezul'tate razrusheniya gornoj porody dolotami PDC // *Gornyj zhurnal*. — 2022. — № 3. — pp. 112–119. — DOI: 10.37482/0536-1028-2022-3-112-119. (in Russian)
10. Kyllingstad A. A comparison of stick-slip mitigation tools // *Proceedings of the SPE/IADC Drilling Conference*. — 2017. — Paper SPE/IADC 184658-MS. — DOI: 10.2118/184658-MS.
11. Sharma A., Srivastava S., Teodoriu C. Experimental design, instrumentation, and testing of a laboratory-scale test rig for torsional vibrations — the next generation // *Energies*. — 2020. — Vol. 13, No. 18. — Article 4750. — DOI: 10.3390/en13184750.
12. Dao N.-H., Menand S., Isbell M. Mitigating and understanding stick-slip in unconventional wells // *Proceedings of the SPE/IADC Drilling Conference*. — 2019. — Paper SPE/IADC 194117-MS. — DOI: 10.2118/194117-MS.

Сведения об авторах

Романов Григорий Радионович, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»

Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

E-mail: grom123456@mail.ru

Шакирова Эльвира Венеровна, кандидат политических наук, доцент кафедры нефтегазового дела ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»

Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин, Уфимский государственный нефтяной технический университет (ФГБОУ ВО «УГНТУ»)

Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1

E-mail: viva160@mail.ru

Солдатенко Петр Алексеевич, магистрант кафедры нефтегазового дела ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»

Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

E-mail: soldatenko-petr@mail.ru

Authors

G.R. Romanov, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Oil and Gas, Irkutsk National Research Technical University

83 Lermontova St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

E-mail: grom123456@mail.ru

E.V. Shakirova, PhD in Political Sciences, Associate Professor, Department of Oil and Gas, Irkutsk National Research Technical University

83 Lermontova St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

Associate Professor, Department of Oil and Gas Well Drilling, Ufa National Research Technical University

1, Kosmonavtov St., Ufa, 450062, Russian Federation

E-mail: viva160@mail.ru

P.A. Soldatenko, Master's Degree Student, Department of Oil and Gas Engineering, Irkutsk National Research Technical University

83 Lermontova St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

E-mail: soldatenko-petr@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.03.2026

Принята к публикации 24.06.2026

Опубликована 30.06.2026