

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **032474**

(13) **B1**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ

(45) Дата публикации и выдачи патента
2019.06.28

(51) Int. Cl. *G06G 7/48* (2006.01)

(21) Номер заявки
201300951

(22) Дата подачи заявки
2009.09.30

**(54) СПОСОБ МОДЕЛИРОВАНИЯ БУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ
ВИБРАЦИОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ БУРОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

(31) 61/117,016; 61/117,021; 61/117,015

(56) US-A1-20060195307

(32) 2008.11.21

WO-A2-2008097303

(33) US

EP-B1-1161657

(43) 2014.01.30

US-B2-7261167

(62) 201170598; 2009.09.30

US-B1-6785641

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**ЭКСОНМОБИЛ АПСТРИМ РИСЕРЧ
КОМПАНИ (US)**

(72) Изобретатель:
**Бейли Джеффри Р., Бидигер Эрика
А.О., Ван Лэй, Сундарараман
Шанкар, Гупта Вишвас, Эртас
Мехмет Дениз (US)**

(74) Представитель:
Медведев В.Н. (RU)

(57) Раскрываются способ и устройство, ассоциированные с добычей углеводородов. Способ, который относится к моделированию и управлению буровым оборудованием, включает в себя создание одного или нескольких заменителей по меньшей мере для части компоновки низа бурильной колонны (КНБК) и вычисление результатов работ от каждого из одного или нескольких заменителей. Вычисленные результаты моделирования могут включать в себя одну или несколько эксплуатационных характеристик вибрации, которые описывают характеристику вибрации КНБК у заменителей для рабочих параметров и граничных условий, которые могут быть практически такими же, как условия, которые нужно использовать, используемые или ранее использованные условия в буровых работах. Выбранный заменитель КНБК затем может использоваться в операции строительства буровой скважины и соответственно ассоциироваться с добычей углеводородов.

B1

032474

**032474
B1**

Данная заявка испрашивает приоритет предварительных заявок США № 61/117015, 61/117016, 61/117021, каждая из которых была подана на 21 ноября 2008 г. и каждая из которых полностью включается в этот документ путем ссылки во всей своей полноте.

Область техники

Настоящее раскрытие изобретения предоставляет способы и системы для моделирования, проектирования и проведения буровых работ, которые учитывают вибрации, которые может испытывать буровая система. В частности, настоящее раскрытие изобретения предоставляет системы и способы для моделирования характеристики вибрации у компоновки низа бурильной колонны (КНБК) во время бурения, чтобы обеспечить возможность усовершенствованной конструкции и работы для повышенной механической скорости проходки, для уменьшения повреждения скважинного оборудования, для увеличения текущей стойкости инструмента и/или для улучшения общей буровой характеристики. Моделирование КНБК может использоваться для более эффективного увеличения извлечения углеводородов с помощью буровых шахт.

Уровень техники

Этот раздел предназначен для представления различных особенностей связанной технологии, которые могут ассоциироваться с типовыми вариантами осуществления настоящих методик. Считается, что это обсуждение будет полезным в предоставлении информации для обеспечения лучшего понимания конкретных особенностей настоящих методик. Соответственно, следует понимать, что этот раздел следует толковать в этой интерпретации, а не обязательно как признания предшествующего уровня техники.

Добыча углеводородов, например нефти или газа, выполняется в течение многих лет. Чтобы добыть эти углеводороды, одна или несколько буровых скважин обычно бурятся в подземных местоположениях, которые обычно называются подземными месторождениями или бассейнами. Буровые скважины формируются, чтобы обеспечить потоки жидкости из подземных местоположений на поверхность. Буровые работы обычно включают в себя использование буровой установки, соединенной с бурильной колонной и компоновкой низа бурильной колонны (КНБК), которая может включать в себя буровое долото или другие породоразрушающие устройства, бурильные трубы, стабилизаторы, оборудование каротажа во время бурения (MWD), роторно-управляемые системы (RSS), инструменты открытия и расширения скважины, бицентричные долота, расширители с цилиндрическими шарошками, амортизирующие переводники, переводники с обратным клапаном, переводники долота, утяжеленную бурильную трубу, забойные турбинные двигатели и другие компоненты, известные специалистам в данной области техники. Как только буровые работы завершаются, добытые жидкости, например углеводороды, обрабатываются и/или транспортируются в место доставки.

Как понятно, буровые работы для подготовки эксплуатационных скважин, нагнетательных скважин и других буровых скважин очень похожи. Настоящие способы и системы могут использоваться совместно с предоставлением буровых скважин для добычи углеводородов, для операций нагнетания или для других целей.

Во время буровых работ различные ограничители могут сдерживать скорость проходки (ROP). Например, вибрации во время буровых работ установлены в качестве одного фактора, который ограничивает ROP. Эти вибрации могут включать в себя поперечные, осевые и крутильные вибрации, которые могут присутствовать в связанном или в несвязанном виде. Осевые вибрации возникают в результате взаимодействий долота/горной породы и продольной динамики бурильной колонны; этот режим может распространяться к поверхности или может ослабляться при контакте со стволом скважины. Крутильные вибрации могут включать в себя колебания в крутящем моменте в долоте и последующее распространение вверх по стволу скважины в виде возмущения во вращательном движении бурильной колонны. Поперечные вибрации КНБК включают в себя динамику изгиба балки в жесткой трубе около долота и обычно не распространяются непосредственно на поверхность. Однако поперечные вибрации могут присоединиться к осевым и крутильным вибрациям и чувствоваться на поверхности. Некоторые авторы определили поперечные вибрации как наиболее разрушающий вид колебаний для бурового оборудования. Распознавание разных типов и амплитуд вибраций может обеспечиваться из скважинных датчиков в оборудовании MWD, чтобы предоставить либо снятие показаний с поверхности о вибрациях в скважине, либо сохраненные данные, которые можно загрузить на поверхности после того, как заканчивается "время работы долота" или интервал бурения.

Поскольку буровые работы дорогие, могут быть полезны процессы для оптимизации буровых работ на основе устранения или сокращения неэффективностей системы или основных ограничителей, например вибраций. Авария в скважине у КНБК или компонента КНБК может быть дорогостоящей и значительно увеличить затраты на бурение скважины. Стоимость отказов КНБК может включать в себя подменное оборудование и дополнительное время для спускоподъемной операции бурильной колонны в случае размыва (например, потери давления бурильной колонны) без обрыва бурильной колонны. Дополнительно усугубляя эти затраты, могут повреждаться секции ствола скважины, что может привести к боковому (запасным) стволам вокруг поврежденной секции ствола скважины. Хотя многие факторы влияют на долговечность КНБК, вибрации установлены в качестве фактора, который влияет на срок службы оборудования.

Соответственно, инструменты проектирования (например, программные приложения и программы моделирования) могут использоваться для изучения конфигураций бурильной колонны и КНБК и предложенных буровых работ перед реализацией в операции бурения. Например, вибрационные тенденции можно распознавать вместе с условиями бурения, проектами конфигурации, материалами и другими операционными переменными, которые могут влиять на вибрационные тенденции бурильной колонны и/или КНБК во время буровых работ. Например, программы моделирования могут представить взаимодействия статических сил в КНБК в зависимости от размещения стабилизатора. Хотя были многочисленные попытки смоделировать динамику КНБК, существует необходимость в инструментах проектирования на основе модели, чтобы моделировать конструкции КНБК для оценивания влияний вибрации, которые описаны в этом документе.

В многочисленных материалах, использованных при экспертизе этой заявки, существуют модели буровых снарядов как временной, так и частотной области. Вследствие заинтересованности в непосредственных вычислениях силы для конструкции долота и быстрого роста вычислительной способности, современная деятельность сконцентрировалась на использовании непосредственных моделирований во временной области и методов конечных элементов, включая двумерные и трехмерные подходы. Однако эти моделирования по-прежнему требуют значительного времени на вычисление, а поэтому количество случаев, которые можно рассмотреть на практике, ограничено. Метод конечных элементов также использован для моделей частотной области, в которых основной подход состоит в том, чтобы рассмотреть задачу о собственных значениях и вычислить критические частоты и формы колебаний. Только два ссылочных материала использовали подход с частотной характеристикой вынужденных колебаний, и эти авторы выбрали иные построения моделей, нежели обсуждаются в этом документе, включая другой выбор граничных условий. Один ссылочный материал использовал аналогичное условие по долоту в модели конечных элементов, но другое граничное условие было задано на верхней части компоновки низа бурильной колонны. Этот ссылочный материал не продолжил разрабатывать дальше раскрытые в нем методики проектирования и способы.

Дополнительно, как часть системы моделирования, разработанной компанией ExxonMobil, эксплуатационная характеристика вибрации использовалась для обеспечения руководства в отдельных конструкциях КНБК. Была разработана установившаяся динамическая модель частотной характеристики вынужденных колебаний для анализа одной КНБК в пакетном режиме из интерфейса командной строки, использующая выходные текстовые файлы для графической постобработки с использованием внешнего программного средства, например Microsoft Excel™. Этот способ было трудно использовать, и ограничения интерфейса препятствовали его применению. Модель использовалась в некоторых коммерческих применениях в США с 1992 г. для установки стабилизаторов, чтобы уменьшить предсказанные уровни вибрации в общем ощущении и особенно в проектных диапазонах скорости вращения. Эта модель предоставила индекс кривизны конечной точки для одной конфигурации КНБК. Индекс кривизны конечной точки ограничен взглядом на характеристику с точки зрения одной точки в верхней части модели КНБК. Кроме того, рабочие ограничения этой прежней модели ограничили ее применение к отдельным конфигурациям КНБК для определения размещения стабилизатора. Она не допускала удобного рассмотрения нескольких конфигураций КНБК или удобного изменения множества параметров для оптимизации одного или нескольких факторов, помимо расположения стабилизатора.

Другой сопутствующий материал можно обнаружить в следующем: G. Heisig и др., "Lateral Drillstring Vibrations in Extended-Reach Wells", SPE 59235, 2000; P.C. Kriesels и др., "Cost Savings through an Integrated Approach to Drillstring Vibration Control", SPE/IADC 57555, 1999; D. Dashevskiy и др., "Application of Neural Networks for Predictive Control in Drilling Dynamics", SPE 56442, 1999; A.S. Yigit и др., "Mode Localization May Explain Some of BHA Failures", SPE 39267, 1997; M.W. Dykstra и др., "Drillstring Component Mass Imbalance: A Major Source of Downhole Vibrations", SPE 29350, 1996; J.W. Nicholson, "An Integrated Approach to Drilling Dynamics Planning, Identification, and Control", SPE/IADC 27537, 1994; P.D. Spanos и M.L. Payne, "Advances in Dynamic Bottomhole Assembly Modeling and Dynamic Response Determination", SPE/IADC 23905, 1992; M.C. Apostol и др., "A Study to Determine the Effect of Damping on Finite-Element-Based, Forced Frequency-Response Models for Bottomhole Assembly Vibration Analysis", SPE 20458, 1990; F. Clayer и др., "The Effect of Surface and Downhole Boundary Conditions on the Vibration of Drillstrings", SPE 20447, 1990; D. Dareing, "Drill Collar Length is a Major Factor in Vibration Control", SPE 11228, 1984; A.A. Besaisow и др., "Development of a Surface Drillstring Vibration Measurement System", SPE 14327, 1985; M.L. Payne, "Drilling Bottom-Hole Assembly Dynamics", кандидатская диссертация, Университет Райса, май 1992; A. Besaisow и M. Payne, "A Study of Excitation Mechanisms and Resonances Inducing Bottomhole-Assembly Vibrations", SPE 15560, 1988; и патент США № 6785641.

Предшествующий уровень техники не предоставляет инструменты для поддержки процесса проектирования, который раскрыт в этом документе (т.е. прямого определения характеристик поведений вибраций при бурении для разнообразных сочетаний скорости вращения и нагрузки на долото), и отсутствуют ссылки на указатели промышленных образцов или показатели качества для облегчения сравнения поведений разных конструкций компоновки. Соответственно, имеется потребность в таких программных средствах и показателях исполнения, чтобы спроектировать улучшенные конфигурации компоновки ни-

за бурильной колонны и буровые работы для уменьшения вибраций при бурении.

Сущность изобретения

Технологии раскрытия изобретения ориентированы на способы и системы для изображения вибрационной характеристики бурового оборудования. В некоторых реализациях способы состоят из: а) построения по меньшей мере одного заменителя, представляющего по меньшей мере часть компоновки низа бурильной колонны; б) ассоциации по меньшей мере двух виртуальных датчиков с каждым из по меньшей мере одного заменителя, так что по меньшей мере два датчика разнесены в продольном направлении друг от друга вдоль каждой компоновки низа бурильной колонны; в) использования по меньшей мере одной модели частотной области для вычисления по меньшей мере одного состояния по меньшей мере двух виртуальных датчиков во время одной или нескольких имитированных буровых работ для каждого из по меньшей мере одного заменителя; д) вычисления индекса проводимости между по меньшей мере двумя виртуальными датчиками для каждого из по меньшей мере одного заменителя, где индекс проводимости, по меньшей мере, частично основывается по меньшей мере на одном из вычисленных состояний; и е) использования вычисленного индекса проводимости для каждого из по меньшей мере одного заменителя, чтобы определить проводимость вибраций в компоновке низа бурильной колонны.

Каждый из указанных выше этапов может выполняться с различными регулировками и/или деталями в рамках объема настоящего раскрытия изобретения. Например, по меньшей мере одно вычисленное состояние может содержать по меньшей мере одно из смещения, угла наклона, изгибающего момента и сдвигающей силы. Одно или несколько из этих вычисленных состояний может использоваться для вычисления ускорений по меньшей мере двух виртуальных датчиков, которые, в некоторых реализациях, могут использоваться для вычисления индекса проводимости, например путем соотношения. Аналогичным образом вычисленный индекс проводимости может быть соотношением между любым одним или несколькими вычисленными состояниями или их выводами.

В зависимости от того, как вычисляется индекс проводимости, его численное значение может иметь разные значения. В реализациях, где индекс проводимости вычисляется в виде соотношения, индекс проводимости больше единицы может предсказывать, что вибрации увеличились бы между первым виртуальным датчиком и вторым виртуальным датчиком. Аналогичным образом, индекс проводимости меньше 1 может предсказывать, что вибрации уменьшатся между первым виртуальным датчиком и вторым виртуальным датчиком.

В некоторых реализациях по меньшей мере один из виртуальных датчиков может ассоциироваться с долотом по меньшей мере одного заменителя компоновки низа бурильной колонны, а индекс проводимости может вычисляться для множества точек на заменителе. В таких реализациях вычисленные индексы проводимости могут дать график, где максимумы на графике проводимости указывают местоположения локальной пиковой вибрации в заменителе компоновки низа бурильной колонны.

В некоторых реализациях способы дополнительно могут включать в себя: f) бурение по меньшей мере части буровой скважины с помощью компоновки низа бурильной колонны, по меньшей мере существенно изображающей заменитель, используемый для вычисления индекса проводимости, наряду с измерением ускорения по меньшей мере на двух датчиках, расположенных вдоль реализованной компоновки низа бурильной колонны; g) вычисление измеренного индекса проводимости с использованием измеренных ускорений; и h) сравнение измеренного индекса проводимости с индексом проводимости заменителя. Кроме того, некоторые реализации могут включать в себя обновление по меньшей мере одного заменителя, чтобы представить другую конфигурацию компоновки низа бурильной колонны, и повторение этапов (b)-(e) выше. Дополнительно или в качестве альтернативы способы могут включать в себя изменение буровых работ на буровой скважине на основе, по меньшей мере частично, измеренного индекса проводимости и индекса проводимости заменителя. Более того, некоторые реализации могут включать в себя обновление одного или нескольких по меньшей мере из одного заменителя, по меньшей мере двух виртуальных датчиков, по меньшей мере одной модели частотной области и вычислений индекса проводимости на основе, по меньшей мере частично, сравнения измеренного индекса проводимости и индекса проводимости по меньшей мере у одного заменителя.

Дополнительно или в качестве альтернативы настоящее раскрытие изобретения предоставляет способы бурения скважины для использования в добыче углеводородов. Например, подходящий способ может включать в себя: а) построение по меньшей мере одного заменителя, представляющего по меньшей мере часть компоновки низа бурильной колонны, где по меньшей мере один заменитель включает в себя по меньшей мере два виртуальных датчика; б) вычисление индекса проводимости между по меньшей мере двумя виртуальными датчиками для каждого из по меньшей мере одного заменителя; в) выбор оптимизированной конфигурации компоновки низа бурильной колонны для буровой работы на основе, по меньшей мере частично, вычисленного индекса проводимости; и д) бурение скважины с помощью бурового оборудования, включающего компоновку низа бурильной колонны, по меньшей мере существенно изображающую выбранную конфигурацию компоновки низа бурильной колонны. В некоторых реализациях этап бурения скважины может проводиться в соответствии с планом бурения, разработанным на основе, по меньшей мере частично, вычисленного индекса проводимости. Дополнительно или в качестве альтернативы этап выбора оптимизированной конфигурации компоновки низа бурильной колонны мо-

жет содержать выбор разных конфигураций компоновки низа бурильной колонны для разных частей буровой работы.

Как и в случае со всеми описанными в этом документе реализациями, способы и системы могут быть реализованы и/или использоваться в добыче углеводородов. Например, способы могут включать в себя этап добычи углеводородов из буровой скважины, пробуренной с помощью бурового оборудования, включающего в себя компоновку низа бурильной колонны, по меньшей мере существенно изображающую заменитель компоновки низа бурильной колонны, для которого вычислялся индекс проводимости.

Любой один или несколько способов, описанных выше, могут включать в себя один или несколько этапов, приспособленных для выполнения посредством компьютерной системы моделирования. Соответственно, настоящее раскрытие изобретения дополнительно ориентировано на системы моделирования. Типовая система моделирования может включать в себя процессор; запоминающее устройство, соединенное с процессором; и набор машиночитаемых команд, доступный процессору. Набор машиночитаемых команд может конфигурироваться для: а) построения по меньшей мере одного заменителя, представляющего по меньшей мере часть компоновки низа бурильной колонны, где по меньшей мере один заменитель включает в себя по меньшей мере два виртуальных датчика; б) вычисления индекса проводимости между по меньшей мере двумя виртуальными датчиками для каждого из по меньшей мере одного заменителя; и с) вывода индекса проводимости для использования при выборе оптимизированной конфигурации компоновки низа бурильной колонны для буровой работы на основе, по меньшей мере частично, вычисленного индекса проводимости. Типовая система может включать в себя команды, приспособленные для вычисления индекса проводимости с использованием по меньшей мере одной модели частотной области, чтобы вычислить по меньшей мере одно состояние по меньшей мере у двух виртуальных датчиков во время одной или нескольких имитированных буровых работ для каждого из по меньшей мере одного заменителя. Дополнительно или в качестве альтернативы системы в настоящем раскрытии изобретения могут предоставлять выходные данные в виде графического изображения индекса проводимости конфигурации компоновки низа бурильной колонны в одной или нескольких точках в конфигурации компоновки низа бурильной колонны.

Технологии настоящего раскрытия изобретения дополнительно ориентированы на способы и системы для изображения вибрационной характеристики бурового оборудования. В некоторых реализациях способы состоят из: а) построения по меньшей мере одного заменителя, представляющего по меньшей мере часть компоновки низа бурильной колонны, расположенной в буровой скважине; б) использования модели частотной области для вычисления бокового усилия по меньшей мере одной точки контакта между компоновкой низа бурильной колонны и буровой скважиной, где боковое усилие вычисляется в зависимости от скорости вращения для каждого заменителя; с) определения по меньшей мере одного углового коэффициента бокового усилия в зависимости от скорости вращения по меньшей мере для одной точки контакта; и d) отображения вычисленного углового коэффициента бокового усилия в зависимости от скорости вращения.

Каждый из указанных выше этапов может выполняться с различными регулировками и/или деталями в рамках объема настоящего раскрытия изобретения. Например, модель частотной области, используемая для вычисления бокового усилия, может рассматривать коэффициент трения как непостоянный по сравнению со скоростями вращения, рассмотренными по меньшей мере для одного из контактных усилий. Дополнительно или в качестве альтернативы по меньшей мере один из угловых коэффициентов бокового усилия может определяться графически и/или численно. В некоторых реализациях определенный угловой коэффициент бокового усилия может быть объединенным коэффициентом, характерным для множества точек контакта между компоновкой низа бурильной колонны и буровой скважиной.

В зависимости от того, как вычисляется угловой коэффициент бокового усилия, его численное значение может иметь разные значения. В некоторых реализациях ненулевой угловой коэффициент бокового усилия может указывать большую возможность для вибрации в той области компоновки низа бурильной колонны. В некоторых реализациях абсолютное значение углового коэффициента бокового усилия может изображаться в виде функции скорости вращения, чтобы определить количественную вероятность вибрации, которая может использоваться для выявления одной или нескольких точек контакта, имеющих большую возможность для вибрации.

Дополнительно или в качестве альтернативы настоящее раскрытие изобретения предоставляет способы бурения скважины для использования в добыче углеводородов. Например, подходящий способ может включать в себя: а) построение по меньшей мере одного заменителя, представляющего по меньшей мере часть компоновки низа бурильной колонны, расположенной в буровой скважине; б) определение по меньшей мере одного углового коэффициента бокового усилия в зависимости от скорости вращения по меньшей мере для одной точки контакта между компоновкой низа бурильной колонны и буровой скважиной; с) выбор оптимизированной конфигурации компоновки низа бурильной колонны для буровой работы на основе, по меньшей мере частично, по меньшей мере одного определенного углового коэффициента бокового усилия; и d) бурение скважины с помощью бурового оборудования, включающего компоновку низа бурильной колонны, по меньшей мере, существенно изображающую выбранную конфигурацию компоновки низа бурильной колонны. В некоторых реализациях этап бурение скважины может

проводиться в соответствии с планом бурения, разработанным на основе, по меньшей мере частично, по меньшей мере одного определенного углового коэффициента бокового усилия. Дополнительно или в качестве альтернативы этап выбора оптимизированной конфигурации компоновки низа бурильной колонны может содержать выбор разных конфигураций компоновки низа бурильной колонны для разных частей буровой работы.

Как и в случае со всеми описанными в этом документе реализациями, способы и системы могут быть реализованы и/или использоваться в добыче углеводородов. Например, способы могут включать в себя этап добычи углеводородов из буровой скважины, пробуренной с помощью бурового оборудования, включающего в себя компоновку низа бурильной колонны, по меньшей мере, существенно изображающую заменитель компоновки низа бурильной колонны, для которого вычислялся угловой коэффициент бокового усилия.

Любой один или несколько способов, описанных выше, могут включать в себя один или несколько этапов, приспособленных для выполнения посредством компьютерной системы моделирования. Соответственно, настоящее раскрытие изобретения дополнительно ориентировано на системы моделирования. Типовая система моделирования может включать в себя процессор; запоминающее устройство, соединенное с процессором; и набор машиночитаемых команд, доступный процессору. Набор машиночитаемых команд может конфигурироваться для: типовая система может включать в себя команды, приспособленные для: а) построения по меньшей мере одного заменителя, представляющего по меньшей мере часть компоновки низа бурильной колонны, расположенной в буровой скважине; б) определения по меньшей мере одного углового коэффициента бокового усилия в зависимости от скорости вращения по меньшей мере для одной точки контакта между компоновкой низа бурильной колонны и буровой скважиной; и d) вывода по меньшей мере одного углового коэффициента бокового усилия для использования при выборе оптимизированной конфигурации компоновки низа бурильной колонны для буровой работы на основе, по меньшей мере частично, по меньшей мере одного определенного углового коэффициента бокового усилия. В некоторых реализациях этап определения углового коэффициента бокового усилия использует по меньшей мере одну модель частотной области для вычисления бокового усилия по меньшей мере в одной точке контакта. Дополнительно или в качестве альтернативы системы в настоящем раскрытии изобретения могут предоставлять выходные данные в виде графического изображения углового коэффициента бокового усилия у конфигурации компоновки низа бурильной колонны в одной или нескольких точках в конфигурации компоновки низа бурильной колонны.

Дополнительно или в качестве альтернативы технологии из настоящего раскрытия изобретения ориентированы на способы моделирования бурового оборудования, чтобы представить вибрационную характеристику бурового оборудования. В некоторых реализациях способ включает в себя а) выявление двух или более взвешенных основных режимов возбуждения для компоновки низа бурильной колонны; б) построение по меньшей мере одного заменителя, представляющего по меньшей мере часть компоновки низа бурильной колонны; с) использование модели частотной области для имитации отклика по меньшей мере одного заменителя на возбуждения, соответствующие выявленным основным режимам возбуждения; d) определение одной или нескольких эксплуатационных характеристик для моделирующего заменителя; и e) использование одной или нескольких эксплуатационных характеристик при выборе по меньшей мере одной из одной или нескольких конфигураций компоновки низа бурильной колонны и одного или нескольких планов бурения для использования в буровых работах. В некоторых реализациях каждый основной режим возбуждения может взвешиваться относительно по меньшей мере одного другого основного режима возбуждения. Дополнительно или в качестве альтернативы режимы возбуждения могут иметь отношение по меньшей мере к одному связанному с вибрацией параметру бурения.

Одна или несколько определенных эксплуатационных характеристик могут основываться, по меньшей мере частично, на имитированном отклике заменителя по меньшей мере в двух основных режимах возбуждения и на относительном весе по меньшей мере двух основных режимов возбуждения. Одна или несколько эксплуатационных характеристик могут выбираться по меньшей мере из одного из индекса кривизны конечной точки, индекса энергии деформации КНБК, индекса средней переданной энергии деформации, индекса переданной энергии деформации, индекса среднеквадратичного бокового усилия КНБК, индекса среднеквадратичного крутящего момента КНБК, индекса общего бокового усилия КНБК, индекса полного крутящего момента КНБК, углового коэффициента бокового усилия, индекса проводимости и их любого математического сочетания. Могут быть выявлены другие подходящие эксплуатационные характеристики.

В некоторых реализациях настоящих способов способы дополнительно могут включать в себя бурение скважины с использованием по меньшей мере одного из а) выбранной одной или нескольких конфигураций компоновки низа бурильной колонны и б) выбранного одного или нескольких планов бурения.

Два или более основных режима возбуждения могут определяться различными подходящими способами. Например, основные режимы возбуждения могут определяться из эксплуатационных данных с использованием способа, включающего: а) получение измерений динамики эксплуатационных данных по меньшей мере одного динамического состояния компоновки низа бурильной колонны, где каждое из

измерений ассоциируется по меньшей мере с одним узлом в компоновке низа буровой колонны; обработку измерений эксплуатационных данных, чтобы получить одно или несколько окон, имеющих спектры частотной области по меньшей мере одного из измеренных динамических состояний; и с) выявление двух или более основных режимов возбуждения в одном или нескольких окнах. Основные режимы возбуждения могут соответствовать областям спектров частотной области, имеющих спектральные пики или накопления. Более того, каждый из двух или более основных режимов возбуждения взвешивается относительно по меньшей мере одного другого основного режима возбуждения.

Продолжая с типовым способом на основе эксплуатационных данных, по меньшей мере одно динамическое состояние может выбираться из одного или нескольких из скорости вращения, смещения, скорости, ускорения, деформации изгиба, изгибающего момента, угла наклона и силы. Эксплуатационные данные могут накапливаться с использованием одного или нескольких наддолготных датчиков. В некоторых реализациях измерения эксплуатационных данных могут обрабатываться с использованием одного или нескольких преобразований Фурье, чтобы предоставить спектры частотной области. Дополнительно или в качестве альтернативы в некоторых реализациях одно или несколько окон могут представлять измеренные данные для интервала в хронологии бурения, где интервал означает по меньшей мере одно из периода времени, диапазона глубины и скорости вращения, применяемой во время бурения. Например, одно или несколько окон могут представлять интервалы с почти постоянной скоростью вращения, и один или несколько выявленных основных режимов возбуждения могут ассоциироваться с одним или несколькими кратными числами скорости вращения, имеющей спектральные пики. Способы на основе эксплуатационных данных дополнительно могут включать в себя бурение скважины с использованием по меньшей мере одного из а) выбранной одной или нескольких конфигураций компоновки низа буровой колонны и б) выбранного одного или нескольких планов бурения.

В некоторых реализациях основные режимы возбуждения могут определяться как из модельных данных, так и из эксплуатационных данных. Типовой способ может включать в себя: а) получение измерений по меньшей мере одного параметра компоновки низа буровой колонны, указывающего вибрационную характеристику, где измерения относятся к одному или нескольким узлам в компоновке низа буровой колонны; б) построение заменителя, представляющего по меньшей мере часть компоновки низа буровой колонны; с) использование модели частотной области для имитации отклика заменителя на динамические возбуждения в одном или нескольких опорных узлах, соответствующих узлам в компоновке низа буровой колонны, где отклик имитируется для каждого из по меньшей мере двух режимов возбуждения; d) определение вибрационной эксплуатационной характеристики для каждого из по меньшей мере двух режимов возбуждения на основе, по меньшей мере частично, отклика заменителя на динамические возбуждения; e) сравнение по меньшей мере двух определенных вибрационных эксплуатационных характеристик с полученными измерениями, чтобы определить относительный вклад каждого режима возбуждения в измеренную характеристику вибрации; и f) взвешивание каждого из режимов возбуждения в соответствии с соответствующими относительными вкладами, чтобы определить по меньшей мере два основных режима возбуждения, которые взвешиваются относительно друг друга.

Продолжая с примером, использующим как эксплуатационные, так и модельные данные, по меньшей мере один измеренный параметр может выбираться из одного или нескольких из скорости проходки, механической удельной энергии, измеренного глубинного ускорения, измеренной глубинной скорости, изгибающего момента, деформации изгиба, счетчика ударов и вибраций при прерывистом перемещении. Такие параметры могут накапливаться любым подходящим способом, используя ряд общедоступного оборудования и способов. В некоторых реализациях динамические возбуждения заменителя могут применяться путем возмущения по меньшей мере одного состояния модели, выбранного из смещения, угла наклона, момента и силы. Дополнительно или в качестве альтернативы, в некоторых реализациях по меньшей мере две определенные вибрационные эксплуатационные характеристики могут суммироваться с мультипликативными неотрицательными коэффициентами для получения сборной эксплуатационной характеристики заменителя для сравнения с полученными измерениями. Вибрационная эксплуатационная характеристика заменителя может сравниваться с полученными измерениями, меняя при этом неотрицательные коэффициенты для каждой эксплуатационной характеристики до тех пор, пока, по меньшей мере, существенно не будут минимизированы различия между сборными эксплуатационными характеристиками и полученными измерениями. Когда те различия минимизируются, устанавливаются коэффициенты возбуждения, соответствующие по меньшей мере двум взвешенным основным режимам возбуждения. Как и в случае с другими описанными в этом документе способами, способы, использующие как эксплуатационные, так и модельные данные, дополнительно могут включать в себя бурение скважины с использованием по меньшей мере одного из: а) выбранной одной или нескольких конфигураций компоновки низа буровой колонны и б) выбранного одного или нескольких планов бурения.

Способы, описанные в этом документе, могут быть реализованы и/или использоваться при добыче углеводородов. Например, способы могут включать в себя этап добычи углеводородов из буровой скважины с использованием по меньшей мере одного из: а) выбранной одной или нескольких конфигураций компоновки низа буровой колонны и б) выбранного одного или нескольких планов бурения.

Краткое описание чертежей

Вышеупомянутые и другие преимущества настоящей методики могут стать очевидными после прочтения нижеследующего подробного описания изобретения и обращения к чертежам, на которых

- фиг. 1 - типовая блок-схема алгоритма для моделирования заменителей КНБК;
- фиг. 2 - типовая блок-схема алгоритма для моделирования заменителей КНБК;
- фиг. 3А иллюстрирует вид в перспективе компоновки низа бурильной колонны;
- фиг. 3В - поперечное сечение компоновки низа бурильной колонны из фиг. 3А;
- фиг. 3С и 3D предоставляют схематические иллюстрации модели элемента балки у сечения компоновки низа бурильной колонны;
- фиг. 4 - схематическую иллюстрацию модели элемента балки в некоторой секции компоновки низа бурильной колонны;
- фиг. 5 показывает типовой график индекса общего бокового усилия КНБК;
- фиг. 6 - типовой график углового коэффициента бокового усилия;
- фиг. 7 - типовое сравнение двух графиков углового коэффициента бокового усилия;
- фиг. 8 предоставляет типовую схему системы моделирования;
- фиг. 9 - типовой вид экрана, предоставленный системой моделирования;
- фиг. 10А-10D - типовые виды экрана, предоставленные системой моделирования;
- фиг. 11А-11В - типовые виды экрана, предоставленные системой моделирования;
- фиг. 12 - типовой вид экрана, предоставленный системой моделирования;
- фиг. 13 - типовой вид экрана, предоставленный системой моделирования;
- фиг. 14А-14В - типовые виды экрана, предоставленные системой моделирования;
- фиг. 15 - типовой вид экрана, предоставленный системой моделирования;
- фиг. 16 - типовой вид экрана, предоставленный системой моделирования;
- фиг. 17 - типовой вид экрана, предоставленный системой моделирования;
- фиг. 18А-18В - типовые виды экрана, предоставленные системой моделирования;
- фиг. 19А-19С - типовые виды экрана, предоставленные системой моделирования;
- фиг. 20А-20В - типовые виды экрана, предоставленные системой моделирования;
- фиг. 21А-21Е - типовые виды экрана, предоставленные системой моделирования;
- фиг. 22 предоставляет показательную блок-схему алгоритма работы в пакетном режиме;
- фиг. 23А-23D - типовые виды экрана, предоставленные системой моделирования;
- фиг. 24 - типовой вид экрана, предоставленный системой моделирования;
- фиг. 25 - типовой вид экрана, предоставленный системой моделирования, для сравнения измеренных данных с модельными результатами;
- фиг. 26 - типовой вид экрана средства для управления выводом при отображении фиг. 25; и
- фиг. 27 показывает поперечное ускорение КНБК, измеренное наддольным регистратором данных.

Подробное описание

В нижеследующем разделе подробного описания изобретения определенные варианты осуществления настоящих методик описываются применительно к предпочтительным вариантам осуществления. Однако в тех случаях, когда нижеследующее описание характерно для конкретного варианта осуществления или конкретного использования настоящих методик, это предназначается только для типовых целей и просто обеспечивает краткое описание типовых вариантов осуществления. Кроме того, в тех случаях, когда конкретный признак или особенность настоящих систем и способов описываются применительно к конкретному варианту осуществления или реализации, такие признаки и/или особенности аналогичным образом могут включаться или использоваться применительно к другим вариантам осуществления или реализациям, описанным в этом документе или иным образом входящим в объем изобретения, заявленный в этой или родственных заявках. Соответственно, изобретение не ограничивается определенными вариантами осуществления, описанными ниже, а точнее включает в себя все альтернативы, модификации и эквиваленты, входящие в истинный объем прилагаемой формулы изобретения.

Настоящее раскрытие изобретения ориентировано на способы и системы для моделирования, проектирования и использования компоновок низа бурильной колонны для оценки, анализа, проектирования и содействия в бурении скважин и добыче углеводородов из подземных месторождений. В настоящих методиках система моделирования может включать в себя программное обеспечение или программы моделирования, которые изображают характеристику вибрации у одной или нескольких возможных КНБК графически в том, что называется "расчетным режимом". В некоторых реализациях характеристика вибрации у двух или более возможных КНБК может отображаться графически, и одновременно для облегчения сравнения возможных КНБК. КНБК, используемая в буровой системе, может выбираться на основе одной или нескольких относительных эксплуатационных характеристик вибрации для разных заменителей КНБК. Эти характеристики могут включать в себя точечные индексы, например индекс кривизны конечной точки, и интервальные индексы, например индекс энергии деформации КНБК, индекс средней переданной энергии деформации, индекс переданной энергии деформации, индекс среднеквадратичного (RMS) бокового усилия КНБК, индекс среднеквадратичного крутящего момента КНБК, индекс общего бокового усилия КНБК, индекс полного крутящего момента КНБК, индекс проводимости и угловой коэффициент бокового усилия, которые дополнительно обсуждаются ниже, в дополнение к

характерным статическим проектным параметрам для соответствующей компоновки.

Дополнительно настоящее раскрытие изобретения предоставляет способы и системы, которые используют отображение "каротажного режима" для сравнения предсказанных характеристик вибрации с измеренными данными при определенных условиях эксплуатации. Такие же характеристики, используемые в расчетном режиме, могут быть представлены в отображении каротажного режима для сравнения измеренных данных бурения с характеристиками, чтобы помочь в определении характеристики вибрации КНБК и добиться понимания того, как оценивать разные показатели характеристик вибрации путем сравнения с эксплуатационными данными (например, измеренными данными). Например, и как станет понятнее из описания в этом документе, один или несколько наборов данных из расчетного режима, включающих эксплуатационные характеристики вибрации, можно сравнить с измеренными данными и/или данными, выведенными из измеренных данных. Сравнение может обнаружить полезную информацию, например компоненты КНБК, вероятнее всего вносящие вклад в вибрации, условия бурения, которые устраняют вибрации, относительные вклады конкретных индексов, режимов возбуждения и/или вибрационных режимов в фактическую характеристику, и другую информацию для содействия в улучшении процесса моделирования, процесса проектирования КНБК и/или разработки оперативных планов бурения. Дополнительно или в качестве альтернативы эти же данные могут наноситься на график в формате, аналогичном используемому для эксплуатационных характеристик вибрации, со скоростью вращения и/или нагрузкой на долото на независимых осях, показывая отношения измеренных данных к эксплуатационным характеристикам вибрации. Поскольку эти данные обычно получаются при проверке данных вибрации при бурении, этот график называется отображением "DVDT".

Обращаясь теперь к чертежам и ссылаясь сначала на фиг. 1, описывается типовая блок-схема 100 алгоритма процесса моделирования и эксплуатации буровой системы в соответствии с некоторыми особенностями настоящих методик. В этом процессе возможные конфигурации КНБК представлены заменителями, которые могут использоваться в программах моделирования. Программы моделирования в настоящем раскрытии изобретения предоставляют графические и/или числовые представления о том, как работала бы конфигурация КНБК во время реализаций при одном или нескольких условиях эксплуатации. Графические и/или числовые представления могут быть показаны в виде одного или нескольких индексов, которые могут оцениваться на абсолютной или сравнительной основе, чтобы установить предпочтительную КНБК для заданных условий эксплуатации и/или предпочтительный набор условий эксплуатации для заданной КНБК.

Блок-схема алгоритма начинается с этапа 102. На этапе 104 можно получить данные для использования в способах из настоящего раскрытия изобретения. Данные могут включать в себя рабочие параметры буровой скважины (например, диапазон нагрузки на долото (WOB), диапазон скорости вращения (например, вращений в минуту (RPM)), номинальный диаметр скважины, уширение скважины, угол наклона скважины, плотность бурового раствора, глубину и т.п.). Также можно получить некоторые связанные с моделью параметры, например вибрационные режимы возбуждения, которые нужно моделировать (заданные в виде целых и/или нецелых кратных чисел скорости вращения и/или характерных частот вибраций), длину элемента, граничные условия и количество элементов "конечных отрезков" и значение увеличения конечного отрезка. Затем можно построить один или несколько заменителей КНБК, как показано на этапе 106. Построение заменителей КНБК включает в себя определение конструктивных параметров КНБК (например, размеров и механических свойств воротника бура, размеров стабилизаторов и их местоположения в КНБК, размеров буровой трубы, длины и т.п.). Как будет основательнее описываться ниже, заменитель КНБК может создаваться различными подходящими способами при условии, что заменитель можно моделировать с использованием моделей частотной области.

На этапе 108 работа заменителя КНБК моделируется с использованием одной или нескольких моделей частотной области. Моделирование заменителей КНБК может включать в себя рассмотрение статических решений и динамических решений. Моделирование может включать в себя двумерные модели и/или трехмерные модели, которые более подробно описываются ниже. Модели частотной области предоставляют различные данные о работе заменителя КНБК, которые могут использоваться для формирования по меньшей мере одной эксплуатационной характеристики вибрации. Фиг. 1 на этапе 110 иллюстрирует этап определения по меньшей мере одной эксплуатационной характеристики вибрации для заменителя КНБК. Примеры пояснительных эксплуатационных характеристик вибрации предоставлены ниже вместе примерами возможных применений и интерпретаций таких характеристик. По меньшей мере один индекс затем отображается или иным образом показывается пользователю или оператору, что представлено этапом 112 на фиг. 1. Отображение или представление эксплуатационной характеристики вибрации может сообщить индекс пользователю любым подходящим способом и в любом подходящем формате. Например, эксплуатационная характеристика вибрации может быть представлена в числовых и/или графических форматах. Более того, индекс может быть представлен на дисплее компьютера, на напечатанной странице, передан в удаленное расположение для представления, сохранен для более позднего извлечения и т.д. При наличии опыта инженер-разработчик КНБК может принять во внимание проектные компромиссы и путем сравнения результатов эксплуатационной характеристики вибрации для разных конструкций может разработать конструкции КНБК с улучшенной эксплуатационной характери-

стикой и/или установить лучшие рабочие параметры. Пример итерационного процесса проектирования дополнительно описывается ниже.

Фиг. 1 дополнительно иллюстрирует, что после определения и показа эксплуатационной характеристики вибрации в способы могут включаться различные необязательные этапы в пределах объема настоящего раскрытия изобретения. После моделирования может выбираться одна из конфигураций КНБК, представленная заменителем, как показано на этапе 114. Выбор может основываться на сравнении нескольких заменителей КНБК. Т.е. моделирование заменителей КНБК может включать в себя разные отображения вычисленных векторов состояния (например, смещение, наклон, изгибающий момент, поперечная сдвигающая сила балки и контактные усилия и крутящие моменты КНБК/ствола скважины) в зависимости от рабочих параметров (например, RPM, WOB и т.д.), расстояния до долота и конфигурации КНБК. Показанные результаты или решения, включающие эксплуатационные характеристики вибрации, могут включать в себя подробные 3-мерные векторные диаграммы состояний, предназначенные для иллюстрации вибрационных тенденций у альтернативных конфигураций КНБК. Выбор конфигурации КНБК может включать в себя выбор предпочтительной конфигурации КНБК в дополнение к идентификации предпочтительного рабочего диапазона для предпочтительной конфигурации. Выбор может основываться на относительной и/или абсолютной характеристике конфигураций КНБК, которые могут оцениваться с использованием ряда индексов, включая индекс кривизны конечной точки, индекс энергии деформации КНБК, индекс средней переданной энергии деформации, индекс переданной энергии деформации, индекс среднеквадратичного бокового усилия КНБК, индекс среднеквадратичного крутящего момента КНБК, индекс общего бокового усилия КНБК, индекс полного крутящего момента КНБК, индекс проводимости, угловой коэффициент бокового усилия и их любое математическое сочетание. В некоторых реализациях выбор конфигурации КНБК может включать в себя выбор конфигурации, которая была представлена одним или несколькими заменителями КНБК. Дополнительно или в качестве альтернативы выбранная конфигурация КНБК может включать в себя признаки или особенности от двух или более заменителей КНБК.

Продолжая со схематической блок-схемой 100 алгоритма на фиг. 1, способы в настоящем раскрытии изобретения при желании могут включать в себя бурение скважины с помощью компоновки низа бурильной колонны, воплощающей выбранную конфигурацию КНБК, например представленную этапом 116. Бурение скважины может включать в себя образование буровой скважины для доступа к подземному месторождению с помощью бурового оборудования.

В некоторых реализациях измеренные данные затем могут сравниваться с вычисленными данными и/или определенными эксплуатационными характеристиками вибрации для выбранной конфигурации КНБК, как показано на этапе 118. Т.е., когда выполняются буровые работы или в некотором периоде времени после буровых работ датчики могут использоваться для сбора измеренных данных, ассоциированных с работой бурового оборудования. Например, измеренные данные могут включать в себя, но не только, RPM, WOB, измерения осевых, поперечных вибраций и вибраций при прерывистом перемещении, буровую характеристику, которая определена по Механической удельной энергии (MSE), или другие подходящие выведенные величины. Глубинные данные могут либо передаваться на поверхность в реальном масштабе времени, либо они могут сохраняться в скважинном оборудовании и приниматься, когда оборудование возвращается на поверхность. Измеренные данные и/или данные, выведенные из измеренных данных, можно сравнить с вычисленными данными и/или эксплуатационными характеристиками вибрации из системы моделирования для выбранной конфигурации КНБК.

Сравнение измеренных данных (или данных, выведенных из измеренных данных) с модельными данными и эксплуатационными характеристиками вибрации может использоваться различными способами, некоторые примеры которых подробнее описываются в этом документе. Пояснительный и неисчерпывающий список таких применений включает в себя: 1) обновление заменителя для лучшего представления конфигурации КНБК; 2) обновление модели частотной области для лучшей имитации отклика КНБК во время буровых работ при различных условиях; 3) обновление вычислений и/или параметров, используемых для определения одной или нескольких эксплуатационных характеристик вибрации; 4) обновление планов буровых работ для выбранной конфигурации компоновки низа бурильной колонны, например, представленной прямоугольником 120 на фиг. 1; и 5) использование измеренных данных о вибрации для определения входного возбуждения на модели, моделирования отклика заменителей с этими входными данными и сравнение модельных результатов с другими измеренными данными, которые считаются выходным откликом системы. Процесс обратной связи облегчает подтверждение правильности и проверку моделирования. Он также помогает определить, какие из эксплуатационных характеристик вибрации гарантируют больший вес в процессе выбора конфигурации КНБК, соответственно предоставляя учебные пособия для улучшения разработки процесса выбора конфигурации КНБК. Дополнительно или в качестве альтернативы сравнение между модельными результатами и измерениями может дать эксплуатационным характеристикам вибрации возможность точнее предсказывать или указывать вибрационные тенденции заменителя КНБК, например, разрешая дополнительно уточнить или настроить один или несколько входных параметров эксплуатационной характеристики вибрации. Один пример таких улучшений эксплуатационной характеристики вибрации включает в себя взвешивание различных

вибрационных режимов возбуждения для более точного учета режимов, которые наиболее важны.

Как только образован ствол скважины, углеводороды можно добывать из буровой скважины, как показано на этапе 122. Добыча углеводородов может включать в себя освоение буровой скважины с помощью заканчивания скважины, присоединения трубопровода между заканчиванием скважины и наземными объектами и/или другие известные способы для извлечения углеводородов из ствола скважины. Процесс завершается на этапе 124.

Полезно, что настоящие методики могут использоваться для проектирования, создания и/или использования оборудования, которое может уменьшить влияние ограничителей, которые могут мешать буровым работам. В некоторых реализациях две или более конфигурации КНБК можно сравнить одновременно с вычислением и отображением модельных результатов для двух или более заменителей. С помощью этого сравнения можно оценить достоинства альтернативных конфигураций КНБК. Дополнительно в реализациях, где вычисленные модельные данные и измеренные данные ассоциируются с выбранной конфигурацией КНБК, другие ограничители, которые могут присутствовать во время бурения ствола скважины, можно выявить и решить своевременно, чтобы дополнительно улучшить буровые работы. Например, если основным ограничителем оказываются крутильные вибрации при прерывистом перемещении, а источники крутящего момента в КНБК из-за контактных усилий сведены к минимуму, другим возможным смягчением является выбор менее агрессивного долота, которое дает меньший крутящий момент для заданной применяемой нагрузки на долото. Пример моделирования двух или более заменителей конфигурации КНБК подробнее описывается ниже на фиг. 2.

Фиг. 2 - типовая блок-схема 200 алгоритма моделирования двух или более заменителей КНБК в соответствии с некоторыми особенностями настоящих методик. Для иллюстративных целей в этой блок-схеме алгоритма моделирование двух или более заменителей КНБК описывается как выполняемой системой моделирования. Система моделирования может включать в себя компьютерную систему, которая управляет программой моделирования. Программа моделирования может включать в себя машиночитаемые команды или код, который сравнивает два или более заменителя КНБК, что дополнительно обсуждается ниже. Хотя фиг. 2 ориентирована на сравнение двух или более заменителей КНБК, настоящие способы и системы полезны при моделировании одиночного заменителя КНБК, чтобы выявить эксплуатационные и/или конструктивные параметры, которые можно изменить, чтобы улучшить производительность путем уменьшения вибраций.

Блок-схема 200 алгоритма начинается с этапа 202. Для начала получают расположение и рабочие параметры КНБК для использования в операциях моделирования, представленных выше. На этапе 204 можно получить рабочие параметры. Рабочие параметры, например ожидаемые диапазоны WOB, RPM и наклон ствола скважины, можно получить от пользователя, вводящего рабочие параметры в систему моделирования, или путем обращения к файлу, содержащему рабочие параметры. Для статической модели состояние конечной точки модели КНБК (например, конец, удаленный от бурового долота) можно установить либо в центрированное состояние (например, труба центрирована в стволе скважины), либо в смещенное состояние (например, труба лежит на нижней стороне ствола скважины).

Затем получают конструктивные параметры КНБК, как показано на этапе 206. Конструктивные параметры КНБК могут включать в себя размеры и механические свойства доступного воротника бура, размеры доступных стабилизаторов, размеры буровой трубы, длину и т.п. Например, если буровое оборудование является секцией трубопровода или трубы, конструктивные параметры КНБК могут включать в себя внутренний диаметр (ID), внешний диаметр (OD), длину и изгибающий момент инерции трубы, и свойства материала трубы. Также система моделирования может моделировать буровое оборудование, сделанное из стали, немагнитного материала, монеля, алюминия, титана и т.д. Если буровое оборудование является стабилизатором или раздвижным буровым расширителем, то конструктивные параметры КНБК могут включать в себя OD лопасти, длину лопасти и/или расстояние до лопастей от концов.

На этапе 208 получают исходные заменители КНБК. Получение заменителей КНБК может включать в себя обращение к сохраненной версии ранее моделированной или использованной конфигурации КНБК или заменителя КНБК, взаимодействие с системой моделирования, чтобы определить или создать заменитель КНБК из конструктивных параметров КНБК, или ввод предложенной конфигурации КНБК в модель, которая была предоставлена инженером-буровиком или поставщиком услуг бурения. Заменители КНБК задают размещение оборудования и типы оборудования в КНБК, обычно определенное в виде расстояния до долота у каждого компонента.

Как только получены и/или построены разные заменители КНБК, вычисляются/моделируются результаты для выбранных заменителей КНБК, как показано на этапе 210. Вычисления могут включать в себя вычисление статических состояний для определения силы и угла наклона на долоте и статических контактных усилий стабилизатора, вычисление динамических эксплуатационных характеристик вибрации, вычисление динамических значений состояния для определенных режимов возбуждения в зависимости от скорости вращения, нагрузки на долото и расстояния до долота и т.п. Точнее говоря, вычисления могут включать в себя динамический поперечный изгиб (например, изгибной режим) и динамическую характеристику эксцентрического завихрения в виде возмущений около статического равновесия, которые можно вычислить с использованием способа матрицы перехода состояний, описанного ниже,

или другого подходящего способа. Этот изгибной режим или режим динамического поперечного изгиба может называться "завихрением". Статические характеристики могут включать в себя отклик вектора состояния (например, смещение, наклон, изгибающий момент, сдвигающая сила и контактные усилия или крутящие моменты) в зависимости от расстояния до долота, WOB, плотности жидкости и наклона ствола скважины (например, угла или угла наклона). Для значения динамических характеристик переменные состояния могут вычисляться в зависимости от расстояния до бурового долота, WOB, RPM, режима возбуждения и конечных отрезков. Для поперечного изгиба и эксцентрического завихрения состояния модели (например, смещение, наклон, изгибающий момент, сдвигающая сила и контактные усилия или крутящие моменты) могут вычисляться и отображаться в виде функций расстояния от долота для заданных WOB, RPM, режима возбуждения и конечный отрезок.

При использовании в данном документе "режим возбуждения" является целым и/или нецелым кратным числом скорости вращения или определенной частоты возбуждения, при которой система возбуждается (например, общеизвестно, что долото с конической шарошкой обеспечивает трехкратное осевое возбуждение, которое может ассоциироваться с поперечным режимом). "Конечный отрезок" является отрезком трубы, добавленным сверху КНБК, часто в утяжеленной буровой трубе, чтобы оценивать энергию колебаний, передаваемую вверх по стволу скважины. Поскольку отклик может быть чувствителен к местоположению последней узловой точки, один вычислительный подход состоит в оценке количества таких возможных местоположений для этой узловой точки с целью вычисления отклика. Затем эти разные результаты могут быть усреднены (с помощью среднеквадратичного значения (RMS) или другого способа усреднения), чтобы получить общую реакцию системы для параметрического набора различных режимов возбуждения и конечных отрезков для каждого RPM и WOB. Дополнительно или в качестве альтернативы также можно представить максимальное значение в "наихудшем случае", который дополнительно описывается ниже.

Как только вычисляются результаты, результаты отображаются, как показано на этапе 210.

Когда настоящие способы реализуются для прямого сравнения двух или более заменителей КНБК, результаты могут отображаться одновременно на одном или нескольких экранах и/или окнах дисплеев или могут отображаться в общем окне. Как описано выше, результаты могут передаваться аналогичным образом в удаленные местоположения для отображения или сохраняться для последующего извлечения. Отображение может происходить на экране или другом аудиовизуальном носителе, или может быть напечатано. Более того, отображение может включать в себя графические и/или числовые представления результатов.

Продолжая с блок-схемой алгоритма на фиг. 2, результаты проверяются, как показано на этапе 212. Процесс проверки результата вычисления может включать в себя определение путем исследования, например, что отсутствовали численные задачи, возникшие при моделировании, и что все режимы возбуждения соразмерно имитировались на всем запрошенном диапазоне скоростей вращения, нагрузок на долото и конечных отрезков. В некоторых реализациях процесс проверки результата вычисления может включать в себя отбрасывание и/или игнорирование численно расходящихся результатов при вычислении одной или нескольких эксплуатационных характеристик вибрации. Могут быть реализованы другие способы проверки результатов.

На этапе 214 фиг. 2 иллюстрирует, что можно выполнить определение, нужно ли изменять конфигурации КНБК, представленные заменителями, и/или другие параметры. Если конфигурации КНБК или определенные параметры нужно изменять, то конфигурации КНБК и/или параметры могут быть изменены на этапе 216. Модификации могут включать в себя изменение определенных особенностей в рабочих параметрах, заменителях КНБК, конструктивных параметрах КНБК и/или добавление нового заменителя КНБК. В качестве характерного примера WOB, RPM и/или режим возбуждения можно изменить для моделирования другого набора условий эксплуатации. Конфигурации КНБК и соответствующие заменители обычно регулируются путем изменения расстояния между точками стабилизации, путем изменения размеров или количества стабилизаторов и буровых труб, путем перемещения раздвижных буровых расширителей или переходов в другое положение в заменителе КНБК и т.п. Как только модификации закончены, результаты могут быть повторно вычислены на этапе 210, и процесс может повторяться для дополнительного улучшения характеристики.

Однако, если конфигурации КНБК и/или параметры не нужно изменять, то предоставляются результаты, как показано на этапе 218. Предоставление результатов может включать в себя сохранение результатов в запоминающем устройстве, печать отчета о результатах и/или отображение результатов на мониторе. Например, системой моделирования может отображаться параллельное графическое сравнение выбранных заменителей КНБК и/или предпочтительных рабочих параметров. Результаты одной или нескольких вычисленных статических и динамических характеристик для заданных WOB, RPM, режима возбуждения, конечных отрезков и индексов вибрации могут отображаться на двумерных или трехмерных графиках. Аналогичным образом, результаты могут отображаться в виде результатов для одного заменителя КНБК, сравнения результатов для двух или более заменителей КНБК и/или сравнения результатов моделирования и измеренных данных во время фактических буровых работ. Хотя фиг. 2 иллюстрирует, что способ заканчивается на этапе 220, могут последовать дополнительные этапы, например

реализация буровых работ, включающая в себя информацию, изученную во время способов из фиг. 2.

Выгодно, что моделирование заменителей КНБК может улучшить буровые работы путем предоставления КНБК, более подходящей к окружению бурения. Например, если один из заменителей КНБК основывается на буровом оборудовании, используемом в некоторой области, то другие заменители можно смоделировать и непосредственно сравнить с ранее использованным заменителем КНБК. Т.е. один из заменителей КНБК может использоваться в качестве точки отсчета для сравнения тенденций вибрации у других заменителей КНБК. Таким образом, заменители КНБК можно сравнивать либо одновременно, либо когда моделируются дополнительные заменители, чтобы определить заменитель КНБК, который уменьшает влияние ограничителей, например вибраций. В тех случаях, когда система моделирования приспособлена для сравнения более двух разных заменителей КНБК, дополнительные предложенные заменители КНБК можно сравнить с каждым другим или с базовым заменителем. В некоторых реализациях сравнительный подход можно признать практичным. Вопрос по существу, на который нужно ответить инженеру-буровику, относится к тому, какая конфигурация компонентов КНБК работает с наименьшими вибрациями в условиях эксплуатации для конкретной буровой работы. Предпочтительный подход для ответа на этот проектный вопрос - смоделировать несколько альтернативных конфигураций, а затем выбрать одну, которая выполняется оптимальным образом в предполагаемом рабочем диапазоне, или задействовать выбранную конфигурацию с рабочими параметрами, предложенными настоящими способами. Такой подход может выполняться многократно или посредством прямого и одновременного сравнения нескольких конфигураций.

Типовые заменители КНБК.

Как описано выше, заменители КНБК являются представлениями фактических конфигураций КНБК, которые можно ввести в системы моделирования, чтобы симитировать работу или отклик представленной конфигурации КНБК в буровой работе. Соответственно, заменители КНБК в виде представлений фактического оборудования включают в себя одно или несколько допущений и/или упрощений, чтобы позволить смоделировать оборудование математически. Как и в случае с большинством математических представлений фактического оборудования представление можно создать различными способами, некоторые из которых могут отличаться, но совпадать в применении. Аналогичным образом, некоторые из разных методик построения заменителей могут привести к разным заменителям, которые практически подходят для разных применений.

Настоящие способы включают в себя использование любого подходящего заменителя, который может использоваться в модели частотной области буровых работ, чтобы имитировать бурение и ассоциированные вибрации. Типовые заменители включают в себя заменитель с сосредоточенными параметрами и заменитель с распределенной массой. В заменителе с сосредоточенными параметрами конфигурация КНБК представлена точечными массами, соединенными безмассовой балкой и демпфирующими элементами. В заменителе с распределенной массой конфигурация КНБК представлена балкой, имеющей распределенную массу. В зависимости от способа, которым создается заменитель КНБК, может меняться модель (модели) частотной области, используемые для моделирования работы заменителя, например выбор двумерной или трехмерной модели частотной области.

Как предлагалось выше, заменители КНБК могут создаваться различными способами, и модели частотной области могут меняться в пределах объема настоящего раскрытия изобретения. Посредством реализации настоящих способов можно определить, что один тип заменителя и/или один тип модели частотной области точнее представляет фактические буровые работы для конкретной конфигурации КНБК, для конкретных условий эксплуатации или для конкретных сред. Например, можно обнаружить, что двумерные заменители с сосредоточенными параметрами и ассоциированные результаты моделирования достаточно точно соответствуют измеренным данным для конкретной конфигурации КНБК или применения бурения. В качестве другого примера можно обнаружить, что трехмерные заменители с распределенной массой и ассоциированные результаты моделирования в частотной области точнее соответствуют измеренным данным для конкретного типа вибрации или для конкретного режима возбуждения.

Соответственно, способы в пределах объема настоящего раскрытия изобретения включают в себя способы, где разные заменители КНБК и разные модели частотной области используются для представления одной или нескольких конфигураций КНБК в одной буровой работе. Дополнительно или в качестве альтернативы математические сочетания разных заменителей и/или моделей частотной области могут использоваться для повышения точности результатов моделирования по сравнению с измеренными данными.

Типовые модели вибрации КНБК с сосредоточенными параметрами.

В качестве примера описывается одна типовая реализация модели вибрации КНБК. Однако следует отметить, что другие модели КНБК, например использующие один или несколько способов вычисления, рассмотренных выше, также могут использоваться для формирования сравнительной эксплуатационной характеристики вибрации аналогичным образом. При использовании в данном документе "модель вибрации КНБК" относится к использованию заменителя КНБК и ассоциированных принципов моделирования в частотной области, чтобы смоделировать или симитировать вибрации буровой работы с использованием конфигурации КНБК, представленной заменителем КНБК. Эти способы могут включать в себя,

но не ограничиваются, двумерные или трехмерные способы моделирования по методу конечных элементов. Например, вычисление результатов для одной или нескольких конфигураций КНБК может включать в себя формирование заменителя или математической модели для каждой конфигурации КНБК; вычисление результатов заменителя для заданных рабочих параметров и граничных условий; выявление смещений, угла наклона (первая пространственная производная смещения), изгибающего момента (вычисленного из второй пространственной производной смещения) и сдвигающей силы балки (вычисленной от третьей пространственной производной смещения) из результатов моделирования заменителя; и определение векторов и матриц состояний из определенных выходных данных моделирования заменителя. В более сложных моделях эти векторы состояния могут назначаться на определенные опорные узлы, например на нейтральной оси поперечного сечения КНБК, распределяться на поперечном сечении и по длине КНБК или в других удобных точках отсчета. По существу, данные отклика вектора состояния, вычисленные из результатов модели конечных элементов, затем могут использоваться для вычисления эксплуатационных характеристик вибрации, чтобы оценить конфигурации КНБК и сравнить с альтернативными конфигурациями КНБК, как описано в этом документе.

Модель вибрации КНБК, описанная в этом разделе, является моделью с сосредоточенными параметрами, которая является одним вариантом осуществления математической модели, реализованной в структуре векторов состояния и матриц передаточных функций. Вектор состояния представляет полное описание реакции системы КНБК в любом заданном положении в заменителе КНБК, которое обычно задается относительно местоположения долота. Матрица передаточных функций соотносит значение вектора состояния в одном местоположении со значением вектора состояния в некотором другом местоположении. Полное состояние системы включает в себя статическое решение плюс динамическое возмущение около статического состояния. Линейный характер модели для малых динамических возмущений облегчает статическую декомпозицию системы по сравнению с динамической. Динамическая модель, представленная в этом разделе, является одной разновидностью в классе моделей частотной характеристики вынужденных колебаний с характерными матрицами и граничными условиями, которые описаны ниже. Для моделей вибрации КНБК могут быть разработаны другие динамические модели, использующие альтернативные заменители КНБК и/или альтернативные рабочие параметры.

Матрицы передаточных функций могут умножаться для определения отклика на последовательности элементов в модели. Таким образом, одна передаточная функция может использоваться для описания динамической характеристики между любыми двумя точками. Модель с сосредоточенными параметрами дает приближение к отклику непрерывной системы. Отдельные точечные массы в заменителе КНБК соединяются с помощью безмассовых пружин и/или демпферов с другими массовыми элементами заменителя КНБК и, в одной разновидности, со стволом скважины в точках контакта с помощью пружин и, при желании, демпфирующих элементов. Массы свободно перемещаются в сторону в рамках ограничений приложенных нагрузок, включая силу тяжести.

Формулировка матрицы и вектора состояния.

Для поперечного движения модели с сосредоточенными параметрами в плоскости вектор состояния включает в себя поперечные и угловые отклонения, а также изгибающий момент балки и сдвигающую нагрузку. Вектор состояния и увеличивается на единичную постоянную, чтобы позволить матричным уравнениям включать в себя постоянный член в каждом представленном уравнении. Вектор состояния и тогда можно записать в виде уравнения (e1) следующим образом:

$$u = \begin{pmatrix} y \\ \theta \\ M \\ V \\ 1 \end{pmatrix} \quad (e1)$$

где y - поперечный изгиб балки от центральной линии компоновки, θ - угловое отклонение или первая пространственная производная смещения, M - изгибающий момент, который вычисляется из второй пространственной производной смещения, и V - сдвигающая нагрузка балки, которая вычисляется из третьей пространственной производной смещения. Для трехмерной модели вектор состояния, заданный уравнением (e1), может дополняться дополнительными состояниями, чтобы представить смещения и производные на ортогональной оси в каждом узле. Взаимодействия между движениями в каждом узле в общем случае могут включать в себя спаренные члены.

С учетом линейности суммарный отклик можно разложить на статический компонент u^s и динамический компонент u^d (например, $u = u^s + u^d$).

В способах с частотной характеристикой вынужденных колебаний допускается, что система колеблется с частотой ω входного усилия, которое является характеристикой линейных систем. Затем время и пространство разделяются в динамической характеристике и, используя наложение, общее смещение балки в любой осевой точке x для любого момента t может выражаться уравнением (e2)

$$u(x, t) = u^s(x) + u^d(x) \sin(\omega t) \quad (e2)$$

Векторы состояния u_i . (для индекса элемента i , меняющегося от 1 до N) могут использоваться для представления состояния каждого массового элемента, и вектор состояния u_0 используется для обозначения состояния в долоте. Матрицы передаточных функций используются для сопоставления вектора состояния u_1 одного массового элемента с состоянием u_{i-1} предшествующего массового элемента. Если в модели отсутствует демпфирование, то векторы состояния имеют вещественные значения. Однако можно ввести демпфирование, и тогда векторы состояния могут быть комплекснозначными, без потери общности.

Так как векторы состояния используются для представления масс, каждая масса может считаться имеющей ассоциированную пружину и/или демпфер, соединяющий ее с предшествующей массой в модели. С помощью нотации M_i обозначающей матрицу передачи массы, и матрицы передачи изгибаемого элемента балки, представленной B_i , объединенная передаточная функция T_i показана с помощью уравнения (e3) ниже

$$T_i = M_i B_i \quad (e3)$$

Числовые нижние индексы используются для указания каждой пары элементов массы-балки. Например, вектор состояния u_1 может вычисляться из состояния u_0 , представленного уравнением (e4)

$$u_1 = M_1 B_1 u_0 = T_1 u_0, \text{ и таким образом } u_i = T_i u_{i-1} \quad (e4)$$

Эти матрицы можно каскадировать, чтобы двигать КНБК в последовательные местоположения. Например, вектор состояния u_2 может быть представлен уравнением (e5)

$$u_2 = T_2 u_1 = T_2 T_1 u_0 \quad (e5)$$

Продолжая вплоть до точки контакта, вектор состояния u_N может быть представлен уравнением (e6)

$$u_N = T_N u_{N-1} = T_N T_{N-1} \dots T_1 u_0 \quad (e6)$$

Соответственно, в интервале между точками контакта состояние u_j в любом массовом элементе можно записать в виде любого состояния ниже того элемента u_j , используя каскадную матрицу S_{ij} , умноженную на подходящий вектор состояния, с помощью уравнения (e7)

$$u_j = S_{ij} u_i \text{ где для } i < j, S_{ij} = T_j T_{j-1} \dots T_{i+1} \quad (e7)$$

Обсуждение решения вектора состояния в точках контакта будет обсуждаться ниже.

Формулировка матриц массы.

Матрица передаточных функций массы для статической задачи выводится из равновесия сил, действующего на массовый элемент m . Как правило, каждый компонент КНБК подразделяется на небольшие элементы, и этот элемент с сосредоточенной массой подвергается усилиям сдвига балки, гравитационной нагрузке (предполагая угол наклона ϕ), контакту со стволом скважины с жесткостью k и демпфирующей силе с коэффициентом b . Общее равновесие сил для элемента может быть записано в виде уравнения (e8), используя нотации с "точкой" и "двойной точкой", чтобы представить первые и вторые производные по времени, или скорость и ускорение соответственно

$$m\ddot{y} = V_i - V_{i-1} - mg \sin \phi - ky - b\dot{y} = 0 \quad (e8)$$

Матрица передаточных функций для элемента с сосредоточенной массой под статической нагрузкой включает в себя поперечный компонент силы тяжести ($mg \sin \phi$) и либо контактное усилие пружины, либо, в качестве альтернативы, ограничение, примененное в процессе решения, и в этом случае значение k равно нулю. В статическом случае производные по времени равны нулю, и соответственно инерционные и демпфирующие силы отсутствуют. Матрица статической массы может быть записана в виде следующего уравнения (e9)

$$M_s = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ k & 0 & 0 & 1 & (mg \sin \phi) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (e9)$$

В поперечном динамическом сгибании силы, приложенные к массе, состоят из усилий сдвига балки, контакта со стволом скважины и демпфирующих нагрузок. Снова контакт со стволом скважины может быть либо результатом усилия пружины, либо примененным отношением ограничения. Однако, поскольку отыскивается динамическое возмущение около статического состояния (используя принцип линейного наложения), гравитационная сила отсутствует в матрице динамической массы.

В динамическом примере приложенные нагрузки могут быть несбалансированными, приводя к ускорению массового элемента. Масса, умноженная на поперечное ускорение, равна равновесию сил полезной сдвигающей нагрузки, пружинного контакта и демпфирующих сил, приводя к уравнению (e10)

$$m\ddot{y} = V_i - V_{i-1} - ky - b\dot{y} \quad (e10)$$

Предполагая комплексную частотную принудительную реакцию равной

$$y^d \sim e^{i\omega t}$$

где i представляет мнимое число, равное $\sqrt{-1}$, решение уравнения (e10) можно найти в уравнении (e11)

$$V_i = V_{i-1} + (k + ib\omega - m\omega^2) \quad (e11)$$

Матрица передаточных функций для элемента с сосредоточенной массой M_B для динамического возмущения в режиме поперечного изгиба затем записывается следующим уравнением (e12)

$$M_B = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ (k + ib\omega - m\omega^2) & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (e12)$$

Матрица массы в динамической вихревой модели содержит силу постоянной величины, которая имеет сходство с гравитационной силой в матрице статической массы. Предполагается, что каждый воротник бура обладает слегка несбалансированной массой, формирующей центробежную силу, пропорциональную этой несбалансированной массе, умноженной на квадрат вращательной частоты. Для небольшого значения ε , которое представляет безразмерное внеосевое расстояние несбалансированной массы, уравнение движения для принудительной реакции имеет вид уравнения (e13)

$$m\ddot{y} = V_i - V_{i-1} + \varepsilon m\omega^2 - ky - b\dot{y} \quad (e13)$$

Радиальное смещение не изменяется со временем для этого упрощенного примера режима завихрения, и соответственно ускорение и скорость можно установить в ноль. Это представляет установившееся вращательное движение наподобие вращающейся гравитационной нагрузки, в отличие от режима поперечного изгиба, в котором смещение колеблется через нулевое значение. Результирующая матрица завихрения представлена в уравнении (e14)

$$M_w = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ k & 0 & 0 & 1 & (\varepsilon m\omega^2) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (e14)$$

Значение ε может принимать либо положительные, либо отрицательные знаки, чтобы представить форму моделируемого вихревого отклика. Первый режим завихрения обычно представляется с помощью чередующихся знаков на последовательных интервалах компонентов КНБК, как они проходят в буровой скважине.

Масса с сосредоточенным параметром m задается в качестве массы части элемента у соответствующего компонента КНБК. К тому же масса воротника бура, трубы или другого компонента КНБК фактически увеличивается из-за бурового раствора, содержащегося в муфте, и который увлекается за собой элементом КНБК, когда он вибрирует. Методика "добавленной массы" может использоваться для приблизительной оценки этого явления. Для этой цели грубое приближение состоит в увеличении динамической массы муфты на 10%, приводя к небольшому уменьшению собственной частоты. Это является лишь показательным значением, и калибровка результатов модели с помощью эксплуатационных данных может указать альтернативные значения для эффекта "добавленной массы", которые могут использоваться в модели. Отметим, что неуместно применять добавленную массу в статическом решении. Как отмечалось выше, в зависимости от способа решения, пружинная постоянная может пропускаться, если решение состоит в применении отношения ограничения, так что модели КНБК не разрешается выходить за ствол скважины больше чем на очень небольшую величину.

Если модель с ограничением не используется, то контактную жесткость k следует явно включить в вышеприведенные соотношения. В этом примере фактор, который нужно учитывать в выборе контактной жесткости ствола скважины k при моделировании динамического возбуждения, состоит в том, что значение k следует выбирать достаточно высоким для массы m , чтобы собственная частота $\sqrt{k/m}$ была выше максимальной частоты возбуждения ω , которую нужно оценить, чтобы избежать резонанса из-за этого представления контакта. Таким образом, для режима возбуждения с n -кратной скоростью вращения контактная жесткость k может быть выше, чем $m(n\omega)^2$ (например, $k > m(n\omega)^2$).

В качестве альтернативы и в предпочтительном варианте осуществления соответствием в точках контакта между КНБК и стволом скважины можно пренебречь, и постоянное отношение ограничения применяется в способе решения при $k=0$ в матрицах выше. Этот подход дополнительно описывается ниже.

Формулировка матрицы жесткости.

Уравнение изгиба балки Эйлера-Бернулли для балки постоянного сечения с постоянным модулем Юнга E , изгибающим моментом инерции I и осевой нагрузкой P можно записать в виде уравнения част-

ного дифференциала четвертого порядка (e15)

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - P \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad (e15)$$

Характеристическое уравнение для общего решения представлено уравнением (e16)

$$y = e^{\beta x} \quad (e16)$$

Это уравнение выражает поперечное смещение в виде степени экспоненты с параметром β , умноженным на расстояние x от опорной точки, в котором член β нужно найти путем подстановки этого решения в уравнение (e15) и решения уравнений (e17) и (e18) ниже

$$\beta^2 (\beta^2 - \frac{P}{EI}) = 0 \quad (e17)$$

$$\beta = 0, \pm \sqrt{\frac{P}{EI}} \quad (e18)$$

Отметим, что β либо вещественный (растянутая балка), мнимый (сжатая балка), либо равен 0 (отсутствует осевая нагрузка). Подходящим конкретным решением является постоянная плюс линейный член в x . Таким образом, смещение нагруженной по оси балки может быть представлено уравнением (e19)

$$y = a + bx + ce^{\beta x} + de^{-\beta x} \quad (e19)$$

где постоянные a , b , c и d находятся при выполнении граничных условий.

Оставшиеся составляющие вектора состояния определяются следующими уравнениями в пространственных производных поперечного смещения с осевой координатой x (e20)

$$\theta = \frac{\partial y}{\partial x} \quad M = EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad V = -EI \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \quad (e20)$$

Результирующая матрица передаточных функций жесткости при изгибе балки B может быть представлена следующим уравнением (e21)

$$B = \begin{pmatrix} 1 & L & \left(\frac{-2 + e^{\beta L} + e^{-\beta L}}{2P} \right) & \left(\frac{2\beta L - e^{\beta L} + e^{-\beta L}}{2P\beta} \right) & 0 \\ 0 & 1 & \left(\frac{e^{\beta L} - e^{-\beta L}}{2\beta EI} \right) & \left(\frac{2 - e^{\beta L} - e^{-\beta L}}{2P} \right) & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{e^{\beta L} + e^{-\beta L}}{2} \right) & \left(\frac{-e^{\beta L} + e^{-\beta L}}{2\beta} \right) & 0 \\ 0 & 0 & \left(\frac{-\beta e^{\beta L} + \beta e^{-\beta L}}{2} \right) & \left(\frac{e^{\beta L} + e^{-\beta L}}{2} \right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (e21)$$

Граничные условия и возбуждение системы.

С помощью заданных передаточных функций массового элемента и элемента балки граничные условия и возбуждение системы определяются для формирования предсказаний по модели частотной области. Отдельные граничные условия используются для моделирования статического изгиба, динамического поперечного изгиба и проблем эксцентрического завихрения.

В каждом из этих примеров моделей вибрации КНБК с сосредоточенным параметром решение движется от долота к первому стабилизатору или другой точке контакта, затем от первого стабилизатора ко второму стабилизатору или другой точке контакта, и так далее, переходя вверх по стволу скважины на один интервал решения за раз (например, от долота в качестве начального интервала). В конечном счете решается интервал от точки контакта до конечной точки. Как предлагалось, точки контакта часто обеспечиваются стабилизаторами, но могут предоставляться другими компонентами КНБК, например подвижным буровым расширителем, или возможно даже с помощью контакта одного или нескольких компонентов КНБК в промежуточных точках между определенными точками контакта, например бурильные трубы, лежащие на стенке между стабилизаторами. Для удобства и краткости в этом документе типовой стабилизатор будет использоваться для ссылки на многообразие компонентов КНБК, которые могут обеспечить точку контакта. Конечная точка является верхним узлом в модели КНБК, и она может меняться для учета разных возможных узловых точек в "конечном отрезке". В статической модели предполагается подходящее поперечное смещение для этой конечной точки, на основе величины зазора между трубой и стволом скважины.

В этих способах состояния в каждом интервале решения определяются тремя условиями в нижнем элементе (долото или нижний стабилизатор в интервале) и одним условием в верхнем элементе (конечная точка или верхний стабилизатор в интервале). С помощью этих четырех условий и результирующей матричной передаточной функции от нижнего к верхнему элементу можно вычислить оставшиеся неиз-

вестные состояния в нижнем элементе.

Начиная с долота, смещение первого стабилизатора используется для определения состояния долота, и соответственно все состояния вплоть до первого стабилизатора определяются с использованием подходящих матриц передаточных функций. По условию непрерывности смещение, наклон и момент теперь определяются в точке контакта первого стабилизатора. Сдвигающая нагрузка балки является неопределенной, так как это состояние не имеет ограничения непрерывности, потому что имеется неизвестное боковое усилие, действующее между стабилизатором и стволом скважины. Смещение следующего стабилизатора используется для предоставления четвертого условия, необходимого для получения решения на следующем интервале, и соответственно определяется полное состояние в стабилизаторе. Контактное усилие между стабилизатором и стволом скважины может вычисляться как разность между этим значением состояния и предшествующим вычислением сдвигающей нагрузки из предыдущей секции КНБК. Использование каскадного матричного представления в уравнении (e22)

$$\begin{pmatrix} y_j \\ \theta_j \\ M_j \\ V_j \\ 1 \end{pmatrix} = S_y \begin{pmatrix} y_i \\ \theta_i \\ M_i \\ V_i \\ 1 \end{pmatrix} \text{ с условиями } \begin{pmatrix} V_i \cdot \text{неизвестное} \\ y_j = 0 \end{pmatrix} \quad (e22)$$

Тогда неизвестная сдвигающая нагрузка на нижнем стабилизаторе вычисляется с использованием уравнения (e23), чтобы получить нулевое смещение в верхнем положении

$$0 = S_{11}y_i + S_{12}\theta_i + S_{13}M_i + S_{14}V_i + S_{15} \quad (e23)$$

Сдвигающая нагрузка балки прерывается в точках контакта, и боковое усилие в таком узле можно вычислить в виде разности между значением, полученным путем распространения состояний снизу, V_i^- , и значением, вычисленным для выполнения отношения ограничения для следующего сегмента, V_i^+ . Поэтому контактное боковое усилие можно представить уравнением (e24)

$$F_i = V_i^+ - V_i^- \quad (e24)$$

Для статического примера наклон и боковое усилие на долоте неизвестны. Пробный угол наклона долота используется для формирования отклика, и векторы состояния распространяются вверх по стволу скважины от одной точки контакта к следующей, в конечном счете достигая конечной точки. Окончательные значения для угла наклона долота и бокового усилия определяются путем итерирования, пока не достигнуто подходящее конечное условие наверху модели, например условие соприкосновения между трубой и буровой скважиной. В качестве альтернативы решение может начинаться в верхней точке касания и продолжаться вниз по скважине к долоту, повторяясь до сближения с износом долота путем изменения расстояния до точки соприкосновения. Также можно выбрать другие методы последовательных приближений.

Дополнительно или в качестве альтернативы конфигурация стабилизатора или конфигурация другого элемента в заменителе КНБК может предлагать дополнительное ограничение. Например, для полноразмерных стабилизаторов может быть уместно дополнительно ограничить модель вибрации КНБК до нулевого угла наклона. Такое ограничение может быть уместным из-за взаимодействий между полноразмерными стабилизаторами и стволом скважины. Модель вибрации КНБК, включающая это дополнительное ограничение, приведет к увеличению противодействующих боковых усилий в модели, и возникнет прерывность в изгибающем моменте, чтобы представить реактивный крутящий момент из-за постоянного ограничения угла наклона. Более того, уравнение (e22) выше будет изменено с дополнительным ограничением в виде уравнения (e22') для узла j, где применяется ограничение наклона

$$\begin{pmatrix} y_j \\ \theta_j \\ M_j \\ V_j \\ 1 \end{pmatrix} = S_y \begin{pmatrix} y_i \\ \theta_i \\ M_i \\ V_i \\ 1 \end{pmatrix} \text{ с условиями } \begin{pmatrix} y_j = 0 \\ \theta_j = 0 \\ M_j \text{ неизвестное} \\ V_i \text{ неизвестное} \end{pmatrix} \quad (e22')$$

Для динамических моделей (изгибание, завихрение и кручение) применяется справочное боковое усилие возбуждения долота, например, $V_{bit} = \text{const}$. Первый стабилизатор предполагается ограниченным по фиксированному условию (e22) или встроенному условию (e22'). Если применяется (e22), задаются еще два условия, чтобы однозначно решить уравнения от долота вплоть до первого стабилизатора. Одной альтернативой для граничных условий является допущение, что для небольшого поперечного движения наклон и момент на долоте равны нулю. Этот набор граничных условий можно записать, как показано в уравнении (e25)

$$y_{bit} = \theta_{bit} = M_{bit} = 0 \quad V_{bit} = \text{const} \quad (e25)$$

Дополнительный набор граничных условий можно рассмотреть, допуская, что угол наклона на пер-

вом стабилизаторе равен нулю, как в (e22'), эквивалентно консольному условию. Одной альтернативой для оставшегося ограничения является допущение, что на долоте отсутствует момент. Этот дополнительный набор граничных условий можно записать, как показано в уравнении (e26)

$$y_{stab} = \theta_{stab} = M_{bit} = 0 \quad V_{bit} = const \quad (e26)$$

Как хорошо изучено, долото может возбуждаться различными способами, приводящими к динамическим вибрациям. Возбуждение долота посредством приложенного бокового усилия, описанное выше, является одним распространенным способом. Настоящие способы с тем же успехом могут быть приспособлены для предоставления моделей вибрации КНБК для других форм возбуждения долота. В качестве одной типовой модификации для обеспечения или рассмотрения альтернативной формы возбуждения долота, долото может возбуждаться посредством приложенного момента к долоту, который может возникать при буровых работах, когда долото проходит слоистое месторождение. Модель вибрации КНБК может запускаться с использованием приложенной частоты возбуждения для приложенного момента к долоту с любым кратным числом скорости вращения. В некоторых реализациях может быть предпочтительно прогонять модель несколько раз, используя различные кратные числа скорости вращения и учитывая средние числа, максимумы и/или статистические/измеренные данные, чтобы предоставить более надежную и/или точную модель. Например, хотя однократная (1X) скорость вращения может быть наиболее вероятной частотой возбуждения, модель может прогоняться с использованием различных кратных чисел, включая нецелые кратные числа, например 1,5, 1,75 и т.д. Дополнительно и в качестве альтернативы фиксированная частота возбуждения может применяться к долоту для представления некоторых источников возбуждения, которые постоянны по частоте и не кратны скорости вращения. Одним примером является давление бурового раствора, которое имеет импульсы давления в соответствии с частотой ходов грязевого насоса. Эти импульсы могут вызвать поперечное движение в долоте из-за изменяющегося во времени падения давления через сопла долота.

Когда возбуждение моделируется в качестве приложенного момента к долоту, уравнения (e25) и (e26) выше будут изменены для соответствия измененному режиму возбуждения. Для граничных условий, определенных выше по отношению к уравнениям (e25) и (e26), граничные условия для приложенного момента к долоту можно записать в виде уравнений (e25') и (e26')

$$y_{stab} = y_{bit} = V_{bit} = 0 \quad M_{bit} = const \quad (e25')$$

$$y_{stab} = \theta_{stab} = V_{bit} = 0 \quad M_{bit} = const \quad (e26')$$

Независимо от формы приложенного возбуждения, которая может включать в себя одно или несколько описанных выше и/или других распространенных возбуждений, решение двигается вверх по стволу скважины по одному стабилизатору за раз. Решение, или скорее реализация модели, прекращается на последнем узле заменителя КНБК, который выбирается произвольно, но может располагаться на разных "конечных отрезках" в динамическом случае. Путем выбора разных конечных отрезков и среднеквадратичного усреднения результатов можно сформировать эксплуатационные характеристики вибрации, которые являются надежными. Чтобы предотвратить сильный резонанс в отдельной узловой точке, с тем же успехом можно исследовать максимальный результат, и наоборот, минимальное значение можно исследовать для оценки возможных предпочтительных рабочих областей. Эти методики среднеквадратичного усреднения и исследования максимума могут быть предпочтительны при определении эксплуатационной характеристики вибрации, которая чувствительна к выбору местоположения узловой точки. Например, индекс кривизны конечной точки и другие точечные индексы могут быть более чувствительны к местоположениям узловой точки, нежели интервальные индексы, описанные в этом документе. Являясь менее чувствительными к конечному местоположению и условию, интервальные индексы могут быть предпочтительны в некоторых реализациях. Дополнительно следует заметить, как указано выше, что контакт КНБК с буровой скважиной в местоположениях между стабилизаторами при желании может рассматриваться как узловая точка в этом способе анализа, и распространение решения изменяется соответственно.

Типовые модели вибрации КНБК с распределенной массой.

Как представлялось выше, компоновки низа буровой колонны могут быть представлены заместителями в ряде способов построения. Типовая модель, описанная выше, подробно рассматривала модель вибрации КНБК с сосредоточенным параметром. В качестве иллюстрации других заместителей КНБК и ассоциированных моделей частотной области, которые могут использоваться в моделях вибрации КНБК в рамках объема настоящего раскрытия изобретения, сейчас будет описываться типовая модель вибрации КНБК с распределенной массой со ссылкой на обсуждения выше.

Как и в случае с обсуждением выше, вектор состояния системы для модели вибрации КНБК с распределенной массой записывается в виде уравнения (e27)

$$u = \begin{pmatrix} y \\ \theta \\ M \\ V \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{поперечный изгиб} \\ \text{угловое отклонение} \\ \text{изгибающий момент} \\ \text{сдвигающая нагрузка} \\ \text{единичная постоянная} \end{pmatrix} \quad (e27)$$

По условию линейности суммарный отклик можно разложить на статическую и динамическую составляющие. В способе с частотной характеристикой вынужденных колебаний предполагается, что система колеблется с частотой входного усилия; это характеристика линейных систем. Затем время и пространство разделяются в динамической характеристике, и используя наложение, можно записать вектор состояния в зависимости от времени и пространства в виде уравнения (e28)

$$u(x, t) = u^s(x) + u^d(x) \sin(\omega t) \quad (e28)$$

Хотя многие принципы из вышеприведенного обсуждения сосредоточенного параметра относятся к этому примеру с распределенной массой, несколько факторов и отношений, описанных выше, зависят от массы КНБК, которая представлена в заменителях. Поскольку заменитель КНБК с распределенной массой не упрощает конфигурацию КНБК как точечная масса и пружины и/или демпферы, некоторые из описанных выше отношений приспособлены для соответствия конструкции заменителя КНБК, как будет видно ниже. Отношения для описания прогибов балки зависят от свойств балки (E и I) и распределенного веса на единичную длину, W . Осевая нагрузка, P , также является фактором, который переносится непосредственно из модели с сосредоточенным параметром в модель с распределенной массой. Как и в случае с вышеприведенным примером, настоящий пример будет рассматривать как статический случай, так и динамический случай (или динамические возмущения около статического решения).

Решение статического случая.

Рассматривая сначала влияние распределенной массы на статическое решение, описанное выше для модели с сосредоточенным параметром, основная разность между моделью с сосредоточенным параметром и моделью с распределенной массой находится в матрицах передачи, используемых в моделях. В вышеприведенном обсуждении заменитель КНБК был представлен как матрице передачи массы, так и матрице передачи изгибаемого элемента балки (см. уравнение (e3)). Однако в моделях с распределенной массой масса распределяется по длине балки, и два элемента (масса и изгиб балки) могут рассматриваться вместе в одной передаточной функции, как видно ниже. Более того, важный эффект массы является составляющей силы тяжести, ортогональной к оси ствола скважины. Соответственно, необходимо отрегулировать вес материала на единичную длину на синус угла наклона, φ . Поэтому, используя член $W = (-\rho Ag)$ для плотности ρ , площади поперечного сечения A и гравитационной постоянной g , уравнение (e15) выше изменяется в виде уравнения (e29)

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} - P \frac{d^2 y}{dx^2} - W \sin(\varphi) = 0 \quad (e29)$$

Допуская экспоненциальное решение для однородного уравнения вида $e^{\beta x}$ (см. уравнение (e16) выше), приходим к характеристическому уравнению с решением для β вида, показанного выше в качестве уравнения (e18) и повторяемого здесь для удобства в виде уравнения (e30)

$$\beta = 0, \pm \sqrt{\frac{P}{EI}} \quad (e30)$$

Член β является либо вещественным (растянутая балка), мнимым (сжатая балка), либо нулем (отсутствует осевая нагрузка). Конкретное решение состоит в суммировании линейных и квадратичных членов в x плюс постоянная, и однородное решение включает в себя экспоненциальные функции с обоими возможными значениями для β . Таким образом, смещение нагруженной по оси балки может быть представлено уравнением (e31)

$$y = ax^2 + bx + c + de^{\beta x} + fe^{-\beta x} \quad (e31)$$

Как и раньше, производные можно определить относительно переменных состояния системы

$$\theta = \frac{\partial y}{\partial x} \quad M = EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad V = -EI \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \quad (e32)$$

Матрица, которая сопоставляет вектор состояния в $x=0$ с состоянием в $x=L$ для поперечного изгиба балки с распределенной массой при осевой нагрузке, записывается тогда в виде уравнения (e33). Здесь мы обозначим матрицу как T , чтобы распознать матрицу распределенной массы с объединенной массой и матрицу жесткости, как показано в (e3). Последующие матричные операции для получения решения затем идут, как описано выше, с простым изменением в вычислениях матрицы, чтобы отразить замени- тели с моделью распределенной массы

$$T_s = \begin{pmatrix} 1 & L & \left(\frac{-2 + e^{\beta L} + e^{-\beta L}}{2P} \right) & \left(\frac{2\beta L - e^{\beta L} + e^{-\beta L}}{2P\beta} \right) & \left(\frac{-(\beta L)^2 - 2 + e^{\beta L} + e^{-\beta L}}{2P\beta^2} \right) \cdot W \sin(\varphi) \\ 0 & 1 & \left(\frac{e^{\beta L} - e^{-\beta L}}{2\beta EI} \right) & \left(\frac{2 - e^{\beta L} - e^{-\beta L}}{2P} \right) & \left(\frac{-2\beta L + e^{\beta L} - e^{-\beta L}}{2P\beta} \right) \cdot W \sin(\varphi) \\ 0 & 0 & \left(\frac{e^{\beta L} + e^{-\beta L}}{2} \right) & \left(\frac{-e^{\beta L} + e^{-\beta L}}{2\beta} \right) & \left(\frac{-2 + e^{\beta L} + e^{-\beta L}}{2\beta^2} \right) \cdot W \sin(\varphi) \\ 0 & 0 & \left(\frac{-\beta e^{\beta L} + \beta e^{-\beta L}}{2} \right) & \left(\frac{e^{\beta L} + e^{-\beta L}}{2} \right) & \left(\frac{-e^{\beta L} + e^{-\beta L}}{2\beta} \right) \cdot W \sin(\varphi) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (e33)$$

Для сжатой балки P отрицательное, β мнимое, и мы получаем уравнения (e34)

$$\beta = i\lambda \quad \lambda = \pm \sqrt{\frac{-P}{EI}} \quad \lambda^2 = \frac{-P}{EI} \quad (e34)$$

$$e^{i\lambda L} + e^{-i\lambda L} = 2\cos(\lambda L) \quad e^{i\lambda L} - e^{-i\lambda L} = 2i\sin(\lambda L)$$

и матричное уравнение балки сокращается до уравнения (e35)

$$T_{s,COMP} = \begin{pmatrix} 1 & L & \left(\frac{\cos(\lambda L) - 1}{P} \right) & \left(\frac{\lambda L - \sin(\lambda L)}{P\lambda} \right) & \left(\frac{1 - \cos(\lambda L) - \frac{L^2}{2}}{\lambda^2} \right) \cdot \frac{W \sin(\varphi)}{P} \\ 0 & 1 & \left(\frac{\sin(\lambda L)}{\lambda EI} \right) & \left(\frac{1 - \cos(\lambda L)}{P} \right) & \left(\frac{\sin(\lambda L) - \lambda L}{\lambda} \right) \cdot \frac{W \sin(\varphi)}{P} \\ 0 & 0 & \cos(\lambda L) & \left(\frac{-\sin(\lambda L)}{\lambda} \right) & EI \cdot (\cos(\lambda L) - 1) \cdot \frac{W \sin(\varphi)}{P} \\ 0 & 0 & \lambda \sin(\lambda L) & \cos(\lambda L) & \lambda \cdot EI \cdot \sin(\lambda L) \cdot \frac{W \sin(\varphi)}{P} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (e35)$$

Для растянутой балки β является вещественнозначным, и мы получаем уравнения (e36)

$$e^{\beta L} + e^{-\beta L} = 2\cosh(\beta L) \quad e^{\beta L} - e^{-\beta L} = 2\sinh(\beta L) \quad (e36)$$

и матричное уравнение балки сокращается до уравнения (e37)

$$T_{s,TENS} = \begin{pmatrix} 1 & L & \left(\frac{\cosh(\beta L) - 1}{P} \right) & \left(\frac{\beta L - \sinh(\beta L)}{P\beta} \right) & \left(\frac{\cosh(\beta L) - 1 - \frac{L^2}{2}}{\beta^2} \right) \cdot \frac{W \sin(\varphi)}{P} \\ 0 & 1 & \left(\frac{\sinh(\beta L)}{\beta EI} \right) & \left(\frac{1 - \cosh(\beta L)}{P} \right) & \left(\frac{\sinh(\beta L) - \beta L}{\beta} \right) \cdot \frac{W \sin(\varphi)}{P} \\ 0 & 0 & \cosh(\beta L) & \left(\frac{-\sinh(\beta L)}{\beta} \right) & EI \cdot (\cosh(\beta L) - 1) \cdot \frac{W \sin(\varphi)}{P} \\ 0 & 0 & -\beta \sinh(\beta L) & \cosh(\beta L) & (-\beta) \cdot EI \cdot \sinh(\beta L) \cdot \frac{W \sin(\varphi)}{P} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (e37)$$

Для балки без осевой нагрузки дифференциальное уравнение упрощается, потому что выпадает член, содержащий P . Решение является многочленом четвертого порядка, и соответствующим результатом матрицы является следующее уравнение (e38)

$$T_{s,ZERO} = \begin{pmatrix} 1 & L & \frac{L^2}{2EI} & (-1) \cdot \frac{L^3}{6EI} & \frac{W \sin(\varphi) \cdot L^4}{24EI} \\ 0 & 1 & \frac{L}{EI} & (-1) \cdot \frac{L^2}{2EI} & \frac{W \sin(\varphi) \cdot L^3}{6EI} \\ 0 & 0 & 1 & (-L) & \frac{W \sin(\varphi) \cdot L^2}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & (-L) \cdot W \sin(\varphi) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (e38)$$

Определив матрицы балок для разных условий, при которых заменитель КНБК можно разместить во время моделирования, матрицы могут использоваться для вычисления статических решений с использованием способов, аналогичных описанным выше.

Решение для динамического сгибания.

Обращаясь теперь к рассмотрению динамического возмущения около статического решения, путем разделения переменных полное смещение является произведением функции пространства и функции времени, как видно в уравнении (e39)

$$u^d(x, t) = y(x)\tau(t) \quad (e39)$$

Компоненты полного смещения, которые являются функцией времени, дополнительно могут описываться уравнениями (e40)

$$\frac{d^2 \tau_1}{dt^2} = -\omega_n^2 \tau \quad \tau(t) = A \cos(\omega_n t) + B \sin(\omega_n t) \quad (e40)$$

Со ссылкой на вышеприведенные обсуждения в качестве основы уравнение динамики для интервала с постоянной осевой нагрузкой P , весом на единичную длину W и гравитационной постоянной g можно записать в виде уравнения (e41)

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} - P \frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{W}{g} \omega_n^2 y = 0 \quad (e41)$$

Записывая y в виде экспоненциальной функции x , характеристический многочлен является уравнением (e42)

$$r^4 - \frac{P}{EI} r^2 - \frac{W \omega_n^2}{g \cdot EI} = 0 \quad (e42)$$

Это уравнение четвертого порядка имеет два решения, κ и λ , показанные в уравнениях (e43)

$$\kappa^2 = \left[\frac{P^2}{4(EI)^2} + \frac{W \omega_n^2}{g \cdot EI} \right]^{1/2} + \frac{P}{2EI} \quad (e43)$$

$$\lambda^2 = \left[\frac{P^2}{4(EI)^2} + \frac{W \omega_n^2}{g \cdot EI} \right]^{1/2} - \frac{P}{2EI}$$

Решение уравнения может задаваться в общем виде как уравнение (e44)

$$y(x) = c_1 \cosh(\kappa x) + c_2 \sinh(\kappa x) + c_3 \cos(\lambda x) + c_4 \sin(\lambda x) \quad (e44)$$

В элементе положение $x=0$ может выбираться на одной поверхности, а противоположная поверхность тогда находится в $x=L$. В начале координат косинусные функции имеют единичное значение, а синусные функции равны нулю, что может быть представлено в виде нормализованного вектора состояния в уравнении (e45)

$$\begin{pmatrix} y_0 \\ \theta_0 \\ M_0 \\ V_0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \kappa & 0 & \lambda \\ \kappa^2 EI & 0 & (-\lambda^2) EI & 0 \\ 0 & (-\kappa^3) EI & 0 & \lambda^3 EI \end{bmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{pmatrix} \quad (e45)$$

Эта матрица является обратимой, поэтому коэффициенты можно найти в виде вектора состояния на одной поверхности элемента, как показано в уравнении (e46)

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \end{pmatrix} = \left(\frac{1}{\lambda^2 + \kappa^2} \right) \begin{bmatrix} \lambda^2 & 0 & \frac{1}{EI} & 0 \\ 0 & \lambda^2 & 0 & \left(\frac{-1}{\kappa \cdot EI} \right) \\ \kappa^2 & 0 & \left(\frac{-1}{EI} \right) & 0 \\ 0 & \frac{\kappa^2}{\lambda} & 0 & \frac{1}{\lambda EI} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ \theta_0 \\ M_0 \\ V_0 \end{pmatrix} \quad (e46)$$

Вектор состояния в местоположении $x=L$ теперь можно определить с использованием уравнения (e47)

$$\begin{pmatrix} y_L \\ \theta_L \\ M_L \\ V_L \end{pmatrix} = \left(\frac{1}{\lambda^2 + \kappa^2} \right) \begin{bmatrix} \cosh(\kappa L) & \sinh(\kappa L) & \cos(\lambda L) & \sin(\lambda L) \\ \kappa \sinh(\kappa L) & \kappa \cosh(\kappa L) & -\lambda \sin(\lambda L) & \lambda \cos(\lambda L) \\ \kappa^2 EI \cdot \cosh(\kappa L) & \kappa^2 EI \cdot \sinh(\kappa L) & -\lambda^2 EI \cdot \cos(\lambda L) & -\lambda^2 EI \cdot \sin(\lambda L) \\ -\kappa^3 EI \cdot \sinh(\kappa L) & -\kappa^3 EI \cdot \cosh(\kappa L) & -\lambda^3 EI \cdot \sin(\lambda L) & \lambda^3 EI \cdot \cos(\lambda L) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda^2 & 0 & \frac{1}{EI} & 0 \\ 0 & \lambda^2 & 0 & \left(\frac{-1}{\kappa \cdot EI} \right) \\ \kappa^2 & 0 & \left(\frac{-1}{EI} \right) & 0 \\ 0 & \frac{\kappa^2}{\lambda} & 0 & \frac{1}{\lambda EI} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ \theta_0 \\ M_0 \\ V_0 \end{pmatrix} \quad (e47)$$

Матрицы могут умножаться для получения уравнений (e48), для которых компоненты матрицы передаточных функций Т записываются отдельно

$$\begin{pmatrix} y_L \\ \theta_L \\ M_L \\ V_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \lambda^2 + \kappa^2 \end{pmatrix} \cdot T \cdot \begin{pmatrix} y_0 \\ \theta_0 \\ M_0 \\ V_0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} T_{11} &= \lambda^2 \cosh(\kappa L) + \kappa^2 \cos(\lambda L) & T_{21} &= \kappa \lambda \cdot (\lambda \sinh(\kappa L) - \kappa \sin(\lambda L)) \\ T_{12} &= \frac{\lambda^2}{\kappa} \sinh(\kappa L) + \frac{\kappa^2}{\lambda} \sin(\lambda L) & T_{22} &= \lambda^2 \cosh(\kappa L) + \kappa^2 \cos(\lambda L) \\ T_{13} &= \frac{1}{EI} (\cosh(\kappa L) - \cos(\lambda L)) & T_{23} &= \frac{1}{EI} (\kappa \sinh(\kappa L) + \lambda \sin(\lambda L)) \\ T_{14} &= \frac{1}{EI} \left(\frac{\sin(\lambda L)}{\lambda} - \frac{\sinh(\kappa L)}{\kappa} \right) & T_{24} &= \frac{1}{EI} (\cos(\lambda L) - \cosh(\kappa L)) \\ T_{31} &= \lambda^2 \kappa^2 EI (\cosh(\kappa L) - \cos(\lambda L)) & T_{41} &= (-\lambda^2 \kappa^2 EI (\kappa \sinh(\kappa L) + \lambda \sin(\lambda L))) \\ T_{32} &= \lambda \kappa \cdot EI (\lambda \sinh(\kappa L) - \kappa \sin(\lambda L)) & T_{42} &= \lambda^2 \kappa^2 EI (\cos(\lambda L) - \cosh(\kappa L)) \\ T_{33} &= \kappa^2 \cosh(\kappa L) + \lambda^2 \cos(\lambda L) & T_{43} &= \lambda^3 \sin(\lambda L) - \kappa^3 \sinh(\kappa L) \\ T_{34} &= (-\kappa \sinh(\kappa L) - \lambda \sin(\lambda L)) & T_{44} &= \kappa^2 \cosh(\kappa L) + \lambda^2 \cos(\lambda L) \end{aligned}$$

(e48)

При отсутствии контакта в элементе, когда все состояния известны в первом местоположении ($x=0$), можно вычислить состояния во втором местоположении ($x=L$). Так же, как и в вышеприведенном решении для модели с сосредоточенным параметром, промежуточные состояния и матрицы могут объединяться, чтобы вычисление содержало матричное соотношение от одной точки контакта к следующей. Однако сдвигающая нагрузка V_0 не известна, потому что будет динамическое боковое усилие в первой точке контакта для соответствия ограничению во втором контакте, а именно, что смещение равно нулю для динамического возмущения. Четыре известные величины тогда облегчают вычисление неизвестных таким же образом, как для модели с сосредоточенным параметром.

Дополнительно и в качестве альтернативы, следует отметить, что переменные M и V могут быть нормализованы в новые переменные μ и v соответственно, путем деления масштабного коэффициента EI_0 , который является характеристикой КНБК. Члены в уравнениях выше и соответствующие статические и динамические вычисления затем можно скорректировать на масштабный коэффициент для нового вектора состояния в масштабированных переменных $(y \ \theta \ \mu \ v \ 1)^T$. В остальном способы решения для уравнений сплошных масс такие же, как для модели с сосредоточенным параметром.

Трехмерные модели частотной области.

Модели и способы, описанные выше, по существу, являются двумерными, рассматривающими поперечную динамическую изгибную вибрацию в плоскости для "гибкого" режима и действия центробежной силы в режиме "кручения". Путем расширения этих способов для включения обеих поперечных координат и путем сохранения подхода в частотной области можно разработать улучшенные модели, чтобы предоставить трехмерное представление для более точного представления этих изгибных и центробежных вибраций. Эти переработанные и улучшенные модели учитывали бы динамические эффекты кинетического момента и его влияние на вибрации КНБК, включая гравитационные эффекты. Нижеследующее обсуждение предоставляет пример расширения вышеприведенных способов в трехмерную модель частотной области. Идеи нижеследующих примеров можно приспособить различными способами в зависимости от рассматриваемой конфигурации компоновки низа буровой колонны. Дополнительно или в качестве альтернативы некоторые допущения или соглашения, используемые в типовых способах ниже, могут корректироваться с помощью альтернативных допущений и/или соглашений без отклонения от объема настоящего раскрытия изобретения и формулы изобретения.

Фиг. 3А-Д предоставляют схематичный чертеж традиционной компоновки 300 низа буровой колонны с буровыми трубами и стабилизаторами 312. Фиг. 3А иллюстрирует вид в перспективе компоновки 300 низа буровой колонны, как она может изгибаться во время вращения; фиг. 3b иллюстрирует вид сверху в скважину в поперечном сечении компоновки 300 низа буровой колонны. Как проиллюстрировано на фиг. 3, ось x ориентирована вверх по стволу скважины, ось z находится в вертикальной плоскости, ортогональной к x , а ось y образует третье ортогональное направление в правовинтовой системе. Короткая секция этой компоновки низа буровой колонны вращается около центральной линии ствола скважины с частотой Ω на расстоянии r от оси, как лучше всего видно на фиг. 3b. Чтобы учесть периодическое движение, расстояние r будет задано в зависимости от угла поворота около центральной линии. Труба или сегмент компоновки низа буровой колонны вращается "вправо", если смотреть вниз ствола скважины, для целей обсуждения с угловой скоростью ω_0 , которая имеет отрицательное направление.

Секция компоновки низа буровой колонны подвергается приложенной осевой нагрузке P , сдвигающей нагрузке V с одного конца и $V+dV$ с другого конца, и изгибающим моментам M и $M+dM$ соответственно, как лучше всего видно на фиг. 3С. Нагрузки, приложенные к этому элементу на концах секции, возникают от соединения с аналогичными элементами компоновки низа буровой колонны выше и ниже этой секции компоновки низа буровой колонны. Хотя представление фиг. 3С может показаться сложным, если начинать с фундаментальной физики, то это позволит понять сценарий из фиг. 3С в его основных элементах. Например, равнодействующая сила $\Sigma \vec{F}$ равна скорости изменения количества движения \vec{P} а эффективный крутящий момент $\Sigma \vec{M}$ равен скорости изменения кинетического момента \vec{H} .

В форме уравнения эти отношения можно записать в виде уравнений (e49)

$$\frac{d}{dt}(\vec{P}) = \Sigma \vec{F} \quad \frac{d}{dt}(\vec{H}) = \Sigma \vec{M} \quad (e49)$$

Кинематика.

Продолжая ссылаться на фиг. 3С, центр массы элемента располагается в положении $\vec{R}(t)$, которое может вычисляться с помощью уравнения (e50), используя $\theta = \Omega t$

$$\vec{R}(t) = r(t) \cos(\Omega t) \vec{j} + r(t) \sin(\Omega t) \vec{k} \quad (e50)$$

В соответствии с соглашениями настоящих типовых способов секция трубы вращается вокруг центральной линии буровой скважины с частотой Ω , и труба вращается со скоростью вращения ($-\omega_o$) вокруг своей оси относительно вертикальной положительной оси x . Соответственно, итоговый вектор угловой скорости относительно инерциальной системы отсчета можно записать в виде уравнений (e51), где углы ϕ и ψ представляют углы поворота вокруг осей y' и z' соответственно

$$\begin{aligned} \vec{\omega}_i &= -\omega_o \cdot \vec{i}'' + \Omega \cdot \vec{i} \\ \vec{\omega}_j &= -\omega_o \cdot (\vec{i} + \psi \cdot \vec{j} - \phi \cdot \vec{k}) + \Omega \cdot \vec{i} \\ \vec{\omega}_k &= (-\omega_o + \Omega) \cdot \vec{i} - \psi \omega_o \cdot \vec{j} + \phi \omega_o \cdot \vec{k} \end{aligned} \quad (e51)$$

Для целей настоящего примера движение предполагается происходящим в плоскости. Хотя могут присутствовать небольшие деформации изгиба, для настоящей иллюстрации вся угловая скорость предполагается направленной вдоль оси ствол скважины, например, как показано на фиг. 3D. Соответственно, кинематика упрощается, и мы можем записать вектор угловой скорости в виде уравнения (e52)

$$\vec{\omega}_i = (-\omega_o + \Omega) \cdot \vec{i} \quad (e52)$$

Поскольку допустимые движения в этих типовых способах ограничиваются плоскостью $y-z$, и движения можно разложить в системе координат секции компоновки низа буровой колонны, которая вращается вокруг центральной линии буровой скважины (но не вращается с компоновкой низа буровой колонны), дифференциальный оператор, примененный к вектору \vec{Q} можно записать в виде уравнения (e53)

$$\frac{d\vec{Q}}{dt} = \left(\frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} \right)_{rel} - \Omega Q_z \vec{j} + \Omega Q_y \vec{k} \quad (e53)$$

Более того, вектор положения можно записать в виде уравнения (e54)

$$\vec{R} = \begin{pmatrix} 0 \\ R_y \\ R_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ r \cos(\theta) \\ r \sin(\theta) \end{pmatrix} \quad (e54)$$

Затем мы можем записать скорость в виде уравнений (e55)

$$\frac{d\vec{R}}{dt} = \begin{pmatrix} 0 \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \quad \text{для} \quad \begin{aligned} v_y &= \dot{r} \cos(\theta) - r\Omega \sin(\theta) \\ v_z &= \dot{r} \sin(\theta) + r\Omega \cos(\theta) \end{aligned} \quad (e55)$$

А ускорение можно записать в виде уравнений (e56)

$$\frac{d^2 \vec{R}}{dt^2} = \begin{pmatrix} 0 \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} \quad \text{для} \quad \begin{aligned} a_y &= \ddot{r} \cos(\theta) - 2\dot{r}\Omega \sin(\theta) - r\Omega^2 \cos(\theta) \\ a_z &= \ddot{r} \sin(\theta) + 2\dot{r}\Omega \cos(\theta) - r\Omega^2 \sin(\theta) \end{aligned} \quad (e56)$$

Для $\theta=0$ скорость и ускорение можно записать в виде уравнений (e57)

$$\frac{d\vec{R}}{dt} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{r} \\ r\Omega \end{pmatrix} \quad \frac{d^2 \vec{R}}{dt^2} = \begin{pmatrix} 0 \\ \ddot{r} - r\Omega^2 \\ 2\dot{r}\Omega \end{pmatrix} \quad (e57)$$

А для $\theta=\pi/2$ скорость и ускорение можно записать в виде уравнений (e58)

$$\frac{d\vec{R}}{dt} = \begin{pmatrix} 0 \\ -r\Omega \\ \dot{r} \end{pmatrix} \quad \frac{d^2\vec{R}}{dt^2} = \begin{pmatrix} 0 \\ -2r\Omega \\ \ddot{r} - r\Omega^2 \end{pmatrix} \quad (e58)$$

Количество движения.

Используя выведенные выше уравнения, уравнения для количества движения просто записываются в виде уравнений (e59)

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \frac{d}{dt} \left(m \frac{d\vec{R}}{dt} \right) = m \frac{d^2\vec{R}}{dt^2} = m \begin{pmatrix} 0 \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} = \sum \vec{F} \quad (e59)$$

Кинетический момент.

Полный кинетический момент также можно раскрыть с использованием описанных выше принципов и способов. Например, полный кинетический момент равен сумме кинетического момента центра масс вокруг оси буровой скважины плюс член, используемый для представления вращающейся секции компоновки низа буровой колонны, что можно записать в виде уравнения (e60)

$$\vec{H} = (mr^2\Omega - I_x\omega_o) \cdot \vec{i} \quad (e60)$$

В ортогональных направлениях компоненты отсутствуют, и моменты инерции задаются вдоль системы главных компонент в секция компоновки низа буровой колонны, поэтому производное отношение приводит к уравнению (e61)

$$\frac{d}{dt}(\vec{H}) = 2mr\dot{r}\Omega \cdot \vec{i} = \sum \vec{M} \quad (e61)$$

Отсутствуют дополнительные члены по направлениям y и z, которые нужно учесть в этом типовом способе и модели, не включая члены, содержащие углы наклона элемента. Другие модели в рамках объема настоящих способов могут смягчить допущения касательно диапазонов допустимых движений.

Формулировка дифференциальных уравнений движения.

С помощью вышеупомянутых уравнений и обсуждения в качестве фона можно сформулировать дифференциальные уравнения движения для показательной секции компоновки низа буровой колонны. Фиг. 4 предоставляет схематическую иллюстрацию модели 400 элемента балки в некоторой секции компоновки низа буровой колонны с единообразными свойствами (плотность ρ и поперечное сечение A) в стволе скважины, наклоненном на угол φ . Составляющая гравитационной силы на единичную длину в направлении z поэтому равна $(-\rho A g \sin(\varphi))$. Элемент ориентирован под углом θ относительно оси ствола скважины. Осевая нагрузка прикладывается перпендикулярно поперечному сечению элемента, а сдвигающая нагрузка параллельна торцевой поверхности элемента. Дифференциальное увеличение в силе или моменте предполагается в правом конце балки. Равновесие силы и момента в этом элементе даст дифференциальное уравнение движения для балки в направлении z.

Предполагая малые углы, и пренебрегая членами высшего порядка, и допуская статический дисбаланс в направлении z, ускорение балки в направлении z можно записать в виде уравнения (e62), снова используя член $W = (-\rho A g)$

$$-P\theta - V + W \sin(\varphi) dx + (V + dV) + (P + dP)(\theta + d\theta) = (\rho A dx) a_z \quad (e62)$$

Упрощая, ускорение балки можно записать в виде уравнения (e63)

$$W \sin(\varphi) + \frac{dV}{dx} + P \frac{d\theta}{dx} = (\rho A) a_z \quad (e63)$$

Продолжая с разработкой уравнений движения в направлении z, можно предположить, что моменты сходятся к нулю для моделируемого элемента, и уместно пренебрежение членами высшего порядка, моменты в направлении z можно записать в виде уравнений (e64)

$$-M + (M + dM) + W \sin(\varphi) dx \frac{dx}{2} + (V + dV) dx = 0 \quad \frac{dM}{dx} + V = 0 \quad (e64)$$

Момент может относиться к деформации элемента и произведению EI , как видно в уравнениях (e65) и (e66)

$$M = EI \frac{d^2 z}{dx^2} \quad (e65)$$

$$EI \frac{d^4 z}{dx^4} + \frac{dV}{dx} = 0 \quad (e66)$$

Объединяя равновесие моментов с равновесием сил в направлении z, движение в направлении z можно записать в виде уравнения (e67)

$$EI \frac{d^4 z}{dx^4} - P \frac{d^2 z}{dx^2} - W \sin(\varphi) + (\rho A) a_z = 0 \quad (e67)$$

Уравнения движения в измерении y можно вывести аналогичным образом. Однако, поскольку отсутствует гравитационная нагрузка в поперечном измерении y , соответствующее уравнение записывается в виде уравнения (e68)

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} - P \frac{d^2 y}{dx^2} + (\rho A) a_y = 0 \quad (e68)$$

Следует отметить, что (e56) предоставляет отношения для a_y и a_z в показателях γ , θ и Ω , которые нужно использовать с (e67) и (e68).

Решение дифференциальных уравнений движения.

Вышеприведенное обсуждение предоставляет дифференциальные уравнения движения для трехмерных моделей частотной области. В качестве одного примера типовые уравнения выше для оси z определяются как неоднородные дифференциальные уравнения из-за наличия гравитационного члена. Неоднородное дифференциальное уравнение можно решить путем объединения решения для однородного случая плюс член для конкретного решения, чтобы отразить влияние силы тяжести. Вышеприведенное обсуждение, объединяющее статическое и динамическое решения для модели вибрации КНБК с распределенной массой, предоставляет общее решение для неоднородного дифференциального уравнения, которое можно представить уравнением (e69), которое аналогично уравнению (e44) выше.

$$z(x) = \alpha x^2 + c_1 \cosh(\kappa x) + c_2 \sinh(\kappa x) + c_3 \cos(\lambda x) + c_4 \sin(\lambda x) \quad (e69)$$

где, как и раньше, члены κ и λ задаются уравнениями (e70) и одинаковы для измерения z и измерения y

$$\kappa^2 = \left[\frac{P^2}{4(EI)^2} + \frac{W\omega_n^2}{g \cdot EI} \right]^{1/2} + \frac{P}{2EI} \quad (e70)$$

$$\lambda^2 = \left[\frac{P^2}{4(EI)^2} + \frac{W\omega_n^2}{g \cdot EI} \right]^{1/2} - \frac{P}{2EI}$$

Как и раньше, производные можно определить относительно переменных состояния системы

$$\frac{dz}{dx} = \theta_z, \quad M_z = EI \frac{d^2 z}{dx^2}, \quad V_z = -EI \frac{d^3 z}{dx^3} \quad (e71)$$

В элементе положение $x=0$ может выбираться на одной поверхности, а противоположная поверхность тогда находится в $x=L$. В начале координат косинусные функции имеют единичное значение, а синусные функции равны нулю. В виде нормализованного вектора состояния уравнения для z и ее производных можно записать в матричной форме, как уравнение (e72)

$$\begin{pmatrix} z_o \\ \theta_o \\ M_o \\ V_o \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \kappa & 0 & \lambda & 0 \\ \kappa^2 EI & 0 & (-\lambda^2) EI & 0 & 2a \cdot EI \\ 0 & (-\kappa^3) EI & 0 & \lambda^3 EI & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (e72)$$

Где элемент a в уравнении (e73) задается следующим образом:

$$a = \frac{-W \sin(\varphi)}{2P} \quad (e73)$$

Уравнение (e73) включает в себя воздействия силы тяжести и осевой нагрузки и может быть определено как член в статическом решении.

Как и в случае обсуждения выше для динамического сгибания модели с распределенной массой, матрица в (e72) обратима, так что коэффициенты можно вычислить в виде вектора состояния на одной поверхности элемента, как видно в уравнении (e74)

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ 1 \end{pmatrix} = \left(\frac{1}{\lambda^2 + \kappa^2} \right) \cdot \begin{bmatrix} \lambda^2 & 0 & \frac{1}{EI} & 0 & \left(\frac{-2a}{EI} \right) \\ 0 & \frac{\lambda^2}{\kappa} & 0 & \left(-\frac{1}{\kappa EI} \right) & 0 \\ \kappa^2 & 0 & \left(-\frac{1}{EI} \right) & 0 & \frac{2a}{EI} \\ 0 & \frac{\kappa^2}{\lambda} & 0 & \frac{1}{\lambda EI} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda^2 + \kappa^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} z_o \\ \theta_o \\ M_o \\ V_o \\ 1 \end{pmatrix} \quad (e74)$$

Вектор состояния в местоположении $x=L$ теперь можно определить с использованием уравнения (e75)

$$\begin{pmatrix} z_L \\ \theta_{z,L} \\ M_{z,L} \\ V_{z,L} \\ 1 \end{pmatrix} = \left(\frac{1}{\lambda^2 + \kappa^2} \right) \begin{bmatrix} \cosh(\kappa L) & \sinh(\kappa L) & \cos(\lambda L) & \sin(\lambda L) & aL^2 \\ \kappa \sinh(\kappa L) & \kappa \cosh(\kappa L) & -\lambda \sin(\lambda L) & \lambda \cos(\lambda L) & 2aL \\ \kappa^2 EI \cosh(\kappa L) & \kappa^2 EI \sinh(\kappa L) & -\lambda^2 EI \cos(\lambda L) & -\lambda^2 EI \sin(\lambda L) & 2a \\ -\kappa^3 EI \sinh(\kappa L) & -\kappa^3 EI \cosh(\kappa L) & -\lambda^2 EI \sin(\lambda L) & \lambda^2 EI \cos(\lambda L) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda^2 & 0 & \frac{1}{EI} & 0 & \left(\frac{-2a}{EI} \right) \\ 0 & \frac{\lambda^2}{\kappa} & 0 & \left(\frac{-1}{\kappa EI} \right) & 0 \\ \kappa^2 & 0 & \left(\frac{-1}{EI} \right) & 0 & \frac{2a}{EI} \\ 0 & \frac{\kappa^2}{\lambda} & 0 & \frac{1}{\lambda EI} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda^2 + \kappa^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} z_o \\ \theta_{z,o} \\ M_{z,o} \\ V_{z,o} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (e75)$$

Выполняя умножение членов как и раньше

$$\begin{pmatrix} z_L \\ \theta_{z,L} \\ M_{z,L} \\ V_{z,L} \\ 1 \end{pmatrix} = \left(\frac{1}{\lambda^2 + \kappa^2} \right) \cdot T \cdot \begin{pmatrix} z_o \\ \theta_{z,o} \\ M_{z,o} \\ V_{z,o} \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 T_{11} &= \lambda^2 \cosh(\kappa L) + \kappa^2 \cos(\lambda L) \\
 T_{12} &= \frac{\lambda^2}{\kappa} \sinh(\kappa L) + \frac{\kappa^2}{\lambda} \sin(\lambda L) \\
 T_{13} &= \frac{1}{EI} (\cosh(\kappa L) - \cos(\lambda L)) \\
 T_{14} &= \frac{1}{EI} \left(\frac{\sin(\lambda L)}{\lambda} - \frac{\sinh(\kappa L)}{\kappa} \right) \\
 T_{15} &= \left(\cosh(\kappa L) - \cos(\lambda L) - \frac{L^2 EI}{2} (\lambda^2 + \kappa^2) \right) \cdot \frac{W \sin(\varphi)}{P \cdot EI} \\
 T_{21} &= \kappa \lambda \cdot (\lambda \sinh(\kappa L) - \kappa \sin(\lambda L)) \\
 T_{22} &= \lambda^2 \cosh(\kappa L) + \kappa^2 \cos(\lambda L) \\
 T_{23} &= \frac{1}{EI} (\kappa \sinh(\kappa L) + \lambda \sin(\lambda L)) \\
 T_{24} &= \frac{1}{EI} (\cos(\lambda L) - \cosh(\kappa L)) \\
 T_{25} &= \left(\kappa \sinh(\kappa L) + \lambda \sin(\lambda L) - L \cdot EI \cdot (\lambda^2 + \kappa^2) \right) \cdot \frac{W \sin(\varphi)}{P \cdot EI} \\
 T_{31} &= \lambda^2 \kappa^2 EI (\cosh(\kappa L) - \cos(\lambda L)) \\
 T_{32} &= \lambda \kappa \cdot EI (\lambda \sinh(\kappa L) - \kappa \sin(\lambda L)) \\
 T_{33} &= \kappa^2 \cosh(\kappa L) + \lambda^2 \cos(\lambda L) \\
 T_{34} &= (-\kappa \sinh(\kappa L) - \lambda \sin(\lambda L)) \\
 T_{35} &= \left(\kappa^2 \cosh(\kappa L) + \lambda^2 \cos(\lambda L) - (\lambda^2 + \kappa^2) \right) \cdot \frac{W \sin(\varphi)}{P} \\
 T_{41} &= \left(-\lambda^2 \kappa^2 EI (\kappa \sinh(\kappa L) + \lambda \sin(\lambda L)) \right) \\
 T_{42} &= \lambda^2 \kappa^2 EI (\cos(\lambda L) - \cosh(\kappa L)) \\
 T_{43} &= \lambda^3 \sin(\lambda L) - \kappa^3 \sinh(\kappa L) \\
 T_{44} &= \kappa^2 \cosh(\kappa L) + \lambda^2 \cos(\lambda L) \\
 T_{45} &= \left(\lambda^3 \sin(\lambda L) - \kappa^3 \sinh(\kappa L) \right) \cdot \frac{W \sin(\varphi)}{P \cdot EI} \\
 T_{51} &= T_{52} = T_{53} = T_{54} = 0 \\
 T_{55} &= \lambda^2 + \kappa^2
 \end{aligned} \quad (e76)$$

Отмечая, что ось u не затрагивается силой тяжести, тогда проблема в направлении u аналогична двумерному случаю, решенному выше

$$\begin{pmatrix} y_L \\ \theta_{y,L} \\ M_{y,L} \\ V_{y,L} \end{pmatrix} = \left(\frac{1}{\lambda^2 + \kappa^2} \right) \cdot T \cdot \begin{pmatrix} y_o \\ \theta_{y,o} \\ M_{y,o} \\ V_{y,o} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} T_{11} &= \lambda^2 \cosh(\kappa L) + \kappa^2 \cos(\lambda L) & T_{21} &= \kappa \lambda \cdot (\lambda \sinh(\kappa L) - \kappa \sin(\lambda L)) \\ T_{12} &= \frac{\lambda^2}{\kappa} \sinh(\kappa L) + \frac{\kappa^2}{\lambda} \sin(\lambda L) & T_{22} &= \lambda^2 \cosh(\kappa L) + \kappa^2 \cos(\lambda L) \\ T_{13} &= \frac{1}{EI} (\cosh(\kappa L) - \cos(\lambda L)) & T_{23} &= \frac{1}{EI} (\kappa \sinh(\kappa L) + \lambda \sin(\lambda L)) \\ T_{14} &= \frac{1}{EI} \left(\frac{\sin(\lambda L)}{\lambda} - \frac{\sinh(\kappa L)}{\kappa} \right) & T_{24} &= \frac{1}{EI} (\cos(\lambda L) - \cosh(\kappa L)) \\ T_{31} &= \lambda^2 \kappa^2 EI (\cosh(\kappa L) - \cos(\lambda L)) & T_{41} &= (-\lambda^2 \kappa^2 EI (\kappa \sinh(\kappa L) + \lambda \sin(\lambda L))) \\ T_{32} &= \lambda \kappa \cdot EI (\lambda \sinh(\kappa L) - \kappa \sin(\lambda L)) & T_{42} &= \lambda^2 \kappa^2 EI (\cos(\lambda L) - \cosh(\kappa L)) \\ T_{33} &= \kappa^2 \cosh(\kappa L) + \lambda^2 \cos(\lambda L) & T_{43} &= \lambda^3 \sin(\lambda L) - \kappa^3 \sinh(\kappa L) \\ T_{34} &= (-\kappa \sinh(\kappa L) - \lambda \sin(\lambda L)) & T_{44} &= \kappa^2 \cosh(\kappa L) + \lambda^2 \cos(\lambda L) \end{aligned}$$

(e77)

Построение моделей.

Можно создать различные заменители КНБК, чтобы обеспечить возможность моделирования или имитации КНБК с использованием трехмерных моделей частотной области, описанных выше. Рассмотрим один сценарий, в котором стабилизаторы моделируются в заместителе КНБК как пребывающие в синхронизированном катящемся контакте со стволом скважины. Эти элементы синхронизируются в том смысле, что они синфазны по линии касания, которая проходит около буровой скважины. Для простоты можно задать фиксированное условие в каждом направлении координат на конце долота, чтобы момент на каждом конце был равен нулю. В этом сценарии определяются четыре условия по обоим направлениям координат, что необходимо и достаточно для получения решения. Векторы и матрицы состояния, показанные выше, могут использоваться для распространения решения в каждом из направлений координат y и z . В дополнение к допущению периодичности во времени, периодичность может задаваться в условиях на долоте и стабилизаторах, так как они синхронно вращаются вокруг буровой скважины.

Дополнительно или в качестве альтернативы можно разработать заменители КНБК путем введения эксцентрической массы в систему. Результаты моделирования в частотной области затем можно изучить для определения чувствительности результатов к этой неуравновешенности масс. Когда трехмерные модели включают в себя условие эксцентрической массы, имеется дополнительный член в уравнениях модели частотной области, чтобы представить смещение массы от центральной линии на величину ε . Например, члены κ и λ задаются уравнениями (e70) выше. Каждый можно приспособить для моделирования эксцентрической массы путем подходящего встраивания члена ε , например

$$-\varepsilon (\rho A) \omega_n^2,$$

что аналогично случаю статической нагрузки, как в рассмотренной выше модели с сосредоточенным параметром.

Эти и другие заменители КНБК можно создать для обеспечения возможности моделирования буровых работ с использованием трехмерных моделей частотной области, описанных в этом документе. Результирующие векторы состояния можно обработать для получения одной или нескольких эксплуатационных характеристик вибрации, которые описаны в этом документе.

Влияние искривленной буровой скважины.

Предшествующее обсуждение заместителей с сосредоточенным параметром и заместителей с распределенной массой характерны для компоновок низа бурильной колонны, расположенных в прямой буровой скважине. Эти заместители можно изменить, чтобы учесть или представить компоновку низа бурильной колонны, расположенную в искривленной буровой скважине. Хотя модификации можно проинвестировать с любыми заместителями и моделями, представленными в этом документе, чтобы учесть кривизну буровой скважины, этот раздел будет описывать типовые модификации к заместителю с распределенной массой, рассмотренному выше. Точнее говоря, настоящий раздел предоставляет типовую модификацию способов и заместителей, рассмотренных выше, чтобы позволить рассмотрение компоновок низа бурильной колонны, расположенных в искривленном участке буровой скважины.

Настоящая типовая модификация рассматривает ситуацию, где КНБК находится в секции буровой скважины с постоянной скоростью увеличения наклона (BUR). Для положительной BUR наклон буровой скважины увеличивается в зависимости от расстояния x до долота. Аналогичным образом, для отрицательной BUR наклон уменьшается вместе с x . При рассмотрении искривленной секции буровой скважины задаются ограничения контакта и стабилизатора в отношении центральной линии буровой скважины, а не в отношении прямой линии. Соответственно, в модификации для влияния искривленной буровой

скважины поперечные отклонения $y(x,t)$ у КНБК аналогичным образом можно задать относительно центральной линии буровой скважины. Переменное преобразование уравнения (e78) может использоваться для описания отклонения КНБК от прямой линии, которая касается центральной линии буровой скважины на долоте

$$\hat{y}(x,t) = y(x,t) + \frac{1}{2} \kappa_{BUR} x^2 \quad (e78)$$

Здесь κ_{BUR} - кривизна центральной линии, ассоциированной с BUR, в единицах (1/длина). Поскольку переменная y описывает поперечные отклонения относительно прямого исходного состояния, дифференциальные уравнения, которые определяют ее между точками контакта или стабилизаторами, идентичны выведенным в предшествующем обсуждении заменителей с распределенной массой. Используя переменное преобразование выше, мы можем получить и решить новые уравнения для статического случая, динамического сгибания и трехмерного моделирования.

Статический случай.

Для статического случая считается уравнение (e29) выше

$$EI \frac{d^4 \hat{y}}{dx^4} - P \frac{d^2 \hat{y}}{dx^2} - W \sin(\varphi) = 0 \quad (e29)$$

Подставляя переменную y для учета кривизны буровой скважины, уравнение (e29) изменяется в виде уравнения (e79)

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} - P \frac{d^2 y}{dx^2} - (W \sin(\varphi) + \kappa_{BUR} P) = 0 \quad (e79)$$

Таким образом, матрица, которая сопоставляет нормализованный вектор состояния (y и его производные) в $x=0$ с вектором состояния в $x=L$, имеет такой же вид, как T_{BEAM} , заданный выше в виде уравнения (e33). Однако $W \sin(\varphi)$ заменяется $W \sin(\varphi) + \kappa_{BUR} P$. Кроме того, y и ее производные сопоставляются с переменными состояния посредством уравнений (e80)

$$\frac{dy}{dx} = \theta \quad \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M}{EI} - \kappa_{BUR} \quad \frac{d^3 y}{dx^3} = \frac{-V}{EI} \quad (e80)$$

Модификации для учета кривизны буровой скважины имеют относительно небольшую сложность, однако важны для точности и достоверности настоящих способов, когда они применяются к искривленным буровым скважинам. Рассматривая модификации выше, видно, что влияние кривизны буровой скважины имеет два основных воздействия на статические поперечные отклонения. Во-первых, когда имеется осевая нагрузка, кривизна формирует дополнительное действующее боковое усилие вдоль КНБК, которое накладывается на гравитационную нагрузку. Также кривизна буровой скважины формирует дополнительный действующий изгибающий момент, который необходим для выравнивания КНБК с центральной линией буровой скважины.

Динамическое сгибание.

Поскольку описанное выше переменное преобразование не зависит от времени, уравнения, которые определяют состояния динамического сгибания, остаются без изменений. Соответственно, не нужны никакие модификации в заменителях или вычислениях, чтобы учесть кривизну буровой скважины.

Трехмерные модели.

Применительно к полной трехмерной модели, описанной выше, статический случай соответствует поперечным отклонениям в вертикальной плоскости (z -компонент). Для прямой буровой скважины статические отклонения в горизонтальном направлении отсутствуют (y -компонент), поэтому никакие вычисления не были нужны. Если траектория буровой скважины фактически двумерна, так что только кривизна присутствует в вертикальной плоскости, ассоциированной с BUR, то описанное выше решение для статического случая применяется к z -компоненту, а y -компонент снова равен нулю. Однако, если присутствует отклонение, так что азимут меняется вместе с положением, вектор кривизны уже не находится в вертикальной плоскости. Используя нотацию из вышеприведенного обсуждения полной трехмерной модели, кривизну можно разложить на горизонтальную и вертикальную составляющие, как в уравнении (e81)

$$\bar{\kappa} = \kappa_{WALK} \bar{j} + \kappa_{BUR} \bar{k} \quad (e81)$$

Трехмерную модель, учитывающую кривизну буровой скважины, соответственно можно решить, принимая во внимания переменные преобразования уравнений (e82)

$$\begin{aligned} \hat{y}(x,t) &= y(x,t) + \frac{1}{2} \kappa_{WALK} x^2, \\ \hat{z}(x,t) &= z(x,t) + \frac{1}{2} \kappa_{BUR} x^2. \end{aligned} \quad (e82)$$

Решение для вертикальной (z -) компоненты сокращается до статического случая, описанного выше. Дифференциальное уравнение, ассоциированное с горизонтальной (y -) компонентой, представлено в уравнении (e83)

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} - P \frac{d^2 y}{dx^2} - \kappa_{\text{WALK}} P = 0 \quad (e83)$$

Таким образом, матрица, которая сопоставляет нормализованный вектор состояния (y и его производные) в $x=0$ с вектором состояния в $x=L$, имеет такой же вид, как T_{BEAM} , заданный выше в виде уравнения (e33). Однако $W \sin(\varphi)$ заменяется $W \sin(\varphi) + \kappa_{\text{BUR}} P$. Кроме того, y и ее производные сопоставляются с переменными состояния посредством уравнений (e84)

$$\frac{dy}{dx} = \theta_y, \quad \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M_y}{EI} - \kappa_{\text{WALK}}, \quad \frac{d^3 y}{dx^3} = \frac{-V_y}{EI} \quad (e84)$$

Таким образом, для горизонтальной компоненты отсутствует гравитационный член, но кривизна отклонения встраивается в виде действующего изгибающего момента вдоль КНБК, который сформирует реактивные нагрузки в точках контакта. Полный изгибающий момент и сдвигающую силу можно получить путем векторное суммирование их соответствующих компонентов.

Вышеупомянутое предоставляет одну типовую модификацию заменителей компоновки низа буровой колонны и моделей вибрации КНБК, которая делает возможным рассмотрение кривизны буровой скважины и влияние кривизны на вибрации в статическом случае с использованием полной трехмерной модели. Как и в двумерных реализациях, так как переменное преобразование не зависит от времени, то уравнения, которые определяют состояния динамического сгибания, остаются без изменений. Соответственно, не нужны никакие модификации в способах, уравнениях, моделях и/или вычислениях, чтобы учесть кривизну буровой скважины при рассмотрении динамического сгибания.

Эксплуатационные характеристики вибрации КНБК.

Векторы переменных состояния, описанные выше, могут использоваться для предоставления различных индексов, которые используются для изображения характеристики вибрации КНБК у разных заменителей КНБК. Хотя следует принять во внимание, что могут использоваться различные сочетания переменных состояния и величин, выведенных из основных переменных состояния, в этом документе описываются типовые эксплуатационные характеристики вибрации. Из этих примеров без труда будут определены другие характеристики, и они рассматриваются в пределах объема настоящего раскрытия изобретения.

Хотя каждая из эксплуатационных характеристик вибрации, описанных в этом документе, является сочетаниями переменных состояния в разных местоположениях вдоль КНБК, которые могут определяться для многих заменителей КНБК в расчетном режиме или могут вычисляться для реального поведения эксплуатационного КНБК в каротажном режиме, индексы обычно можно охарактеризовать либо как точечные индексы, либо как сегментные индексы. Точечные индексы вычисляются с учетом переменных состояния КНБК в определенной точке на ее длине. Сегментные индексы согласно их названию вычисляются с учетом переменных состояния КНБК на сегменте КНБК. Одним примером точечного индекса является индекс кривизны конечной точки, описанный ниже. В другом примере индекс бокового усилия КНБК и индекс суммарного крутящего момента КНБК состоят из суммы точечных индексов. Несколько примеров сегментных индексов предоставляются ниже. Хотя оба индекса являются полезными и могут помочь предсказать вибрационную характеристику, сегментные индексы могут предоставить более подробные и/или более точные предсказания характеристики вибрации во всей КНБК. Например, индекс кривизны конечной точки определяет кривизну в конечной точке, но не предоставляет подробной информации о состоянии компоновки низа буровой колонны между долотом и конечной точкой. В отличие от этого сегментные индексы могут предоставить эксплуатационную характеристику вибрации для любого сегмента между долотом и конечной точкой и/или для всей КНБК между долотом и конечной точкой.

Заменители КНБК, используемые в настоящих моделях и способах, включают в себя представления компонентов КНБК, например долота, стабилизаторов, буровых труб и т.д. Компоненты могут рассматриваться как сгруппированные в нижней секции и верхней секции. Нижняя секция включает в себя компоненты, начиная с долота и проходя через большинство или все буровые трубы. Верхняя секция, которая является последним компонентом в заменителе КНБК, обычно является нижней частью утяжеленной буровой трубы. Различные узлы N могут использоваться для построения заменителя КНБК, причем узел 1 находится на долоте. В соответствии с описанными в этом документе реализациями первый элемент в верхней секции имеет индекс "U", а последний элемент в нижней секции имеет индекс "L", т.е. $U=L+1$. Кроме того, заменители КНБК включают в себя C точек контакта с контактными усилиями " F_j ", где индекс j пробегает элементы КНБК, которые находятся в контакте со стволом скважины.

Используя результаты одной или нескольких моделей, рассмотренных выше, вместе с вышеприведенной номенклатурой для заменителей КНБК, можно вычислить различные эксплуатационные характеристики вибрации. Например, индекс кривизны конечной точки можно представить уравнением (e85), которое приведено ниже

$$PI = \alpha \frac{M_N}{(EI)_N} \quad (e85)$$

где PI - эксплуатационная характеристика вибрации, M_N - изгибающий момент в последнем элементе модели, $(EI)_N$ - жесткость при изгибе этого элемента, и α - постоянная. Следует отметить, что α может быть $7,33 \times 10^5$ или другой подходящей постоянной, например, дополнительно описанной ниже.

Аналогичным образом, индекс энергии деформации КНБК можно представить уравнением (e86), которое указано ниже

$$PI = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \frac{M_i^2}{2(EI)_i} \quad (e86)$$

где суммирование выполняется по L элементам в нижней части КНБК, и индекс i относится к каждому из этих элементов. Следует отметить, что индекс энергии деформации КНБК является сегментным индексом, который учитывает среднюю энергию деформации, распределенную по всей нижней части КНБК.

В качестве другой типовой эксплуатационной характеристики вибрации индекс средней переданной энергии деформации можно вычислить с помощью уравнения (e87)

$$PI = \frac{1}{(N-U+1)} \sum_{i=U}^N \frac{M_i^2}{2(EI)_i} \quad (e87)$$

где N - общее количество элементов, а U относится к первому элементу верхней части КНБК (обычно первому узлу в утяжеленной бурильной трубе), и суммирование производится по этой верхней части КНБК. Видно, что индекс средней переданной энергии деформации является средней величиной энергии деформации в верхней части КНБК, или энергии деформации, переданной от верхней части.

Хотя индекс средней переданной энергии деформации характеризует переданную энергию деформации в верхней части, распознавание эксплуатационных характеристик верхней части дает возможность выведения еще одной эксплуатационной характеристики вибрации. Например, наблюдение, что переданные изгибающие моменты выглядят синусоидальными и отчасти независимыми от конечного отрезка в этом однородном интервале трубы (например, $M \sim M_0 \sin kx$), дает возможность проще выразить индекс переданной энергии деформации в уравнении (e88)

$$PI = \frac{\left(\max_{i=U}^N (M_i) - \min_{i=U}^N (M_i) \right)^2}{16(EI)_N} \quad (e88)$$

где максимальные и минимальные изгибающие моменты в верхней части КНБК используются в качестве посредника для амплитуды возмущающей силы. Этот индекс переданной энергии деформации менее восприимчив к выбору конечного отрезка и соответственно более эффективен в вычислительном плане, чем индекс кривизны конечной точки, заданный (e87), хотя они оба измеряют величину энергии, сообщаемой бурильной колонне выше КНБК. Выведение индекса переданной энергии деформации из индекса средней переданной энергии деформации является примером других выведений эксплуатационных характеристик вибрации, которые могут возникнуть или получаться из раскрытия изобретения в этом документе, хотя и не описаны явно в этом документе.

Индексы энергии деформации могут быть реализованы разным, но эквивалентным способом, когда используются матрицы непрерывных элементов балки. Хотя длины элементов в модели с сосредоточенным параметром ограничиваются числовыми соображениями, которые обеспечивают честное квантование интервала с целью вычисления эксплуатационных характеристик вибрации, использование непрерывных элементов балки позволяет использовать большие длины элементов в модели. В этом случае квантования движения балки, полученного просто с использованием грубой дискретизации, может быть недостаточно. Соответствующие аналитические соотношения для энергии деформации изгиба могут быть предоставлены для этих непрерывных элементов балки в рамках объема этого изобретения.

В качестве дополнительных примеров подходящих эксплуатационных характеристик вибрации боковые усилия можно индексировать по меньшей мере двумя способами. Например, индекс среднеквадратичного бокового усилия КНБК и индекс общего бокового усилия КНБК можно представить уравнениями (e89) и (e90) соответственно

$$PI = \sqrt{\frac{1}{C} \sum_{j=1}^C F_j^2} \quad (e89)$$

$$PI = \sum_{j=1}^C |F_j| \quad (e90)$$

где контактное усилие F_j вычисляется для каждой из C точек контакта из ограничений и распространения решения, как обсуждалось выше, и суммирование проводится по контактными усилиям в этих местоположениях с использованием индекса точки контакта j.

Значения динамического бокового усилия могут быть преобразованы в соответствующие значения динамического крутящего момента, используя приложенное плечо силы (радиус до точки контакта r_j) и подходящий коэффициент трения в каждой соответствующей точке μ_j . Суммируя снова элементы в контакте с буровой скважиной, индекс среднеквадратичного крутящего момента КНБК и индекс полного крутящего момента КНБК можно представить уравнениями (e91) и (e92) соответственно

$$PI = \sqrt{\frac{1}{C} \sum_{j=1}^C (\mu_j r_j F_j)^2} \quad (e91)$$

$$PI = \sum_{j=1}^C |\mu_j r_j F_j| \quad (e92)$$

Эксплуатационная характеристика динамического крутящего момента учитывает динамические скручивающие влияния потенциально больших динамических боковых усилий, предусматривая меньшее значение индекса для усовершенствованного оборудования или рабочих характеристик, например эффективное сокращение трения, которое может возникать от использования расширителей с цилиндрическими шарошками, которые известны как обеспечивающие меньшие крутильные вибрации в эксплуатации.

Значения индекса среднеквадратичного бокового усилия КНБК и индекса среднеквадратичного крутящего момента КНБК представляют среднее значение этого источника динамического сопротивления, тогда как значения индекса общего бокового усилия КНБК и индекса полного крутящего момента КНБК представляют суммирование этого сопротивления на диапазоне точек контакта КНБК между I и C. Оба могут предоставлять полезную диагностическую информацию. Индекс среднеквадратичного бокового усилия КНБК предоставляет среднюю реактивную силу стабилизатора; индекс общего бокового усилия КНБК предоставляет общую сумму реактивных сил стабилизатора во всех точках контакта. Индекс полного крутящего момента КНБК показывает объединенное вращательное сопротивление всех точек контакта, принимая во внимание диаметр частей в контакте со стволом скважины и соответствующий коэффициент трения; индекс среднеквадратичного крутящего момента КНБК предоставляет среднее вращательное сопротивление на разное от $j=1$ до $j=C$. Индексы крутящего момента КНБК могут предоставлять ценную информацию для содействия в проектировании смягчения крутильных вибраций при прерывистом перемещении.

Предшествующее обсуждение эксплуатационных характеристик вибрации использует точки контакта или верхнюю или нижнюю части компоновки низа буровой колонны для задания сегментов компоновки низа буровой колонны, которые нужно проанализировать и/или описать с помощью уравнений и способов эксплуатационной характеристики вибрации. Можно разработать дополнительные индексы, которые дают возможность предсказывать и/или описывать вибрационную характеристику в любом сегменте компоновки низа буровой колонны. Например, сегмент компоновки низа буровой колонны между любыми двумя точками может характеризоваться подходящей эксплуатационной характеристикой вибрации. Одним типовым индексом для описания вибрационной характеристики компоновки низа буровой колонны или заменителя КНБК является индекс проводимости. Индекс проводимости может сравнивать переменные состояния КНБК между любыми двумя точками для предоставления индекса. Например, ускорение заменителя КНБК (или реальной КНБК) может определяться в любых двух точках, и затем сравниваться для определения индекса проводимости. Другие переменные состояния, например смещение, угол наклона, изгибающий момент и сдвигающая сила или их производные могут сравниваться аналогичным образом.

Продолжая с примером индекса проводимости, сравнивающим ускорение в любых двух точках а и b на заменителе КНБК, ускорение КНБК в точках а и b может моделироваться с использованием виртуального датчика, встроенного в заменитель КНБК, и описанных выше моделей вибрации КНБК. Модели вибрации КНБК, описанные выше, и ассоциированные способы и заменители КНБК описываются как полезные, в том числе для вычисления поперечного смещения (y) каждого массового элемента, или сегмента КНБК, и соответствующих пространственных производных. Хотя смещение является информативным, вычисленное ускорение с использованием этих моделей может предоставить более полный способ для сравнения модельных результатов с измеренными ускорениями, которые легко получаются от скважинных инструментов. Как известно, производные поперечного изгиба относятся к координате на оси. Вторая производная смещения по отношению ко времени предоставляет ускорение. К счастью, отношение преобразования Лапласа в частотной области облегчает вычисление второй производной, которая может выражаться с помощью умножения смещения y на квадрат частоты, например, как проиллюстрировано в уравнении (e93)

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -\omega^2 y \quad (e93)$$

Нужно понимать, что применительно к настоящему раскрытию изобретения термин "виртуальный датчик" является любым отношением или набором отношений, который может ассоциироваться с заменителем КНБК, чтобы позволить моделям вибрации КНБК вычислять по меньшей мере одну перемен-

ную состояния в заданном местоположении на заменителе КНБК. Например, вышеприведенное уравнение (e93) позволяет моделям вибрации КНБК вычислять ускорение заменителя КНБК в определенном местоположении, т.е. местоположении, для которого y вводится в уравнение виртуального датчика. Ускорение является лишь одним примером переменных состояния, которые могут определяться или вычисляться с помощью идеи виртуального датчика. Другие также могут выбираться, и подходящие уравнения, которые можно создать для обеспечения возможности вычисления выведенных переменных из моделей вибрации КНБК. В некоторых реализациях виртуальные датчики будут выбираться для вычисления переменных состояния, которые соответствуют одному или нескольким свойствам, которые можно измерить непосредственно во время буровых работ для прямого сравнения с ними.

Виртуальный датчик в моделях вибрации КНБК, расположенный на оси заменителя КНБК, может сравниваться непосредственно с измеренными данными в инструменте сбора данных, расположенном на оси реальной компоновки низа бурильной колонны. Однако, когда инструмент сбора данных, например акселерометр, удален от центральной линии инструмента в реальной компоновке низа бурильной колонны, может потребоваться адаптировать виртуальный датчик. Дополнительно или в качестве альтернативы, разные скважинные датчики могут быть приспособлены для измерения разных состояний или разных местоположений на КНБК; можно произвести подходящие корректировки в уравнениях и отношениях виртуального датчика. В качестве одного примера типовая модификация в уравнении виртуального датчика для ускорения иллюстрируется в уравнении (e94)

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -(\omega^2 y + \omega_0^2 R) \quad (e94)$$

Уравнение (e94) включает в себя член центробежного ускорения для учета инструмента измерения, вращающегося на расстоянии R от центральной линии инструмента со скоростью ω_0 . Результат акселерометра соответствует сумме ускорения из-за вибрации плюс ускорение из-за центробежного эффекта. Дополнительно и в качестве альтернативы результаты двух или более датчиков могут объединяться для сравнения результатов виртуального датчика. Например, могут вычитаться измерения от двух противоположных радиальных акселерометров, и в этом случае центробежный член выбывает, и результирующее поперечное ускорение может непосредственно сравниваться с модельными значениями виртуального датчика. Без потери общности можно представить другие математические сочетания реальных и виртуальных датчиков для обеспечения улучшенного сравнительного анализа.

Продолжая с обсуждением индекса проводимости, два или более виртуальных датчика могут ассоциироваться с заменителем КНБК для использования в моделях вибрации КНБК. Проводимость между двумя виртуальными датчиками может определяться посредством сравнения вычисленной переменной состояния для одного виртуального датчика с вычисленной переменной состояния в другом виртуальном датчике. Например, общий индекс проводимости $T_{ab}(\omega_0)$ от точки b до точки a в КНБК может задаваться уравнением (e95)

$$T_{ab}(\omega_0) = \frac{\left| \sum_{k=1}^m w_k(\omega_0)(k\omega_0)^2 y_{ka}(\omega_0) \right|}{\left| \sum_{k=1}^m w_k(\omega_0)(k\omega_0)^2 y_{kb}(\omega_0) \right|} = \frac{\left| \sum_{k=1}^m k^2 w_k(\omega_0) y_{ka}(\omega_0) \right|}{\left| \sum_{k=1}^m k^2 w_k(\omega_0) y_{kb}(\omega_0) \right|} \quad (e95)$$

где y_{ka} и y_{kb} - вычисленные смещения в точке a и b для k -го кратного RPM при скорости вращения ω_0 , а $w_k(\omega_0)$ - вес для k -го кратного RPM при скорости вращения ω_0 .

Хотя $T_{ab}(\omega_0)$, которое задано уравнением (e95), предоставляет соотношение между двумя ускорениями в разных местоположениях, могут использоваться другие отношения между двумя ускорениями или другими переменными состояния. Путем задания индекса проводимости как соотношения между переменными состояния в двух местоположениях, индекс проводимости будет иметь следующий физический смысл:

$T_{ab}(\omega_0) > 1$: увеличенная вибрация от точки b к точке a ;

$T_{ab}(\omega_0) = 1$: такая же вибрация передана от точки b к точке a ;

$T_{ab}(\omega_0) < 1$: уменьшенная вибрация от точки b к точке a .

Индекс проводимости можно вычислить между двумя фиксированными точками на заменителе КНБК и/или можно вычислить в различных местоположениях относительно фиксированного местоположения, например долота. Например, если местоположения a и b неизменны, то $T_{ab}(\omega_0)$ дает отношение между распространением вибрации и скоростью вращения. Т.е. индекс проводимости может предоставить дополнительное средство для выявления RPM, которые предположительно увеличивают проводимость вибраций, и/или RPM, которые предположительно приводят к повышенным вибрациям вдоль КНБК. С другой стороны, если точка b устанавливается в положение долота, скорость вращения ω_0 неизменна, и a меняется по оси x , проводимость $T_{xb}(\omega_0)$ является функцией x и предоставляет эффект усиления вибрации вдоль КНБК с заданной RPM ω_0 . Соответственно, местоположения серьезной вибрации в КНБК можно распознать из всплесков $T_{xb}(\omega_0)$ для заданной RPM.

Вычисленный индекс проводимости можно сравнить с измеренным индексом проводимости по

различным причинам. Как будет подробнее обсуждаться ниже, любую из эксплуатационных характеристик вибрации можно сравнить с измеренными данными или данными, выведенными из измеренных данных, чтобы проверить точность моделей вибрации КНБК, улучшить заменитель КНБК и т.д. В качестве одного примера измеренного индекса или выведенной расчетной точки, которую можно сравнить с вычисленными индексами, измеренный индекс проводимости можно записать в виде уравнения (e96).

$$T_{12}(\omega_0) = \frac{|\text{FT}[A_1(t)]|}{|\text{FT}[A_2(t)]|} \quad (e96)$$

где FT[] является преобразованием Фурье, а $A_1(t)$ и $A_2(t)$ являются измеренными картинками изменения ускорения в положениях датчика 1 и 2 соответственно. Измеренный индекс проводимости в сравнении с вычисленным модельным индексом проводимости может использоваться для принятия информированных решений о конфигурациях КНБК для использования в последующих буровых работах. Дополнительно или в качестве альтернативы, измеренный индекс проводимости и вычисленный индекс проводимости могут использоваться для информирования создания будущих заменителей КНБК для использования в способах настоящего раскрытия изобретения, либо для большей точности в представлении реальности заменителем, либо для проверки теоретически улучшенных конструкций. Аналогичным образом буровые работы, реальные или в моделях вибрации КНБК, могут быть изменены с учетом сравнения между измеренным индексом проводимости и вычисленным индексом проводимости.

В буровой работе различные взаимодействия между буровой скважиной и КНБК могут привести к вибрациям. Некоторые взаимодействия имеют более близкое отношение к конкретным типам вибрации, нежели другие. Например, боковое усилие и крутящий момент являются взаимодействиями КНБК-буровая скважина, которые имеют тесное отношение к вибрациям при прерывистом перемещении. Слабые боковые усилия стабилизатора (или боковые усилия другой точки контакта) в широком диапазоне скоростей вращения указывают пониженную склонность к формированию крутящего момента, а следовательно, пониженной опасности прерывистого перемещения, вызванного КНБК. В рассмотренных выше способах и моделях описывались эксплуатационные характеристики вибрации, чтобы охарактеризовать боковое усилие и крутящий момент (см. уравнения (e89)-(e92)). Посредством отношения между крутящим моментом и боковым усилием можно разработать дополнительные индексы. В качестве одного примера можно вывести угловой коэффициент бокового усилия из результатов моделей вибрации КНБК.

Боковые усилия КНБК и крутящий момент, сформированный из этих боковых усилий, являются функциями следующих трех параметров: RPM (ω_0), WOB и наклона скважины (θ), допуская, что размер скважины остается постоянным при любом заданном местоположении контакта бокового усилия. Крутящий момент, образованный от каждого стабилизатора или точки контакта, можно представить уравнением (e97)

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (e97)$$

В уравнении (e97) r является радиусом скважины, а F - составляющая бокового усилия из-за трения, которое имеет вид уравнения (e98)

$$\vec{F} = N_{\text{Sideforce}} \cdot \mu \cdot \vec{e}_{\text{wellbore}} \quad (e98)$$

В уравнении (e98) $N_{\text{Sideforce}}$ является контактной нагрузкой, действующей перпендикулярно к стенке буровой скважины, μ коэффициент трения, а

$\vec{e}_{\text{wellbore}}$

является единичным вектором, который находится параллельно стенке ствола скважины. Так как результирующее боковое усилие и радиальный вектор всегда ортогональны, направление вектора результирующего крутящего момента всегда будет параллельно центральной линии ствола скважины. Использование преимущества этого дает возможность упрощения уравнения (e97) до уравнения (e97')

$$\tau = r \cdot N_{\text{Sideforce}} \cdot \mu \quad (e97')$$

Соответственно, величина образованного крутящего момента связана с боковым усилием через $r\mu$, которое может быть постоянным в зависимости от выбора коэффициента трения μ . Чем больше боковое усилие, тем больший крутящий момент будет сформирован для любого заданного коэффициента трения и размера скважины. Следует отметить, что уравнение (e97') лежит в основе индексов крутящего момента КНБК, описанных выше в уравнениях (e91) и (e92).

Когда система КНБК испытывает вибрации при прерывистом перемещении, наблюдаются большие изменения в крутящем моменте и RPM. Поэтому склонность системы к прерывистому перемещению может вычисляться или предсказываться путем изучения уклона графика индекса крутящего момента (и/или графика индекса бокового усилия) относительно скорости вращения. Взятие производной уравнения (e97') относительно скорости вращения ω_0 дает уравнение (e99)

$$\frac{d}{d\omega_0}(\tau) = \frac{d}{d\omega_0}(r\mu N) \quad (e99)$$

Допуская, что τ не является функцией скорости вращения, получаем уравнение (e99')

$$\frac{d\tau}{d\omega_o} = r\mu \frac{dN}{d\omega_o} + rN \frac{d\mu}{d\omega_o} \quad (e99')$$

В уравнении (e99')

$$\frac{dN}{d\omega_o}$$

является уклоном индекса бокового усилия и может определяться с использованием различных способов для численного расчета, например разности второго порядка или кусочной регрессии. Если отсутствуют ослабляющие скорость воздействия, то μ можно предположить постоянным значением, и уравнение (e99') сокращается до уравнения (e99'')

$$\frac{d\tau}{d\omega_o} = r\mu \frac{dN}{d\omega_o} \quad (e99'')$$

Уравнение (e99'') описывает отношение между (1) изменением в боковом усилии в сравнении с RPM и (2) изменение в крутящем моменте в сравнении с RPM. При эксплуатации, когда возникают события прерывистого перемещения, это обычно распознается путем выявления изменений в RPM и крутящем моменте. Соответственно, тенденцию к прерывистому перемещению можно предсказать путем моделирования изменения в крутящем моменте относительно изменения в RPM и/или путем моделирования изменения в боковых усилиях относительно изменения в RPM. Там, где боковое усилие является значением, вычисленным непосредственно с помощью описанных выше моделей, боковое усилие может быть предпочтительным в некоторых реализациях. Суммарный индекс общего бокового усилия КНБК, описанный выше, является суммой всех точек контакта для заданной конфигурации КНБК, представленной заменителем КНБК. Аналогичным образом, суммарный индекс полного крутящего момента КНБК является суммой всех точек контакта, представленных заменителем КНБК. Любой может использоваться, но оставшаяся часть этого обсуждения будет ссылаться на боковое усилие и угловой коэффициент бокового усилия. Угловой коэффициент крутящего момента может быть реализован по аналогии с индексом бокового усилия. В качестве альтернативы может быть предпочтительно изучить боковое усилие и угловой коэффициент бокового усилия в каждой точке контакта в отдельности. Вместе эти угловые коэффициенты бокового усилия и крутящего момента вследствие этого могут называться индексами прерывистого перемещения относительно одного из многих применений и реализаций.

Фиг. 5 показывает типовой график индекса общего бокового усилия КНБК в зависимости от скорости вращения с 3 выявленными областями: (1) область с увеличивающимся уклоном, (2) область с постоянным уклоном и (3) область с уменьшающимся уклоном. Хотя величина суммарного бокового усилия является одной информативной эксплуатационной характеристикой вибрации, уклон индекса бокового усилия также может предоставить полезную диагностику. Угловой коэффициент бокового усилия может использоваться для сравнения относительных тенденций прерывистого перемещения у разных исполнений КНБК. Пример графика углового коэффициента бокового усилия на основе фиг. 5 показан на фиг. 6. Отметим, что в течение областей 1 и 3 из фиг. 5 уклон индекса бокового усилия ненулевой, приводя к ненулевым значениям в соответствующих областях графика углового коэффициента бокового усилия из фиг. 6. Любое отклонение бокового усилия от постоянного значения указывает повышенную вероятность для возникновения прерывистого перемещения. Соответственно, нанесение на график углового коэффициента бокового усилия в виде функции от RPM устанавливает возможные рабочие области, где прерывистое перемещение из-за точек контакта КНБК может увеличиться. Чтобы эффективно зафиксировать этот угловой коэффициент бокового усилия на одном графике для ряда условий эксплуатации, можно отобразить среднеквадратичное и максимальное значения, учитывающие все режимы и конечные отрезки. В качестве альтернативы угловой коэффициент бокового усилия можно отобразить и сравнить для конкретных интересующих точек контакта.

Чтобы дополнительно проиллюстрировать возможное использование углового коэффициента бокового усилия в предсказании тенденций вибрации при прерывистом перемещении, фиг. 7 иллюстрирует график 710, включающий первый угловой коэффициент 712 бокового усилия для первого заменителя КНБК и второй угловой коэффициент 714 бокового усилия для второго заменителя КНБК. Фиг. 7 также указывает посредством стрелки 716 нужный рабочий диапазон. Хотя первый угловой коэффициент 712 бокового усилия имеет области с гораздо большими уклонами бокового усилия, в области нужного рабочего диапазона 716 первый угловой коэффициент бокового усилия по существу равен нулю, не указывая практически никакого изменения в боковых усилиях в рабочем диапазоне. Это указывало бы низкую склонность к вызванному КНБК прерывистому перемещению в нужном диапазоне скорости вращения. В отличие от этого второй угловой коэффициент 714 бокового усилия для второго заменителя КНБК имеет колебания в боковых усилиях, указанные ненулевым угловым коэффициентом бокового усилия, на всем диапазоне вращения, включая нужный рабочий диапазон. Для нужного указанного рабочего диапазона первый заменитель КНБК был бы лучшим выбором, поскольку он обладает относительно меньшими угловыми коэффициентами бокового усилия в нужном рабочем диапазоне. Хотя фиг. 7 иллюстрирует ис-

пользование графика углового коэффициента бокового усилия для сравнения двух заменителей КНБК, угловой коэффициент бокового усилия также может использоваться для выявления предпочтительных рабочих диапазонов для данного заменителя КНБК.

В некоторых реализациях ослабляющие скорость воздействия могут учитываться с использованием уравнения (e99) и реализации подходящего отношения для коэффициента трения и скорости вращения. Ослабляющие скорость воздействия характеризуют тенденцию силы сопротивления в зависимости от скорости. Когда скорость системы увеличивается, влияние силы сопротивления уменьшается. Наоборот, когда скорость система уменьшается, величина силы сопротивления увеличивается. Поскольку направление силы сопротивления всегда противоположно направлению движения, результатом является неустойчивость в системе, и этот эффект описывает неустойчивый характер явлений прерывистого перемещения. Когда величина силы сопротивления увеличивается для уменьшающейся скорости, система имеет повышенную вероятность возбуждения прерывистого перемещения. Из-за связи между скоростью и сопротивлением можно легко разработать подходящее уравнение для представления той связи. Уравнение может учитывать факторы, например конфигурацию компонентов, материалы компонентов и/или покрытия и т.д., которые могут быть постоянными или функциями некоторого другого фактора.

В качестве другого примера полезности индекса прерывистого перемещения также может вычисляться абсолютное значение углового коэффициента бокового усилия, и область под этой кривой может вычисляться для измерения относительной тенденции прерывистого перемещения заменителя КНБК с помощью одного числа. Это число могло бы использоваться для простого определения КНБК с наименьшей склонностью к вызванной КНБК вибрации из-за прерывистого перемещения. Как и выше, некоторые реализации могут рассматривать область под кривой углового коэффициента бокового усилия для всего анализируемого диапазона скоростей вращения или только для ограниченного диапазона, соответствующего нужным условиям эксплуатации.

Предшествующее обсуждение индексов прерывистого перемещения рассматривало в основном угловые коэффициенты бокового усилия на основе индекса общего бокового усилия КНБК, который обычно является суммой всех боковых усилий, приложенных к заменителю КНБК, как правило, в компонентах стабилизатора. Дополнительно или в качестве альтернативы вышеприведенные изучения и варианты можно вычислить, рассматривая боковое усилие одиночной точки контакта путем отображения результатов для местоположений бокового усилия выбранной точки контакта или для разных конфигураций КНБК. Эти результаты дали бы инженеру или аналитику возможность установить, какое положение точки контакта и/или конфигурация вносит наибольший вклад в общую вызванную КНБК тенденцию прерывистого перемещения, и дали бы возможность идентификации наилучшего места для размещения расширителя с цилиндрическими шарошками или другой технологии уменьшения трения.

В некоторых реализациях настоящих способов эксплуатационные характеристики вибрации вычисляются некоторое количество раз для ряда скоростей вращения и нагрузок на долото для каждой моделируемой конфигурации КНБК с использованием заменителя КНБК. В качестве одного примера меняющихся условий эксплуатации, которые могут повлиять на индексы, разные режимы возбуждения в режиме изгибания можно представить с помощью разных частот приложенной к долоту силы. В качестве другого показательного примера неопределенность в узловой точке сверху заменителя КНБК можно решить посредством вычисления динамических результата для ряда "конечных отрезков" узловой точки для обоих режимов изгибания и кручения. Эти итерации дают несколько значений эксплуатационной характеристики вибрации для каждой скорости вращения и/или нагрузки на долото. В некоторых реализациях может быть подходящим уменьшить эти разные значения индекса до среднеквадратичного значения и максимального значения, чтобы упростить анализ и отображение этих результатов. В других реализациях множество индексов может объединяться или усредняться с использованием весового коэффициента, предназначенного для представления степеней значимости. Например, весовой коэффициент может указывать вероятность того, что конкретные режимы возбуждения будут вносить вклад в вибрации с большей степенью, чем другие режимы возбуждения. Дополнительно или в качестве альтернативы весовой коэффициент может указывать вероятность того, что конкретный конечный отрезок в заменителе КНБК является более характерной для реальной конфигурации КНБК. Эти способы учета многочисленных переменных в моделях вибрации КНБК описываются в этом документе; другие способы доступны и входят в объем настоящего раскрытия изобретения.

В качестве одного примера среднеквадратичное эксплуатационной характеристики вибрации может задаваться уравнением (e100)

$$PI' = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (PI)_{ij}^2} \quad (e100)$$

в котором PI' - среднеквадратичное нужной эксплуатационной характеристики вибрации, а $(PI)_{ij}$ - один из индексов, заданных в уравнениях (e85)-(e92) или (e95), или выведенных из уравнений (e99)-(e99") для i -го из m режимов возбуждения и j -й из n конечных отрезков КНБК в заменителе КНБК.

Максимальное значение эксплуатационной характеристики вибрации можно задать уравнением (e101)

$$PI' = \max_{i=1}^m \{ \max_{j=1}^n (PI)_{ij} \} \quad (e101)$$

в котором PI' - максимальное значение нужной эксплуатационной характеристики вибрации, а $(PI)_{ij}$ - один из индексов, заданных в уравнениях (e85)-(e92) или (e95), или выведенных из уравнений (e99)-(e99'') для i -го из m режимов возбуждения и j -й из n конечных отрезков КНБК в заместителе КНБК.

Как упоминалось выше, среднеквадратичное значение и максимумы для эксплуатационных характеристик вибрации являются лишь типовыми способами оценивания индексов с учетом переменных, например конечных отрезков и режимов возбуждения. Другие способы могут взвешивать одно или несколько влияний режима возбуждения и воздействий конечного отрезка. Такое взвешивание может меняться по опыту или решению оператора. Дополнительно или в качестве альтернативы такое взвешивание может применяться вместе с отображением в каротажном режиме в настоящем раскрытии изобретения, упомянутом выше. Формат отображения в каротажном режиме полнее описывается ниже. Использование весовых коэффициентов, имеющих отношение к отображению в каротажном режиме дисплей и измеренной характеристике при вычислении эксплуатационных характеристик вибрации будет полнее описываться ниже применительно к описанию каротажного режима.

Системы моделирования.

В качестве одного типового варианта осуществления описанные выше способы могут быть реализованы в системе моделирования, которая показана на фиг. 8. Фиг. 8 - типовой вариант осуществления системы 800 моделирования, содержащей различные элементы и компоненты, используемые для моделирования характеристики КНБК, для вычисления результатов и для отображения результатов вычислений заместителей КНБК (например, имитированных результатов вычисленных данных в графической или текстовой форме). Система 800 моделирования может включать в себя компьютерную систему 802, которая содержит процессор 804, модуль 806 передачи данных, монитор или модуль 808 отображения, одну или несколько программ 810 моделирования (например, процедуры, приложения или набор машиночитаемых команд) и данные 812, сохраненные в запоминающем устройстве 814 в виде файлов или других структур хранения. Компьютерная система 802 может быть традиционной системой, которая также включает в себя клавиатуру, мышь и другие интерфейсы пользователя для взаимодействия с пользователем. Аналогичным образом, модуль 808 отображения может быть традиционным монитором или может быть любым другим подходящим устройством для обеспечения визуального вывода результатов, например принтером. Программы 810 моделирования могут включать в себя код, сконфигурированный для выполнения описанных выше способов, тогда как данные 812 могут включать в себя измеренные данные, результаты, вычисленные данные, рабочие параметры, заместители КНБК, включающие информацию и/или данные о конструкциях КНБК, размерах, материалах и т.д., и/или другую информацию, используемую в описанных выше способах. Конечно, запоминающее устройство 814 может быть любым традиционным типом машиночитаемого хранилища, используемого для хранения приложений и данных, которое может включать в себя жесткие диски, карты памяти, гибкие диски, CD-ROM и другие оптические носители, магнитную ленту и т.п.

Так как компьютерная система 802 может взаимодействовать с другими устройствами, например клиентскими устройствами 816a-816n, модуль 806 передачи данных может конфигурироваться для взаимодействия с другими устройствами по сети 818. Например, клиентские устройства 816a-816n могут включать в себя компьютерные системы или другие процессорные устройства, которые обмениваются данными, например программой 810 моделирования и данными 812, с компьютерной системой 802. В частности, клиентские устройства 816a-816n могут ассоциироваться с буровым оборудованием в местоположении буровой скважины или могут располагаться в административном здании и использоваться для построения заместителей КНБК, характерных для оцениваемых конфигураций КНБК. Так как эти устройства могут быть расположены в разных географических местоположениях, например разных офисах, зданиях, городах или странах, сеть 818 может использоваться для обеспечения взаимодействия между разными географическими местоположениями. Сеть 818, которая может включать в себя разные сетевые устройства, например маршрутизаторы, коммутаторы, мосты, может включать в себя одну или несколько локальных сетей, глобальных сетей, серверов-хранилищ, городских сетей или сочетание этих разных типов сетей. Возможность соединения и использование сети 818 устройствами в системе 800 моделирования понятно специалистам в данной области техники. Хотя сеть 818 и клиентские устройства 816 могут использоваться применительно к компьютерной системе 802, некоторые реализации могут выполнять все этапы моделирования и вычисления с помощью одной компьютерной системы 802.

Чтобы использовать систему моделирования, пользователь может взаимодействовать с программой 810 моделирования через графические интерфейсы пользователя (GUI), которые описываются на различных видах экрана на фиг. 9, 10A-10D, 11A-11B, 12, 13, 14A-14B, 15, 16, 17, 18A-18B, 19A-19C, 20A-20B, 21A-21E, 23A-23D, 24, 25 и 26. Посредством видов экрана или прямого взаимодействия пользователь может запускать программу моделирования для выполнения описанных выше способов. Например, модельные результаты могут формироваться для различных заместителей КНБК и определенных условий эксплуатации, например типовой вывод на этих чертежах. Результаты могут быть графически сведены в

таблицу или отображены одновременно для прямого сравнения разных заменителей КНБК. Соответственно, фиг. 9, 10А-10D, 11А-11В, 12, 13, 14А-14В, 15, 16, 17, 18А-18В, 19А-19С, 20А-20В, 21А-21Е, 23А-23D, 24, 25 и 26 являются типовыми видами экрана программы моделирования в соответствии с некоторыми особенностями настоящих методик. Так как виды экрана ассоциируются с системой 800 моделирования, фиг. 9, 10А-10D, 11А-11В, 12, 13, 14А-14В, 15, 16, 17, 18А-18В, 19А-19С, 20А-20В, 21А-21Е, 23А-23D, 24, 25 и 26 можно лучше понять путем одновременного просмотра фиг. 8 и фиг. 9, 10А-10D, 11А-11В, 12, 13, 14А-14В, 15, 16, 17, 18А-18В, 19А-19С, 20А-20В, 21А-21Е, 23А-23D, 24, 25 и 26. Дополнительно следует отметить, что различные строки меню, виртуальные кнопки и виртуальные ползунки, которые могут работать сходным образом, могут использовать одинаковые номера ссылок на разных видах экрана для простоты в обсуждении ниже. Хотя фиг. 9, 10А-10D, 11А-11В, 12, 13, 14А-14В, 15, 16, 17, 18А-18В, 19А-19С, 20А-20В, 21А-21Е, 23А-23D, 24, 25 и 26 и ассоциированное описание в этом документе описывают конкретную систему и программу моделирования, такие чертежи и описания являются всего лишь типовыми, и описанные выше способы и модели могут быть реализованы различными способами. Аналогичным образом следует отметить, что данные и значения, представленные в типовых видах экрана на фиг. 9, 10А-10D, 11А-11В, 12, 13, 14А-14В, 15, 16, 17, 18А-18В, 19А-19С, 20А-20В, 21А-21Е, 23А-23D, 24, 25 и 26, предназначены только для примера и не основываются на реальных эксплуатационных данных. Абсолютные и относительные значения различных выходных данных и графиков предназначены для обсуждения и примера и могут отличаться от показанных, когда реализуются настоящие способы.

На фиг. 9 показан вид 900 экрана начального изображения для типовой программы моделирования. В этом виде 900 экрана представлены первая виртуальная кнопка 902 и вторая виртуальная кнопка 904 вместе с пунктами меню в строке 906 меню. Первая виртуальная кнопка 902, которая обозначена как "Design Mode" (расчетный режим), выбирается пользователем для запуска программы 810 моделирования, чтобы моделировать один или несколько заменителей КНБК для предсказания характеристики вибрации, включающей вычисленные переменные состояния и эксплуатационные характеристики вибрации. В типичных применениях расчетный режим используется для сравнения альтернативных заменителей КНБК, чтобы оптимальный заменитель КНБК можно было использовать для процесса бурения. Виды экрана, ассоциированные с расчетным режимом, представлены на фиг. 9, 10А-10D, 11А-11В, 12, 13, 14А-14В, 15, 16, 17, 18А-18В, 19А-19С, 20А-20В, 21А-21Е. Вторая виртуальная кнопка 904, которая обозначена как "Log Mode" (каротажный режим), может выбираться для запуска программы 810 моделирования в каротажном режиме, который сравнивает измеренные данные из буровой работы с одним или несколькими вычисленными результатами из моделированных заменителей КНБК, которые могут работать при аналогичных условиях эксплуатации (например, рабочих параметрах) и могут содержать компоненты и признаки, по меньшей мере, существенно похожие на представленные заменителем компоновки низа буровой колонны. В каротажном режиме измеренные данные, которые могут включать в себя данные, выведенные из измеренных данных из одного или нескольких интервалов бурения, представляются параллельно с предсказаниями по модели, чтобы оценить индексы относительно фактических данных. Виды экрана, характерные для каротажного режима, представлены на фиг. 23А-23D, 24, 25 и 26. Пункты меню в строке 906 меню могут включать в себя пункт "Open/Change Project" (открыть/изменить проект), чтобы выбрать существующий заменитель КНБК, или пункт "New Project" (новый проект), который может инициализировать новый заменитель КНБК, который может быть выражен в английских или метрических единицах, как указано в подменю.

Если выбирается расчетный режим, то представляется вид 1000 экрана с пустой панелью, как показано на фиг. 10А. Вкладки меню в строке 1002 меню являются типичной вкладкой меню "File" (Файл), чтобы разрешить команды печати, настройки печати и выхода, и вкладкой конфигурационного меню, обозначенной как "Config" (конфигурация). Вкладка конфигурационного меню вызывает панель конфигурации, которая показана на фиг. 10В. Строка 1002 меню также может включать в себя один или несколько процессов расчетного режима, например "ВНА" (КНБК), "Static States" (статические состояния), "Index 2D" (двумерные индексы), "Index 3D" (трехмерные индексы), "Flex Dynamics" (динамика изгиба), "Twirl Dynamics" (динамика кручения) и "Help" (помощь). Эти разные пункты меню процессов более подробно объясняются ниже, но идея обработки состоит в применении каждого из этих способов к выбранным заменителям КНБК, для которых отмечены флажки 1007а-1007f. Каждый процесс задействует экранные элементы управления и данные отображения, которые необходимы для выполнения процесса, в этом смысле вид 1000 экрана можно считать "контекстно-зависимым".

Также виртуальные кнопки 1006А-1006F могут использоваться для доступа и изменения разных заменителей КНБК. В этом примере две виртуальные кнопки, 1006а и 1006b, ассоциируются с соответствующими заменителями КНБК "А" и "В", тогда как виртуальные кнопки 1006с-1006f не имеют ассоциированных с ними заменителей КНБК. Более того, виртуальные флажки 1007а-1007f после названий заменителей КНБК могут использоваться для включения определенных заменителей КНБК как часть процессов вычислений для сравнения заменителей КНБК. Как указано в этом примере, заменитель КНБК "А", который может называться заменителем А КНБК, и заменитель КНБК "В", который может называться заменителем В КНБК, нужно сравнить на разных видах экрана, предоставленных ниже.

Как показано на фиг. 10В, если вкладка меню "Config" выбирается из строки 1002 меню, то вид 1010 экрана может быть представлен для задания соответствующих рабочих параметров для процесса моделирования, который описан ниже. В виде 1010 экрана вкладки меню в строке 1012 меню могут использоваться для настройки трубы по умолчанию, стабилизатора и свойств материала для вставки новых компонентов КНБК в панель конструкции КНБК. Строка 1012 меню может включать в себя вкладку файлового меню (обозначенную как "File")/ вкладку меню обновления (обозначенную как "Refresh") и вкладку меню значений по умолчанию (обозначенную как "Defaults"), которая может включать в себя различные подменю для разных типов труб, стабилизаторов и материалов. В частности, для этого типового вида 1010 экрана различные значения конструкции КНБК и рабочих параметров представлены и могут быть изменены в текстовых полях 1014. Текстовые поля 1014 включают в себя номинальный диаметр скважины в дюймах (in); наклон скважины в градусах (deg); плотность жидкости в фунтах на галлон (ppg); диапазон WOB в килофунтах (klb); диапазон скорости вращения в RPM; диапазон режимов возбуждения; граничное условие статической конечной точки (например, смещенное или центрированное); граничное условие в долоте для динамического сгибания; модель стабилизатора (шарнирная или неподвижная); количество конечных отрезков; и увеличение конечного отрезка в футах (ft). Для проектов, которые заданы в метрических единицах, могут использоваться соответствующие метрические единицы. В качестве альтернативы способ может быть приспособлен к произвольной системе единиц в зависимости только от программной реализации.

В альтернативном варианте осуществления конфигурационный файл может дополнять угол наклона скоростью изменения угла наклона для искривленных стволов скважин. В более общем смысле для трехмерных моделей также может включаться скорость изменения азимутального угла. Кроме того, файл обследования ствола скважины может быть распознан и считан программой, чтобы предоставить входные данные для моделирования определенного бурильного применения.

Описание для каждого из заменителей КНБК может представляться из вкладок 1006а-1006г конструкции КНБК на фиг. 10А. В качестве одного примера фиг. 10С является типовым видом 1020 экрана конфигурационной панели для описания заменителя А КНБК, к которому обращаются путем выбора вкладки 1006а конструкции КНБК. Вид 1020 экрана включает в себя разные блоки 1021 управления для определенного заменителя КНБК, например название "А" заменителя КНБК, назначенный цвет "dark gray", тип линии "solid" и ширину линии "2". К тому же дополнительное текстовое поле 1022 может использоваться для дополнительной информации или комментариев о создаваемом и моделируемом заменителе КНБК, например "building bha" (создание КНБК). Строка 1012 меню конструкции КНБК содержит пункт меню "bha i/o" (ввод/вывод КНБК) для облегчения импорта и экспорта описаний модели КНБК, меню "defaults" для локального выбора трубы по умолчанию, стабилизатора и свойств материала, меню "add.comp" для добавления нескольких элементов вверх описания модели, и меню "view" (просмотр), чтобы дать возможность прокрутки отображения для доступа к компонентам КНБК, невидимым в текущем окне.

Виртуальные кнопки 1026, 1027 и 1028 вместе с полями 1029 ввода предоставляют механизмы для изменения расположения в КНБК для определенного заменителя КНБК. Компоненты и оборудование могут вставляться и удаляться из выбранного расположения КНБК путем нажатия соответствующих виртуальных кнопок, которые включают в себя виртуальную кнопку 1026 вставки, обозначенную как "ins", и виртуальную кнопку 1027 удаления, обозначенную как "del". Виртуальные кнопки 1028 указывают порядковый номер элемента и то, является ли элемент трубой или стабилизатором, что может указываться цветами (например, светло- или темно-серым) и/или текстом (например, "stab" или "pipe"). Нажатие на одну из виртуальных кнопок 1028 переключает элемент с трубы на стабилизатор, или наоборот. Выбранный в настоящее время тип трубы или стабилизатора по умолчанию устанавливается для нового переключаемого элемента. Поля 1029 ввода инициализируются меткой соответствующей таблицы входных данных, которая считывается из файла, например файла Microsoft Excel™, или могут изменяться путем ввода данных непосредственно в текстовое поле. Путем печати поверх полей 1029 ввода список может настраиваться пользователем. Нажатие правой кнопкой мыши на одно из полей 1029 ввода вызывает всплывающее меню для выбора любого из уже существующих элементов этого типа, после чего значения для OD, ID и других параметров могут быть предварительно заполнены. Любое из полей 1029 ввода затем может быть изменено после инициализации таким образом, чтобы обеспечить полную настройку компонентов КНБК.

В дополнение к заданию расположения заменителя КНБК вид 1020 экрана включает в себя информацию о материале для каждого компонента в заменителе КНБК, как показано в текстовых полях 1024. В этом характерном примере текстовые поля 1024 включают в себя внешний диаметр (OD), внутренний диаметр (ID), длину (len), общую длину (totlen), момент инерции (mom.iner), вес в воздухе (wt), общий вес в воздухе (totwt), длину горловины (neck.len), длину лопасти (blade.len), длину штифта (pin.length), диаметр стабилизатора или зазор недомера лопасти (blade/ug), процент пропускного сечения лопасти (openarea), коэффициент трения лопасти для вычисления крутящего момента из контактного бокового усилия (bladefric) и материал (matl). Общая длина, общий вес и момент инерции вычисляются программой моделирования, а не пользователем, тогда как другие текстовые поля 1024 могут редактироваться

пользователем. Дополнительно, чтобы моделировать необычные компоненты, можно перезаписать вычисленное значение веса для заданного компонента. Например, если общий вес компонента известен, то его можно ввести в соответствующее текстовое поле 1024 напрямую, чтобы заменить значение в заменителе КНБК. Программа моделирования может регулировать плотность материала, чтобы подобрать значение, введенное пользователем, на основе OD, ID и общей длины компонента. Эта особенность может быть полезной при согласовании значений жесткости и массы для компонентов, которые могут быть только приближенно выражены из-за некоторых геометрических факторов (например, раздвижной буровой расширитель с вооружением, расположенным над резьбовой заглушкой). Т.е. значения инерции и жесткости могут быть согласованы, даже если геометрия может быть не правильно представлена с помощью простого цилиндрического объекта. Таким образом, может формироваться эквивалентная цилиндрическая секция для приближенного вычисления динамических характеристик реального бурильного компонента.

Программа моделирования может включать в себя различные ограничения на расстановку определенных компонентов в расположении КНБК. Например, КНБК могут начинаться с элемента бурового долота и заканчиваться отрезком трубы. Аналогичным образом стабилизаторам может быть разрешено быть верхним компонентом в расположении КНБК.

В качестве другого примера фиг. 10D является типовым видом 1030 экрана конфигурационной панели для описания заменителя В КНБК, к которому обращаются путем выбора вкладки 1006b конструкции КНБК. Вид 1030 экрана включает в себя разные блоки 1031 управления, например название "В" определенного заменителя КНБК, назначенный цвет "light gray", тип линии "dash" и ширину линии "3". К тому же описательный комментарий может предоставляться в текстовом поле 1032. Вид 1030 экрана включает в себя такие же виртуальные кнопки 1026 и 1027, как фиг. 10D, в дополнение к виртуальным полям 1038 и текстовым полям 1034 и 1039, которые характерны для задания заменителя В КНБК. В этом характерном примере разница между А и В состоит в наддолотном стабилизаторе в заменителе А КНБК. Этот компонент стремится увеличить угол наклона ствола скважины для заменителя А КНБК, тогда как отсутствие этого компонента стремится понизить угол для заменителя В КНБК, как подробнее описано ниже. Как только заданы параметры и расположение для заменителей КНБК, заменители КНБК могут проверяться пользователем путем просмотра графических или текстовых изображений заменителя КНБК, как показано на фиг. 11А и 11В.

Фиг. 11А - вид 1100 экрана с графическими изображениями 1102 и 1104 разных заменителей КНБК, который получен путем выбора меню 1003 "ВНА - Draw" (КНБК - чертеж). В этом виде 1100 экрана отображаются заменитель А КНБК и заменитель В КНБК. Отображаемые заменители КНБК идентифицируются по ссылке на вкладки 1006a-1006b конструкции КНБК и ассоциированным виртуальным флажкам 1007a и 1007b. В частности, графическое изображение 602 ассоциируется с заменителем А КНБК, а графическое изображение 604 ассоциируется с заменителем В КНБК. Вкладки 1006a-1006b конструкции КНБК работают способом, описанным по отношению к фиг. 10, чтобы позволить пользователю изменять конфигурацию заменителя КНБК.

На фиг. 11А виртуальные ползунки 1105-1107 могут использоваться для регулировки вида вдоль различных отрезков заменителей КНБК. В настоящем варианте осуществления виртуальные ползунки показаны в виде трех отдельных ползунков, один для управления левой или верхней границей окна, один для управления правой или нижней границей окна, и центральный ползунок для перемещения текущего окна с неизменным отверстием вдоль соответствующих осей наборов данных. Возможны другие ползунки без отклонения от этих функциональных возможностей по обработке данных.

Фиг. 11В представляет другую графическую иллюстрацию заменителя КНБК, на этот раз при имитированных статических условиях, применяющих статические вычисления. Вид, представленный на фиг. 11В, можно увидеть путем выбора вкладки 1004 меню "Static States - Draw" (Статические состояния чертеж) из строки 1002 меню. На фиг. 11В вид 1110 экрана может включать в себя графические изображения 1112 и 1114 разных заменителей КНБК. Графические изображения 1112 и 1114 представляют статические отклонения, испытываемые заменителями КНБК из-за осевой нагрузки и силы тяжести. В этом виде 1110 экрана графическое изображение 1112 ассоциируется с заменителем А КНБК, а графическое изображение 1114 ассоциируется с заменителем В КНБК. Эти графические изображения 1112 и 1114 иллюстрируют КНБК, лежащую на нижней стенке буровой скважины, с долотом в левом конце компоновки. Виртуальные ползунки 1105-1107 и вкладки 1006a-1006b конструкции КНБК вместе с виртуальными флажками 1007a и 1007b могут работать, как обсуждалось выше на фиг. 11А. К тому же виртуальные ползунки 1116 и 1118 могут использоваться для регулировки WOB и угла наклона. В некоторых реализациях, когда регулируются виртуальные ползунки 1116, 1118 и другие аналогичные компоненты, то соответствующие значения, отображаемые в панели "Config" на фиг. 10В, могут обновляться для синхронизации различных компонентов программы моделирования, которые используют такие же значения набора данных. После изменения другие вычисления результатов и изображения используют обновленные значения, которые выбраны. В некоторых реализациях виртуальные ползунки 1116 и 1118 могут конфигурироваться для разрешения оператору наблюдать влияние некоторых изменений перед их сохранением обратно в конфигурационный файл для синхронизации с другими компонентами программы.

Например, некоторые особенности программы, включая некоторые из моделирования и вычислений, могут отнимать много времени и/или загружать процессоры компьютерных систем. Соответственно, эффективность может быть повышена, если позволить пользователю видеть влияние изменения на ограниченный набор вычислений и ассоциированные выходные изображения перед обновлением всех вычислений, допускающих выполнение в соответствии с настоящими способами и системами.

Хотя фиг. 11А и 11В предоставляют типовые способы иллюстрации конфигурации заменителя КНБК, различные другие способы и изображения могут быть реализованы для преобразования входных данных заменителя КНБК из фиг. 10С и 10D в визуальные изображения. Визуальное, графическое представление заменителя КНБК может обеспечить быстрое ознакомление с конфигурацией для рассмотрения параллельно с различными диаграммами и сравнениями, которые описываются ниже. Например, при работе со многими проектными решениями для заменителей КНБК можно потерять связь, какая конфигурация или заменитель КНБК ассоциируется с определенными цветами и типами линий, используемых в изображениях результатов моделей. Чтобы интерпретировать результаты на экране, часто необходимо снова обращаться к описаниям КНБК для связи результатов с моделями КНБК. Фиг. 12 предоставляет типовой вид 1210 экрана, иллюстрирующий четыре разных графика индексов для двух заменителей КНБК. Функциональные возможности различных ползунков и специфика графиков индексов описываются где-то в другом месте в этом документе. Фиг. 12 иллюстрирует, что окно, включающее функциональные возможности, описанные в этом документе, может дополнительно конфигурироваться для включения схемы 1212 КНБК. В частности, небольшая часть экрана 1210 выделена для включения графического представления 1212 заменителя КНБК. Экран 1210 на фиг. 12 включает в себя только достаточно места для одной схемы 1212 КНБК, хотя некоторые реализации можно приспособить для отображения более одной схемы КНБК. Когда отображаются схемы не для всех моделируемых заменителей КНБК, экран 1210 может включать в себя кнопку 1214 выбора схемы, которая может находиться рядом со схемой 1212. В результате нажатия на кнопку 1214 выбора схемы экран может чередовать каждый из выбранных заменителей КНБК. Фиг. 12 предоставляет один типовой способ иллюстрации конфигурации заменителя КНБК. Дополнительно или в качестве альтернативы, кнопка на экране или элемент выбора меню могут использоваться для вызова всплывающего экрана, который может включать в себя графические схемы 1212 одного или нескольких заменителей КНБК, которые могут иметь размер меньше выходного экрана дисплея.

Фиг. 12 дополнительно иллюстрирует, что каждый из графиков на экране 1210 дисплея может показывать данные касательно разных состояний и/или индексов. Например, график 1216 изображает результаты вычислений индекса энергии деформации КНБК для вибраций в режиме изгиба, график 1218 изображает результаты вычислений индекса переданной энергии деформации для вибраций в режиме изгиба, график 1220 изображает результаты вычислений индекса энергии деформации КНБК для вибраций в режиме кручения, и график 1222 изображает результаты вычислений индекса кривизны конечной точки для вибраций в режиме изгиба. Дополнительно или в качестве альтернативы, как показано на фиг. 12, разные графики 1216-1222 могут конфигурироваться для показа объединенных индексов, например среднеквадратичных индексов или максимальных индексов, сформированных посредством моделирования заменителей КНБК с отличающимися кратными числами скорости вращения и различными конечными отрезками, например описанными выше. График 1218, например, изображает максимальные результаты 1224 и среднеквадратичные результаты 1226 индекса переданной энергии деформации для вибрации в режиме изгиба. Более того, системы и способы из настоящего раскрытия изобретения могут быть приспособлены для вычисления и отображения результатов для определенных кратных чисел скорости вращения и/или конечного отрезка. График 1216 из фиг. 12 иллюстрирует одну реализацию этого способа, который наносит на график результаты для среднеквадратичного 1228, однократной (1X) скорости 1230 вращения и трехкратной (3X) скорости 1232 вращения. Вычисление и отображение результатов для состояний и индексов при каждом из кратных скоростей вращения и/или конечных отрезков, при реализации, могут дать возможность всестороннего анализа и/или сравнений между несколькими предложенными заменителями КНБК и/или между имитированным заменителем КНБК и измеренными условиями во время буровых работ.

Фиг. 13 иллюстрирует дополнительные признаки, которые можно встроить в реализации в рамках настоящего раскрытия изобретения. Фиг. 13 иллюстрирует выходное изображение 1310, аналогичное нескольким другим изображениям, описанным в этом документе; признаки наряду с другими чертежами и описанными где-то в другом месте в этом документе, работают как описано. Фиг. 13 также включает в себя типовое представление панели 1312 управления графикой. Для эффективности в использовании программы и интерпретации результатов модели, панель 1312 управления графикой может быть разработана и реализована для облегчения настройки выходного изображения. Например, разные индексы и/или состояния могут выбираться для отображения из результатов модели. Дополнительно или в качестве альтернативы могут выбираться варианты, например, нужно ли и как нормализовать результаты. Аналогичным образом, панель управления графикой может позволить пользователю выбирать, отображать ли среднеквадратичное значение, максимальное значение или определенное кратное скорости вращения, например указанное кнопками выбора и ассоциированными числами 1318. Некоторые реализа-

ции могут включать в себя варианты для разрешения пользователю менять цвет, шаблон, вес или другую особенность отображения для улучшения понятности результатов. Панель 1312 управления графикой может конфигурироваться для разрешения пользователю менять конфигурацию отображения любым из различных способов. Например, некоторые реализации могут убирать ползунки с основного экрана дисплея и встраивать их в панель 1312 управления графикой. В некоторых реализациях система выполняла бы вычисления для каждого из выбранных заменителей КНБК, и вывод или результаты для вычислений отображаются выборочно в соответствии с предпочтениями пользователя в панели 1312 управления графикой. В типовой панели 1312 управления графикой пользователь может задавать данные, которые нужно отобразить в каждой части окна дисплея. Например, панель 1312 управления графикой включает в себя четыре области 1314a-1314d выбора выходного изображения, соответствующие четырем областям 1316a-1316d выходного изображения на основном экране дисплея.

Как обсуждалось по отношению к фиг. 13, некоторые реализации настоящих систем и способов могут включать в себя варианты нормализации. Системы и способы, описанные в этом документе, в основном предназначены для использования в проектировании компоновок низа бурильной колонны, проектировании буровых работ для использования с компоновками низа бурильной колонны и/или диагностики или анализа характеристики компоновки низа бурильной колонны и/или ее работы. Один эффективный способ такого проектирования и/или анализа проходит через сравнения, которые могут проводиться между двумя предложенными заменителями КНБК или между заданным заменителем КНБК и работой базового заменителя КНБК, установленной в качестве целевой характеристики или приемлемой характеристики. Процедура нормализации может устанавливаться для облегчения процесс анализа и/или сравнения конструкции. Доступны различные варианты нормализации; неисчерпывающие примеры предоставляются в этом документе, и другие могут использоваться аналогичным образом.

В качестве одного примера варианта нормализации любое из различных вычислений или индексов, описанных в этом документе, может иметь минимальное значение, которое может устанавливаться либо по работоспособности, либо по предпочтению. Минимальное значение результатов для набора заменителей, которое нужно отобразить в каждой области графика, может быть установлено в 1, при этом каждое из вычислений и индексов для всех заменителей КНБК масштабируется относительно этого знаменателя. Дополнительно или в качестве альтернативы вычисления и/или индексы для заменителей КНБК могут быть масштабированы или нормализованы к целевому значению, которое может не быть минимальным значением. В сочетании с нормализацией около целевого значения отображенные на графике вычисления и/или индексы могут иметь цветную маркировку или помечаться иным образом, когда отклонение от целевого значения слишком большое, например, для указания недопустимых условий вибрации.

Дополнительно или в качестве альтернативы может быть реализована процедура "абсолютной" нормализации. Абсолютная нормализация масштабировала бы все вычисления и/или индексы заменителя КНБК относительно некоторых заранее вычисленных значений для каждого индекса или состояния. Например, если некоторая конфигурация КНБК стала проектно-конструкторским стандартом для некой рабочей зоны, то при стандартных рабочих параметрах (WOB и RPM) числовые результаты можно записать и использовать в качестве делителя. Тогда та КНБК имела бы значение 1 для каждого индекса при эталонных условиях. Все другие заменители КНБК тогда сравнивались бы с этим эталоном для каждого из индексов.

Также можно реализовать процедуры относительной нормализации. Одна реализация "относительной" нормализации устанавливала бы делитель так, что минимальное значение (допуская, что минимум нужен для заданного индекса или состояния) всех отображаемых конфигураций исполнения при текущих рабочих параметрах было бы равно 1. Тогда альтернативные исполнения и другие условия эксплуатации масштабировались бы относительно "наилучшего случая", представленного в текущих данных на экране. Например, при включенном стандарте КНБК в сравнения конструкций результаты были бы аналогичны абсолютной нормализации выше. В реализациях, где отображаются несколько состояний и/или индексов, процедура нормализации может настраиваться для применения разных процедур нормализации для разных состояний или индексов, например с использованием минимумов или максимумов в качестве делителя нормализации. В некоторых реализациях пользователь может выбирать процедуру нормализации, например посредством панели 1312 управления графикой. Дополнительно или в качестве альтернативы процедура нормализации может ассоциироваться с конкретным индексом или состоянием, так что выбор конкретного индекса применяет подходящую процедуру нормализации.

Фиг. 14А и 14В предоставляют примеры или дополнительные варианты нормализации для облегчения сравнения и анализа различных заменителей КНБК. Как видно в обсуждении выше, некоторые из состояний и/или индексов в настоящих способах меняются в зависимости от одного или нескольких параметров. Например, некоторые из эксплуатационных характеристик вибрации меняются в зависимости от скорости вращения. Так как скорость вращения постоянна при сравнении отличающихся заменителей КНБК при одинаковых условиях эксплуатации, результат вычислений для одного или нескольких индексов можно упростить путем вынесения скорости вращения за скобки. Характерные примеры показаны на фиг. 14А и 14В и описаны в этом документе; другие примеры будут полностью очевидны.

Изображения 1410 из фиг. 14А и 14В иллюстрируют четыре из связанных с кручением индексов,

описанных в этом документе: индекс 1412 энергии деформации КНБК, индекс 1414 переданной энергии деформации, индекс 1416 бокового усилия и индекс 1418 кривизны конечной точки. Как видно в обсуждении выше, индекс энергии деформации КНБК и индекс переданной энергии деформации меняются как четвертая степень скорости вращения. Фиг. 14А иллюстрирует, что относительно сложный график индексов энергии деформации можно упростить до линейного графика путем простого деления значения индекса на скорость вращения, возведенную в четвертую степень. Аналогичным образом фиг. 14В иллюстрирует, что индекс бокового усилия и индекс кривизны конечной точки, которые меняются как скорость вращения в квадрате, можно упростить до линейного графика путем деления значения индекса на скорость вращения в квадрате.

Продолжая с обсуждением типовых вариантов вывода изображения, доступных в системах, реализующих настоящие способы, фиг. 15 предоставляет типовое отображение значений состояния, соответствующих результатам статической модели в заменителях А и В КНБК, соответствующих отклонениям, отображаемым графически на фиг. 11В. Из вкладки меню статического состояния можно выбрать пункт меню, обозначенный как "States" (состояния), из строки 1004 меню, чтобы обеспечить вид 1120 экрана на фиг. 15. На фиг. 15 вид 1120 экрана представляет четыре состояния, относящихся к статическому условию и вычислениям, включая отображение 1122 смещения, отображение 1123 угла наклона, отображение 1124 изгибающего момента и отображение 1125 сдвигающей силы. Изображения 1122-1125 представляют заменитель А КНБК в виде сплошной линии, тогда как заменитель В КНБК представлен в виде более толстой пунктирной линии. Заменители КНБК в изображениях 1122-1125 измеряются в дюймах (in) для смещения, градусах (deg) для угла наклона, футо-фунтах (ft-lb) для изгибающего момента и фунтах (lb) для сдвигающей силы, и эти значения наносятся на график в зависимости от расстояния до бурового долота в футах (ft). Если единицы программы моделирования заданы в метрических или других единицах, эти значения можно отобразить в соответствующих единицах. Дополнительно или в качестве альтернативы изображения могут быть нормализованы, как обсуждалось выше, чтобы стать безразмерными. Три вертикальных ползунка 1126, 1127 и 1128 используются для увеличения масштаба до определенного диапазона по вертикальным осям графиков. Ползунки 1126-1128 могут быть выборочными для одного изображения (например, "текущего" набора осей) или могут управлять несколькими изображениями, имеющими общую вертикальную ось.

В некоторых реализациях настоящих способов и систем может определяться, что значения статического бокового усилия на долоте (расстояние до долота равно нулю) являются полезными значениями. Например, отрицательное боковое усилие на долоте стремится понизить угол наклона, тогда как положительное боковое усилие на долоте стремится увеличить угол наклона. Например, заменитель В КНБК имеет небольшое отрицательное боковое усилие на долоте, которое стремится понизить угол наклона, а заменитель А КНБК имеет большее положительное значение, которое стремится увеличить угол наклона. Фиг. 16 иллюстрирует типовое выходное изображение 1610 для облегчения сравнения и анализа одного или нескольких заменителей КНБК и соответствующих значений бокового усилия на долоте. Фиг. 16 предоставляет график 1612 угла скважины и график 1614 нагрузки на долото. Более того, вид 1610 экрана на фиг. 16 включает в себя виртуальные ползунки 1616 и 1618, сконфигурированные для разрешения пользователю выбирать базовый угол скважины и базовую нагрузку на долото. Базовая нагрузка на долото от ползунка 1618 используется в качестве текущей и постоянной нагрузки на долото в вычислениях для формирования графика 1612 угла скважины; базовый угол скважины от ползунка 1616 используется в качестве текущего и постоянного угла скважины в вычислениях для формирования графика 1614 нагрузки на долото.

В графике 1612 угла скважины на фиг. 16 боковое усилие на долоте отображается на графике для двух заменителей КНБК в зависимости от угла скважины, для справочной нагрузки на долото в 30 килофунтов, которая указана в ползунке 1618. Положительное боковое усилие указывает тенденцию роста, а отрицательное значение предлагает тенденцию падения. Пунктирная линия показывает увеличивающееся отрицательное боковое усилие, когда увеличивается угол наклона. Это является стабилизирующим влиянием для опускающейся компоновки и необходимо при бурении вертикальной скважины. Нарастающая КНБК (сплошная линия) имеет увеличивающееся положительное боковое усилие, которое указывает, что она будет стремиться продолжать наращивать угол скважины. График 1614 нагрузки на долото из фиг. 16 показывает изменение в боковом усилии на долоте, когда нагрузка на долото (WOB) меняется при угле скважины, показанном на ползунке 1616 в 1°. Эти линии относительно плоские, подсказывая небольшое колебание в направленной тенденции при изменениях WOB. Изображения, например на фиг. 16, предоставляют возможность оценить относительную направленную стабильность предложенных исполнений КНБК.

В дополнение к статическим вычислениям и анализу также могут выполняться динамические вычисления, как подробно описано выше. Например, два типа динамических вычислений могут называться режимом "изгиба" для изгибного динамического сгибания в поперечной плоскости и режимом "кручения" для вихревого движения, происходящего из-за воздействий эксцентрической массы. Другие примеры более подробно описываются выше. Эти разные динамические вычисления могут быть вариантами, предусмотренными в строке 1002 меню, которые могут вызываться с помощью вкладок меню "Flex Du-

amics" (динамика изгиба) и "Twirl Dynamics" (динамика кручения) соответственно. Дополнительно или в качестве альтернативы динамические вычисления и/или отображение результатов вычислений могут вызываться из панели управления графикой, например описанной выше.

В качестве примера фиг. 17 является типовым видом 1730 экрана графических изображений 1731-1734 на основе вычислений режима поперечного изгиба в режиме динамики изгиба. Вид 1730 экрана получается путем выбора "Flex Dynamics - Flex States" (динамика изгиба - состояния изгиба) из меню 1002. Эти графические изображения являются отображением 1731 смещения, отображением 1732 угла наклона, отображением 1733 изгибающего момента и отображением 1734 сдвигающей силы. Изображения 1731-1734 представляют заменитель А КНБК в виде сплошной линии, тогда как заменитель В КНБК представлен в виде более толстой пунктирной линии. Заменители КНБК в изображениях 1731-1734 вычисляются в дюймах (in) для смещения, градусах (deg) для угла наклона, футо-фунтах (ft-lb) для изгибающего момента и фунтах (lb) для сдвигающей силы по отношению к расстоянию до бурового долота в футах (ft). Однако единицы не отображаются, потому что эти значения вычисляются для произвольного справочного входного возбуждения и являются относительными значениями в этом смысле. Результаты динамической модели имеют смысл на сравнительной основе.

В более общем смысле абсолютные значения и соответствующие единицы в динамических режимах не важны, потому что цель этих вычислений - определить относительные количественные значения, сравнивая два или более исполнений КНБК. Таким образом, для одинакового входного возбуждения нужно определить относительный отклик для каждого заменителя КНБК. На фиг. 17 пунктирные линии отвечают за более высокую амплитуду, чем сплошная линия, и соответственно для этих условий (например, угол в 12°, WOB в 20 килофунтов, 100 RPM и режим возбуждения с однократной скоростью вращения) заменитель В КНБК имеет большую склонность к вибрации в ответ на возбуждение в долоте, чем заменитель А КНБК. Как обсуждалось выше, модели также можно нормализовать для предоставления относительных диаграмм, которые изображают результаты относительно базового заменителя КНБК и/или относительно других моделируемых заменителей КНБК. В реализациях, где один заменитель КНБК анализируется и не сравнивается с эталонным базовым заменителем КНБК, числовые значения и соответствующие результаты можно отобразить для справки пользователя при рассмотрении выгод и недостатков конкретной конфигурации КНБК. При использовании таким образом можно изучить склонность возбуждения в долоте усиливать вибрации, продолжающиеся вверх по стволу скважины от долота, без обращения к другим исполнениям заменителя КНБК.

Для настройки изображений 1731-1734 виртуальные ползунки, например ползунок 1716 наклона скважины, ползунок 1718 WOB, ползунок 1736 RPM и ползунок 1737 режима возбуждения, могут использоваться для настройки рабочих параметров для вычислений динамического состояния в режиме изгиба. Например, как показано на фиг. 17, значения параметров для ползунков 1716, 1718, 1736 и 1737 указываются значениями, ассоциированными с соответствующими ползунками 1716, 1718, 1736 и 1737 (например, угол равен 12°, WOB равен 20 килофунтам, RPM равен 100 и режим равен 1). Отклики вектора состояния (например, линии на графических изображениях 1731-1734) вычисляются для этого набора рабочих параметров. Соответственно, если нужен сравнительный анализ для другого набора значений параметров, ползунки 1716, 1718, 1736 и 1737 используются для настройки параметров на другой набор значений, который нужно моделировать. Отклики вектора состояния могут повторно вычисляться и отображаться для всех выбранных заменителей КНБК. В дополнение к двумерным (2D) изображениям соответствующие значения или параметры могут использоваться для формирования трехмерных (3D) изображений, например показанных на фиг. 18А и 18В. Например, фиг. 18А является типовым видом 1840 экрана для трехмерного представления вычислений в режиме динамики изгиба, который получается путем отметки варианта "Plot 3D" (трехмерный график) в строке 1002 меню. В этом виде 1840 экрана графическое изображение 1841 представляет заменитель А КНБК, а графическое изображение 1842 представляет заменитель В КНБК. Каждое из изображений 1841 и 1842 представляет трехмерное представление диапазонов RPM от заданных минимальных до максимальных значений параметров (например, угол равен 12°, WOB равен 20 килофунтам и режим возбуждения равен 1). Для каждого из этих выборов изображенные значения состояния выбираются из списка смещения, угла наклона, изгибающего момента и сдвигающей силы, выбранного из меню, которое появляется, когда выбирается "Flex Dynamics -Flex by State (all BHAS)" (динамика изгиба - изгиб по состоянию (все КНБК)). Переменные состояния изображаются в сравнении с расстоянием от долота, при определенной WOB и с меняющейся RPM. Оси изображений 1841 и 1842 могут поворачиваться таким же или идентичным способом для надлежащего ракурса. Более того, виртуальные ползунки, например горизонтальный виртуальный ползунок 1843 и вертикальный виртуальный ползунок 1844, могут использоваться для поворота изображений для альтернативных ракурсов. Полезно визуализировать области с отсутствием отклика, для которых вибрации предсказываются как слабые в диапазоне RPM по всей длине КНБК.

Фиг. 18В - типовой вид 1845 экрана трехмерного контурного графического представления заменителей КНБК в режиме динамики изгиба, полученный путем отметки варианта "Contours" (контуры) из пункта меню динамики изгиба, а затем выбора подходящей переменной состояния для отображения. В

этом виде 1845 экрана графическое изображение 1846 представляет заменитель А КНБК, а графическое изображение 1847 представляет заменитель В КНБК. Данные, используемые для предоставления этих изображений 1846 и 1847, являются такими же данными, используемыми в изображениях 1841 и 1842 из фиг. 18А. В этом виде 1845 экрана затенение контуров для каждого из изображений 1846 и 1847 может быть задано идентичным, чтобы наибольшие значения были легко видны путем визуального осмотра. Контурные изображения 1846 и 1847 представляют амплитуды откликов переменных состояния в зависимости от расстояния до бурового долота в футах по оси *x* в сравнении со скоростью вращения в RPM по оси *y* для заменителей А и В КНБК при соответствующих параметрах. В качестве альтернативы, оси при желании можно поменять местами.

В дополнение к вычислениям в режиме динамики изгиба вычисления в режиме кручения также могут предоставляться для оценки чувствительности заменителя КНБК к воздействиям эксцентрической массы, как показано на фиг. 19А-19С. Так как вычисления кручения применяются к условиям нагрузки с эксцентрической массой, которые синхронны со скоростью вращения (т.е. возникают только при одно-кратной скорости вращения), фиг. 19А-19С не включают в себя параметры режима возбуждения. В качестве одного характерного примера вычислений кручения фиг. 19А является типовым видом 1950 экрана с графическими изображениями 1951-1954 на основе режима динамики кручения, полученным путем выбора вкладки меню "Twirl Dynamics - Twirl States" (динамика кручения - состояния кручения) в строке 1002 меню. В этом виде 1950 экрана графические изображения являются отображением 1951 смещения, отображением 1952 угла наклона, отображением 1953 изгибающего момента и отображением 1954 сдвигающей силы. Изображения 1951-1954 представляют заменитель А КНБК в виде сплошной линии, тогда как заменитель В КНБК представлен в виде более толстой пунктирной линии. Обсуждение касательно единиц для фиг. 17 аналогично обсуждению фиг. 19А и здесь не повторяется.

Фиг. 19В - типовой вид 1960 экрана трехмерного представления заменителей КНБК в режиме кручения, полученный путем отметки пункта меню "Plot 3D" из вкладки меню динамики кручения, а затем выбора этого отображения. В этом виде 1960 экрана графическое изображение 1961 представляет заменитель А КНБК, а графическое изображение 1962 представляет заменитель В КНБК. Каждое из изображений 1961 и 1962 представляет собой трехмерное представление диапазонов RPM от заданных минимальных до максимальных значений (например, от 40 до 100 RPM) для характеристики КНБК по длине компоновки для проиллюстрированных параметрических значений (например, угол наклона равен 12°, а WOB равен 20 килофунтам). Как и в примере фиг. 18А, изображенные значения состояния выбираются из списка смещения, угла наклона, изгибающего момента и сдвигающей силы, когда выбирается меню "Twirl Dynamics - Twirl by States (all BHAS)" (динамика кручения - кручение по состояниям (все КНБК)). Оси изображений 1961 и 1962 могут поворачиваться таким же или идентичным способом для надлежащего ракурса. Более того, виртуальные ползунки, например горизонтальный виртуальный ползунок 1943 и вертикальный виртуальный ползунок 1944, могут использоваться для поворота изображений 1961 и 1962 для альтернативных ракурсов, аналогично обсуждению выше на фиг. 18А.

Фиг. 19С - типовой вид 1970 экрана трехмерного представление заменителей КНБК в режиме динамики кручения, полученный путем отметки пункта меню "Contours" из вкладки меню динамики кручения, выбора отображения "Twirl Dynamics - Twirl by States (all BRAS)" и выбора состояния для просмотра. В этом виде 1970 экрана графическое изображение 1971 представляет заменитель А КНБК, а графическое изображение 1972 представляет заменитель В КНБК. Данные, используемые для предоставления этих изображений 1971 и 1972, являются такими же данными, используемыми в изображениях 1961 и 1962 из фиг. 19В. В этом виде 1970 экрана затенение контуров снова задается идентичным, чтобы наибольшие значения были легко видны путем визуального осмотра. Контурные изображения 1971 и 1972 представляют амплитуды откликов переменных состояния в зависимости от расстояния до бурового долота в футах по оси *x* в сравнении со скоростью вращения в RPM по оси *y* для заменителей А и В КНБК при проиллюстрированных значениях параметров. В качестве альтернативы, оси при желании можно поменять местами.

Чтобы отобразить все состояния для одного заменителя КНБК, можно выбрать пункт меню "Flex Dynamics - Flex by BHA (all states)" (динамика изгиба - изгиб по КНБК (все состояния)) из строки 1002 меню, с последующим выбором определенной КНБК из списка меню. При выбранном "Plot 3D" формируется вид 2000 экрана из фиг. 20А для режима изгиба. Отметка пункта меню "Contours" и выбор этого вывода сформируют вид 2010 экрана на фиг. 20В. Подобным образом также можно получить соответствующие трехмерные представления для режима кручения.

Конкретнее, фиг. 20А является типовым видом 2000 экрана трехмерного представления заменителя А КНБК для режима динамики изгиба. В этом виде 2000 экрана трехмерные графические изображения являются отображением 2001 смещения, отображением 2002 угла наклона, отображением 2003 изгибающего момента и отображением 2004 сдвигающей силы. Каждое из изображений 2001-2004 представляет собой трехмерное представление состояний в зависимости от RPM и расстояния до бурового долота, для соответствующих значений параметров угла скважины, WOB и режима возбуждения. Отметим, что режим не применим к случаю кручения. Соответственно, изображения 2001-2004 могут использоваться для нахождения выгодных рабочих областей (например, настроек рабочих параметров, которые

уменьшают вибрации) для возможных заменителей КНБК и исследования отношений между переменными состояниями для заданного заменителя КНБК. Более того, виртуальные ползунки, например горизонтальный виртуальный ползунок 2043 и вертикальный виртуальный ползунок 2044, могут использоваться для поворота изображений для альтернативных ракурсов, как описано выше.

Фиг. 20В - типовой вид 2010 экрана представления в виде контурной карты для выбранного заменителя КНБК в режиме динамики изгиба или кручения, при необходимости. Это изображение получается путем отметки пункта "Contours" в строке 1002 меню, а затем выбора подходящего элемента меню для режимов изгиба и кручения. В этом виде 2010 экрана трехмерные графические изображения являются отображением 2011 смещения, отображением 2012 угла наклона, отображением 2013 изгибающего момента и отображением 2014 сдвигающей силы. Каждое из изображений 2011-2014 может основываться на таких же данных, используемых в изображениях 2001-2004 на фиг. 20А.

Выбор вкладки меню "Index 2D" в строке 1002 меню предоставляет дополнительные пункты меню "Flex 2D" (изгиб в двумерном виде), "Twirl 2D" (кручение в двумерном виде) и "Bharez Plot" (график Bharez), как проиллюстрировано в виде 2100 экрана на фиг. 21А. Выбор одного из этих пунктов меню может вызвать отображение информационной панели 2110, проиллюстрированной на фиг. 21В, пока выполняются вычисления индексов (как правило, не более нескольких минут). Аналогичная информационная панель может быть представлена во время вычислений, ассоциированных с любым из способов, систем и изображений, описанных в этом документе. Вычисления или моделирование выполняются для указанного угла наклона и WOB, для заданного диапазона RPM и запрошенного диапазона режимов возбуждения, для каждой из выбранных конфигураций КНБК. После того как каждое моделирование проводится для заданного набора параметров, результаты сохраняются в запоминающем устройстве и могут использоваться для вычисления динамической характеристики вибрации или индексов, как описано выше. Когда вычисления закончены, фиг. 21В закрывается, и результаты эксплуатационной характеристики вибрации для вывода поперечного изгиба в режиме изгиба предоставляются по умолчанию, как видно на изображении 2120 на фиг. 21С. Пункты меню "Flex 2D" и "Twirl 2D" впоследствии могут быть использованы для отображения этих результатов, а пункт меню "Bharez Plot" может использоваться для отображения только значения индекса кривизны конечной точки для одного заменителя КНБК для совместимости с прежней программой моделирования. В дополнительной реализации панель 1312 управления графикой на фиг. 13 предоставляет аналогичную возможность выбрать вычисления по модели и отобразить состояние процесса моделирования.

Как только вычисления закончены, результаты индекса вибрации или отклики в зависимости от скорости вращения представляются в виде 2120 экрана на фиг. 21С. В этом виде 2120 экрана четыре эксплуатационных характеристики 2122-2125 вибрации показаны в сравнении со значениями RPM для постоянной WOB в 20 килофунтов и использования режимов вплоть до 6. Обращаясь снова к вычислениям индексов, рассмотренным выше, отклик 2122 индекса вибрации соответствует значениям Индекса среднеквадратичной переданной энергии деформации; отклик 2123 индекса вибрации представляет результаты для значений Индекса энергии деформации КНБК; отклик 2124 индекса вибрации соответствует значениям Индекса среднеквадратичной кривизны конечной точки; и наконец отклик 2125 индекса вибрации представляет значения Индекса среднеквадратичного бокового усилия на стабилизаторе КНБК или, в качестве альтернативы, одно из значений Индекса динамического крутящего момента КНБК. В этих изображениях линии 2122a, 2122b, 2123a, 2123b, 2124a, 2124b, 2125a и 2125b соответствуют результатам для заменителя А КНБК, а линии 2122c, 2122d, 2123c, 2123d, 2124c, 2124d, 2125c и 2125d указывают результаты для заменителя В КНБК. Кроме того, более толстые линии ("a" и "c") являются среднеквадратичными значениями, усредненными на различных режимах возбуждения, и вычисления конечного отрезка для режима изгиба (напомним, что режим кручения вычисляется только для режима возбуждения с однократной скоростью вращения), а более тонкие линии ("b" и "d") указывают результаты максимального индекса в "наихудшем случае". Если возбуждение является самоподдерживающимся при условии наихудшего случая, то это значение является мерой того, насколько вредным может быть это условие для КНБК. В этих диаграммах 2122-2125 можно отметить, что результаты для заменителя А КНБК обычно ниже таковых для заменителя В КНБК. Таким образом, предполагается, что заменитель А КНБК должен проявлять меньший вибрационный отклик, чем заменитель В КНБК, потому что отклик для КНБК А меньше, чем для КНБК В для аналогичных условий возбуждения долота (т.е. одинаковых приложенных динамических нагрузок на долото и режимов возбуждения).

Набор горизонтальных полос 2128 на фиг. 21С является диагностическим средством для проверки, встретились ли какие-нибудь трудности числового схождения для какого-нибудь из режимов возбуждения. Метка, которая может быть цветной, слева от полос 2128 указывает, какую КНБК представляют соответствующие полосы 2128. Если полоса вся белая (как показано в этом примере), то все запрошенные режимы успешно обработаны до завершения. Если закрашена светло-серым, то один режим (как правило, наивысший уровень режима возбуждения) потерпел неудачу в схождении, и несходящийся режим исключается из результатов. Если закрашена темно-серым, то пропускаются два или более режимов, и пользователь посредством этого предупреждается, что необходимо некоторое исследование, чтобы изменить параметры для восстановления сходимости.

Для вычислений в режиме динамики изгиба среднеквадратичное и максимальное значения основываются на различных сочетаниях режимов и конечных отрезков, но для вычислений динамики кручения среднеквадратичное и максимальное значения основываются только на различных конечных отрезках. Результирующие значения индексов для диапазона скоростей вращения в графических изображениях 2122-2125 указывают условия эксплуатации, и посредством визуального осмотра предоставляют определенный эффективный рабочий диапазон или "золотую середину" заменителей КНБК. Этот эффективный рабочий диапазон можно установить как интервал в 5-10 RPM (или больше), для которого отклик близок к минимальному. Некоторые примеры представляют более сильные тенденции минимального отклика, нежели другие. В этом примере заменитель А КНБК предпочтительнее заменителя В КНБК на всем диапазоне RPM. Если используется заменитель В КНБК, может присутствовать предпочтительная область примерно в 80 RPM, где кривая индекса 2122с среднеквадратичной переданной энергии деформации имеет незначительный провал.

Результаты для вычислений в режиме кручения отображаются в виде 2130 экрана на фиг. 21D, для которых показаны соответствующие вычисления индексов. В виде 2130 экрана отклик 2132 индекса вибрации соответствует значениям индекса среднеквадратичной переданной энергии деформации; отклик 2133 индекса вибрации иллюстрирует значения индекса энергии деформации КНБК; отклик 2134 индекса вибрации соответствует значениям индекса среднеквадратичной кривизны конечной точки; и наконец отклик 2135 индекса вибрации относится к значениям индекса среднеквадратичного бокового усилия КНБК или, в качестве альтернативы, к одному из значений индекса динамического крутящего момента КНБК. Фиг. 21D показывает степенную зависимость характеристики кручения, как обсуждалось выше применительно к фиг. 14В. Матричный элемент для эксцентрической массы включает в себя скорость вращения в квадрате в качестве прямой входной силы, как описано выше.

Результаты для определенной отдельной конфигурации КНБК можно увеличить для заполнения доступной области экрана, как показано в виде 2140 экрана на фиг. 21Е. В виде 2140 экрана индекс кривизны конечной точки отображается для заменителя А КНБК. Этот вид был получен путем выбора пункта меню "Bharez Plot" в строке 1002 меню. Среднеквадратичные значения индекса режима изгиба изображены в виде отклика 2142, максимальные значения режима изгиба представлены откликом 2144, а среднеквадратичные значения кручения предоставлены в отклике 2146.

В дополнение к изображениям индекса поперечных вибраций также могут предоставляться сопоставимые значения индексов для других режимов, например осевых и крутильных вибраций. Соответственно, следует принять во внимание, что могут предоставляться сопоставимые изображения индексов вибрации для облегчения сравнения тенденций вибрации среди разных заменителей КНБК, а также для сравнения откликов на разных частотах в других режимах вибрации. Например, эта программа моделирования может использоваться для предоставления заменителей КНБК, имеющих эффективные рабочие диапазоны с низкими уровнями характеристики вибрации во всех режимах, включая изгибные, кручение, вихревые, осевые и крутильные отклики. Сочетание настоящих методик с другими моделями, известными в данной области техники, возможно является полезным расширением этой методики, и такое включается в более широкий способ, раскрытый в этом документе.

Как описано выше, способы и системы в настоящем раскрытии изобретения преимущественно могут использоваться при сравнении двух или более конфигураций КНБК посредством использования нескольких заменителей КНБК и моделирования и вычислений, описанных выше. Предшествующее описание типовых систем включало в себя несколько примеров выходных изображений, сравнивающих вычисленные результаты для нескольких заменителей КНБК. Хотя визуальное представление настоящих систем и способов является полезным и эффективным средством для оценивания нескольких конфигураций КНБК, настоящие системы и способы в равной степени могут использоваться для оценки одиночной конфигурации КНБК. Например, пользователь настоящих систем и способов может запускать модели для одиночного заменителя КНБК, и выходные значения, представленные в числах или графически, можно сравнивать с опытом и базой знаний пользователя или с предыдущими записями, которые могут встраиваться в систему в качестве процедуры нормализации или кодирования.

В реализациях, где сравниваются несколько заменителей КНБК, настоящие системы и способы могут конфигурироваться для предоставления пользователю возможности работы в пакетном режиме. Работа в пакетном режиме может облегчить оценку нескольких возможных заменителей КНБК. Фиг. 22 предоставляет показательную блок-схему 2210 алгоритма работы в пакетном режиме. Работа в пакетном режиме начинается на этапе 2212 на фиг. 22 и может включать в себя идентификацию или получение множества возможных заменителей КНБК, которые могут использоваться во время буровых работ, например как указано на этапе 2214. Исходные возможные заменители КНБК могут определяться на основе предшествующего опыта, доступного бурового оборудования и т.д. Базовый заменитель КНБК затем определяется или получается из этих возможных заменителей КНБК, например, как указано на этапе 2216. Базовый заменитель КНБК можно сохранить в файл на компьютерной системе или иным образом определить как базовый заменитель КНБК для будущего использования.

Продолжая ссылаться на фиг. 22, способ 2210 пакетного режима продолжается на этапе 2218 путем копирования базового заменителя КНБК в Активный оценочный набор. Активный оценочный набор

включает в себя несколько заменителей КНБК на основе базового заменителя КНБК и отличающихся от него по любому количеству параметров, например по свойствам материала, геометрическим свойствам, длине буровых труб, длине лопастной шейки, положению стабилизатора и т.д. Заменители КНБК в активном оценочном наборе также могут отличаться друг от друга одним или несколькими условиями эксплуатации, при которых они будут моделироваться. Например, можно создать изменения в диапазоне нагрузки на долото, диапазоне скорости вращения, диапазоне угла скважины, плотности бурового раствора, глубине и т.д. при моделировании заменителей КНБК в активном оценочном наборе. Соответственно, два заменителя КНБК в активном оценочном наборе могут конфигурироваться для представления одинаковой физической компоновки низа буровой колонны, но обозначаться как отличные заменители КНБК в активном оценочном наборе, чтобы дать возможность провести моделирование с отличающимися параметрами рабочего состояния.

В некоторых реализациях свойства заменителей КНБК в активном оценочном наборе могут проверяться на этапе 2220. Например, активный оценочный набор может формироваться по команде пользователя и/или посредством предварительно запрограммированных модификаций базового заменителя КНБК. Чтобы подтвердить, что каждый из заменителей КНБК в активном оценочном наборе конфигурируется в соответствии со спецификациями (от пользователя или от предварительно запрограммированных команд), можно выполнить подходящие вызовы функции к системе моделирования для каждого из заменителей КНБК, чтобы сформировать представление о каждом из заменителей КНБК для проверки. Представление может быть графическим представлением, например проиллюстрированным на фиг. 11, или числовым представлением. Проверка может проводиться пользователем путем визуального сравнения различных представлений заменителя КНБК. Дополнительно или в качестве альтернативы, компьютерные системы в настоящем раскрытии изобретения могут быть приспособлены для выполнения визуального осмотра снимков экрана или сохраненных изображений графических представлений. Дополнительно или в качестве альтернативы, компьютерные системы и/или пользователи могут сравнивать числовые представления заменителей КНБК в активном оценочном наборе, например путем анализа таблиц, включающих свойства и параметры различных заменителей КНБК в активном оценочном наборе. Дополнительно или в качестве альтернативы, некоторые реализации настоящих систем и способов могут разработать активный оценочный набор таким образом, что этап проверки является не нужным или избыточным.

Как только установлены заменители КНБК в активном оценочном наборе, результаты настоящих способов вычисляются на этапе 2222. Например, вызовы функций могут выполняться к программированию настоящих систем и способов для выполнения одного или нескольких моделирований и/или вычислений, подробно описанных выше. Результаты могут включать в себя одно или несколько из двумерного и трехмерного анализа вектора состояния и графиков, вычислений статического вектора состояния, конфигураций смещения КНБК, и одну или несколько из различных эксплуатационных характеристик вибрации, например индекс кривизны конечной точки, индекс энергии деформации КНБК, индекс средней переданной энергии деформации, индекс переданной энергии деформации, индекс среднеквадратичного бокового усилия КНБК, индекс среднеквадратичного крутящего момента КНБК, индекс проводимости и т.д. Вызовы функций и выполнение этих вычислений можно легко сократить до последовательности этапов программирования практически на любом доступном языке программирования для удобного исполнения. Результаты каждого из вычислений и вызовов функций могут регистрироваться или иным образом сохраняться в запоминающем устройстве в виде снимков экрана или подходящих файлов изображений непосредственно из программного обеспечения.

Некоторые реализации могут включать в себя необязательный этап проверки и/или сравнения результатов для каждого из заменителей КНБК в активном оценочном наборе, показанный как этап 2224 на фиг. 22. Например, текущую итерацию работы в пакетном режиме можно сравнить с предшествующей итерацией, чтобы подтвердить, что результаты находятся в пределах ожиданий. В качестве другого примера результаты для заданного заменителя КНБК могут оцениваться для проверки, что вычисления и моделирования сошлись.

Фиг. 22 дополнительно иллюстрирует, что после того, как результаты вычисляются и при желании проверяются для заданного заменителя КНБК в активном оценочном наборе, программа проверяет для определения, все ли заменители КНБК в активном оценочном наборе рассмотрены, как проиллюстрировано на этапе 2226. Если есть оставшиеся заменители КНБК, то процесс возвращается к этапу 2222 вычисления результатов, чтобы вычислить результаты для другого заменителя КНБК. Когда рассмотрены все заменители КНБК в активном оценочном наборе, процесс пакетной обработки определяет, получены ли удовлетворительные результаты, на этапе 2228 на фиг. 22.

Графические и/или числовые результаты вычислений для различных заменителей КНБК могут оцениваться пользователем, чтобы определить, является ли один или несколько результатов удовлетворительными. Дополнительно или в качестве альтернативы система может быть приспособлена для оценки результатов работы в пакетном режиме. Например, результаты могут оцениваться для определения, указывает ли по меньшей мере один из заменителей КНБК в Активном оценочном наборе удовлетворительную характеристику вибрации. В случае, если результаты считаются неудовлетворительными, то под-

множество заменителей КНБК может быть повторно пропущено через пакетный процесс, чтобы дополнительно оценить заменитель КНБК с дополнительными изменениями или без них в конфигурации КНБК и/или условиях эксплуатации. Дополнительно или в качестве альтернативы могут быть определены дополнительные конфигурации КНБК для использования в качестве базового заменителя КНБК, например как указано этапом 2230 на фиг. 22, и процесс повторяется. Когда получаются удовлетворительные результаты от работы в пакетном режиме, процесс завершается на этапе 2232.

Как предлагалось предшествующим описанием работы в пакетном режиме, настоящие системы и способы могут настраиваться для оценки нескольких заменителей КНБК при минимальном взаимодействии с пользователем. Дополнительно или в качестве альтернативы, система может конфигурироваться для прохождения через работу в пакетном режиме и представления многочисленных вычислений и результатов пользователю в дружественном интерфейсе, например, с использованием интерфейса, который одновременно представляет результаты для двух или более заменителей КНБК. Дополнительно или в качестве альтернативы, интерфейс может содержать результаты, вычисленные и подготовленные способом, который позволяет пользователю без труда прокручивать результаты без временной задержки основных вычислений.

Измеренные данные и эксплуатационные характеристики вибрации.

Ко второму прикладному способу "каротажному режиму", можно обращаться из вида 900 экрана путем выбора второй виртуальной кнопки 904 на фиг. 9. Если выбирается каротажный режим, то представляется вид 900 экрана с пустой панелью, как показано на фиг. 23А. Вкладками меню в строке 2302 меню является вкладка файлового меню, которая обозначена как "File", для печати, настройки печати и выхода. Вкладка конфигурационного меню, которая обозначена как "Config", вызывает конфигурационную панель 1010, проиллюстрированную на фиг. 10В. Как обсуждалось выше, в дополнительном варианте осуществления конфигурационная информация может включать в себя скорость изменения зенитных или азимутальных углов и, в более общем смысле, данные контроля ствола скважины для оценки динамической характеристики бурения для меняющейся геометрии ствола скважины. Меню 2302 включает в себя: пункт меню "Log File" (журнал) для настройки входного набора данных из эксплуатационных входных данных, например, которые проиллюстрированы на фиг. 23В и обсуждаются ниже; вкладку меню, обозначенную как "Bitruns", для вызова панели для задания глубины опускания и глубины извлечения КНБК, как показано на фиг. 23С; и вкладку меню вычисления, которая обозначена как "Calculate" (расчет).

Также в этом виде 2300 экрана показаны виртуальные кнопки 2306a-2306f, которые могут использоваться для доступа к разным заменителям КНБК, что аналогично обсуждению выше. В этом примере конфигурируются два заменителя КНБК, которыми являются "А", ассоциированный с виртуальной кнопкой 2306a, и "В", ассоциированный с виртуальной кнопкой 2306b, тогда как виртуальные кнопки 2306c-2306f не имеют ассоциированных с ними заменителей КНБК. Эти кнопки выполняют такую же функцию, как кнопки 1006a-f из фиг. 10А.

Чтобы импортировать каротажные данные, выбирается входной файл с использованием вкладки меню Log File, чтобы получить предварительно форматированные данные. Как показано на фиг. 23В, вид 2310 экрана представляет каротажные данные, рассортированные по различным столбцам текстовых полей 2312. В частности, для этого примера каротажные данные сортируются по столбцам текстовых полей глубины, WOB, RPM, ROP и MSE. Данные в этих разных текстовых полях могут быть упорядочены в определенном формате файла, например Microsoft Excel™. Каротажные данные могут включать в себя последовательный индекс (глубина или время), WOB и RPM в предпочтительных вариантах осуществления. К тому же в этом виде 2310 экрана также предоставляются дополнительные данные, например ROP (скорость бурения) и механическая удельная энергия (MSE). После того как программа моделирования получает предварительно форматированные данные, переменные (например WOB, RPM, ROP, MSE и т.д.) можно изобразить в сравнении с глубиной. Однако следует отметить, что в разных реализациях разные наборы каротажных данных могут быть доступны для сравнения с предсказанными значениями. Например, другие наборы данных могут включать в себя скважинные или поверхностные измерения вибраций, данные о свойствах месторождения или горной породы, каротажные данные буровой скважины, каротажные данные бурового раствора, а также любой другой параметр, который предоставляется в виде функции глубины и/или времени. В предпочтительном варианте осуществления вкладки меню могут включать в себя пункты меню, которые обращаются к процессам для прямого преобразования необработанных эксплуатационных данных из одного из предоставленных поставщиком форматов в совместимый формат, вычисления данных MSE из необработанных входных данных и сравнения с данными MSE, сформированными при эксплуатации, и импорта набора данных, который преобразован из эксплуатационных данных в формат, аналогичный 2310, для ввода в обсуждаемую программу моделирования.

Затем вкладка меню "Bitruns" в строке 2302 меню может выбираться для ассоциации импортированных каротажных данных с заменителем КНБК для каждого интервала глубины, как показано на фиг. 23С. На фиг. 23С предоставляется вид 2320 экрана с панелью данных "Bitruns". Вид 2320 экрана может включать в себя строку 2321 меню вместе с виртуальными кнопками 2306a-2306f, которые открывают панели описания КНБК аналогично рассмотренным выше на фиг. 10С и 10D. Соответственно, используя

эти виртуальные кнопки, каждый из заменителей КНБК можно посмотреть, обновить или создать.

Вид 2320 экрана включает в себя виртуальные кнопки для добавления и удаления записей времени работы долота, например виртуальные кнопки 2322 вставки, обозначенные как "ins", и виртуальные кнопки 2323 удаления, обозначенные как "del". Виртуальные кнопки 2322 и 2323 предоставляют механизм для изменения интервалов глубины работы долота, назначения конфигураций расположения КНБК определенным интервалам глубины, и иного управления вычислениями, которые будут проводиться на следующем этапе обработки. Например, текстовые поля диапазона глубины, например глубина в текстовых полях 2324, обозначенных как "Depth In", и глубина в текстовых полях 2325, обозначенных как "Depth Out", можно вводить для каждого из заменителей КНБК, которые работали на месте, чтобы соответствующая конструкция ассоциировалась с соответствующими измерениями эксплуатационных данных. Дополнительно вид 2320 экрана включает в себя кнопки 2326 для выбора определенного заменителя КНБК для каждой строки ввода и для иллюстрации назначенного цвета (например "светлосерый" или "темно-серый"), как показано в цветных текстовых полях 2327. Кроме того, вид 2320 экрана включает в себя область для отображения ассоциированных текстовых полей 2328 с комментариями. Вид 2320 экрана на конфигурации времени работы долота можно закрыть путем выбора подходящего пункта из кнопки File в строке 2321 меню, чтобы вернуться к виду 2300 экрана на фиг. 23А.

Как только время работы долота сконфигурировано (т.е. заменители КНБК сопоставлены с глубинами, на которых использовалась КНБК, которая практически соответствует заменителю КНБК), можно выбрать вкладку меню "Calculate" из строки 2302 меню. Когда выбирается вкладка меню Calculate, предсказания по модели используют рабочие параметры из импортированных каротажных данных, используя соответствующий заменитель КНБК для каждого интервала. Результирующие динамические эксплуатационные характеристики вибрации можно отобразить, когда завершены вычисления, или когда они формируются. Пример этого графического изображения предоставляется на фиг. 23D. На фиг. 23D вид 2330 экрана представляет предсказанные модельные результаты параллельно с другими эксплуатационными значениями с помощью сплошной цветной полосы 2336, чтобы проиллюстрировать заменитель КНБК, выбранный для каждого интервала глубины. Т.е. обработка на основе каротажных данных предоставляет диагностические изображения 2332-2335 показательных рабочих и измеренных параметров (например, приложенной WOB 2332 в килофунтах, приложенной скорости 2333 вращения в RPM, отклика 2334 ROP в футах/час и отклика 2335 MSE в единицах напряжения). Эти значения изображаются на графике в сравнении с глубиной, которая отображается по вертикальной оси 2331. Различные эксплуатационные характеристики вибрации для вычислений в режиме поперечного изгиба показаны справа от отборочной полосы 2336 КНБК, например индекс 2337 переданной энергии деформации, индекс 2338 энергии деформации КНБК, индекс 2339 бокового усилия КНБК и индекс 2340 кривизны конечной точки (т.е. "Bharez"). Четыре соответствующих значения индексов для вычислений в режиме кручения отображаются в 2341 и 2342. Виртуальные ползунки 2352-2354 позволяют регулировать интервал глубины в изображениях.

Изображение на графике предсказанных результатов в каротажном формате обеспечивает понимание состояния вибрации у буровых снарядов и облегчает понимание результатов модели в сравнении с измеренными каротажными данными. Соответственно, это моделирует условия, испытываемые в стволе скважины, которые увеличивают или уменьшают вибрации. К тому же настоящие методики предоставляют графические изображения уровней вибрации, которые отражаются в изменениях параметров, например ROP, MSE, и любых измерений вибрации, полученных на месте. Дополнительные предоставленные данные могут включать в себя каротажные данные буровой скважины, свойства месторождения, время пробега продольной волны, литологию, любые выведенные параметры, например твердость месторождения или значения напряжения, вычисленные из диаграмм дипольного акустического каротажа, и т.д. Дополнительные предсказания индексов вибрации также могут включать в себя осевые, крутильные и/или прерывистые режимы вибрации, которые могут быть предоставлены любыми традиционными моделями, известными в промышленности.

Полезно, что программа моделирования в каротажном режиме и описанные выше способы могут использоваться для обеспечения более глубокого понимания работы КНБК в стволе скважины. Конечно, опыт, полученный при применении инструментов проектирования, описанных в этом документе, предоставляет информацию и представления о способах управления вибрацией, полученных путем изменения норм проектирования КНБК. Эти познания примут вид улучшенного понимания предпочтительных конфигураций, чтобы избежать создания вибрации, а также правил касательно использования специализированного бурового оборудования, например раздвижных буровых расширителей, расширителей с цилиндрическими шарошками, роторно-управляемого оборудования, бицентричных и других типов нового долота, новых стабилизаторов, разных составов материала и другого усовершенствованного бурового оборудования. Применение этих количественных методик проектирования позволит промышленности продвинуться дальше эмпирических оценок динамической характеристики КНБК, чтобы развивать практические методики, использующие сравнительный анализ альтернативных исполнений КНБК.

В одном варианте осуществления этот процесс может использоваться с блок-схемой 100 алгоритма из фиг. 1. В качестве характерного примера, на этапе 112 фиг. 1 измеренные данные можно сравнить с

вычисленными данными для выбранного заменителя КНБК. Затем может выполняться перепроектирование заменителя КНБК с помощью одного или нескольких дополнительных заменителей КНБК. Эти дополнительные заменители КНБК могут включать в себя различные улучшения, которые приспособлены для устранения некоторых ограничителей, указанных из измеренных данных, например данных MSE, ROP, WOB, данных прерывистого перемещения или вибрационных данных. Затем один из заменителей КНБК может выбираться для использования в бурении буровой скважины. Таким образом, ограничитель можно устранить или уменьшить для увеличения ROP буровых работ.

Как описано выше применительно к фиг. 12, эксплуатационные характеристики вибрации в настоящем раскрытии изобретения можно вычислить в виде объединенных индексов (например, среднеквадратичных значений) и/или в виде отдельных индексов для каждого переменного параметра, например каждого кратного скорости вращения. Фиг. 24 предоставляет типовой вид 2410 экрана, аналогичный фиг. 23D, показывающий измеренные данные 2432-2435 в таком же виде, как и вычисленные данные 2437-2442 для эксплуатационных характеристик вибрации на основе измеренных данных. Однако, как указано на фиг. 24, вычисленные данные на графиках 2437-2442 включают в себя несколько эксплуатационных характеристик вибрации в каждом из графиков, причем каждый набор данных соответствует отдельным кратным числам скорости вращения. Как обсуждалось выше, возможность видеть вычисленные индексы вместе с измеренными данными может облегчить выявление кратного скорости вращения, которое точнее всего связано с результатами работ в измеренных данных.

Альтернативный подход к фиг. 23C и 24 с целью сравнения измеренных данных с модельными результатами предоставляется на фиг. 25. На этом чертеже имеются четыре (по выбору) квадранта графиков 2510, 2502, 2511 и 2512 для облегчения нескольких сравнений на одном отображении. Типом графика может быть график RPM (2501 и 2502), график WOB (2511 и 2512), трехмерный график с WOB и RPM, график фактического в сравнении с предсказанным или другой выбор графика. Измеренные переменные бурения могут наноситься на вертикальную ось (показаны в виде окружностей, обычно красных), и одно или несколько значений эксплуатационной характеристики вибрации может масштабироваться и наноситься на те же оси, чтобы обеспечить прямое сравнение (показаны в виде знаков "x", обычно черных или синих). Измеренные данные имеют склонность к разбросу больше, чем модельные результаты, поэтому кривые тренда можно вычислить и отобразить в сравнении с RPM 2521 или WOB 2522 для визуального анализа. Значения индексов вычисляются для определенной модели КНБК, работающей с фактическими параметрами бурения, а затем масштабируются так, что среднее значение модельных данных равно, например, среднему значению измеренных данных. Также могут использоваться другие процедуры нормализации графиков.

Как проиллюстрировано на фиг. 26, панель управления может использоваться для задания и настройки графиков на фиг. 25. Квадранты 2601 и 2602 выбрали RPM в качестве горизонтальной оси, тогда как квадранты 2610 и 2611 выбрали WOB в качестве оси графика. Ссылаясь на квадрант 2601, верхнюю левую область, элемент 2621 управления используется для задания данных бурения для нанесения (в виде окружностей на фиг. 25), 2622 используется для выбора типа эксплуатационной характеристики вибрации для отображения, элементы 2623 и 2624 управления определяют, какие конкретные индексы показаны в виде черных и синих знаков "x" на фиг. 25, элемент 2625 управления указывает выбор оси графика, и 2626 указывает порядок полиномиального приближения к данным, которые нужно проиллюстрировать в виде кривой на графике. Управляющие элементы для других квадрантов функционируют так же. Управляющие элементы 2630 используются для установки глобальных начальных значений для параметров, нижнего и верхнего диапазона RPM и других свойств элемента меню для настройки изображения, предоставленного на фиг. 25.

Со ссылкой на предшествующее обсуждение виртуальных датчиков, которые могут ассоциироваться с заменителями КНБК, конфигурации компоновки низа бурильной колонны, выбранные для использования в буровых работах, могут конфигурироваться для включения в себя реального датчика практически в том же местоположении и/или ориентации, что и виртуальный датчик в заменителе. Используя конфигурацию компоновки низа бурильной колонны в буровых работах, измеренные результаты и эксплуатационные характеристики вибрации на основе измеренных данных можно полнее сравнить с имитированными состояниями заменителя КНБК и вычисленными индексами, и эти данные можно отобразить на диаграммах, например предоставленных на фиг. 23C, 24 и 25. Например, виртуальный датчик ускорения может ассоциироваться с заменителем КНБК, и компоновка низа бурильной колонны, изображающая заменитель КНБК, может снабжаться акселерометром, расположенным практически в том же местоположении, что и виртуальный датчик. Состояния и эксплуатационные характеристики вибрации, имеющие отношение к ускорению, например описанный выше индекс проводимости, можно сравнить между моделированными и вычисленными значениями и измеренными и вычисленными значениями. Индекс проводимости в измеренных данных можно вычислить в соответствии с уравнением (e96)

$$T_{12}(\omega_v) = \frac{|FT[A_1(t)]|}{|FT[A_2(t)]|} \quad (e96)$$

где FT [] является преобразованием Фурье, а $A_1(t)$ и $A_2(t)$ являются измеренными картинками изме-

нения ускорения в положениях датчика 1 и 2 соответственно. Хотя акселерометры и виртуальные датчики ускорения описываются здесь в качестве примеров, аналогичные сравнения можно произвести для датчиков и индексов на основе других состояний.

Недавние успехи в технологии наддолотных датчиков позволяют записывать ускорения долота. Эти данные могут быть обработаны для выявления основных частот вибрации в долоте. Эти данные частотной характеристики могут использоваться для проектирования входного возбуждения долота, используемого для вычисления индексов вибрации для измеренных данных, как описано выше. Т.е. идентификация вибрационных частот в долоте облегчает взвешивание определенных основных частот при вычислении предсказанных эксплуатационных характеристик вибрации, вместо имеющегося предположения о равном весе режимов $N \times \text{RPM}$.

Одним таким примером являются эксплуатационные данные, отображаемые на фиг. 27, которые показывают поперечные ускорения, измеренные наддолотным регистратором данных. Измеренные поперечные ускорения обработаны так, что анализируются окна с почти постоянной скоростью вращения, причем первое окно соответствует 51 RPM, второе окно соответствует 60,6 RPM и так далее. Более того, каждое окно изображает преобразование Фурье над данными ускорения, наблюдаемыми в этом окне, в зависимости от нормализованной частоты. Ось x дисплея является безразмерной частотой f/f_{RPM} , как показано. Выровненные максимумы в некоторых безразмерных единицах частоты, например $f/f_{\text{RPM}}=1$, подразумевают, что имеется поперечное ускорение при тех скоростях вращения с указанной частотой или кратным скорости вращения.

Эти эксплуатационные измерения возбуждения долота могут использоваться различными способами в настоящих системах и способах. В качестве одного примера одна или несколько эксплуатационных характеристик вибрации, раскрытых в этом документе, могут быть приспособлены для включения в себя весовых коэффициентов для кратных чисел скорости вращения, соответствующих измеренным данным. Как описано выше, некоторые из индексов вычисляются в виде среднеквадратичных значений для множества кратных чисел скорости вращения. Типовая эксплуатационная характеристика вибрации PI может быть взвешена с учетом измеренных данных, как видно в уравнении (e102)

$$PI'(\omega_0) = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n (w_k(\omega_0) \cdot PI(k\omega_0))_{jk}^2} \quad (e102)$$

где PI' - среднеквадратичное выбранной эксплуатационной характеристики вибрации, ω_0 представляет скорость вращения, j - индекс элемента, k - индекс элемента, m - количество режимов возбуждения, n - количество конечных отрезков КНБК и $(PI)_{jk}$ - один из одного или нескольких индексов для k -го индекса в m режимах и j -го индекса в n конечных отрезках КНБК в конфигурации исполнения КНБК и где $w_k(\omega_0)$ - вес для k -го кратного RPM при скорости вращения ω_0 . Максимальное значение эксплуатационной характеристики вибрации может изменяться аналогичным образом, как видно в уравнении (e103), где $PI'(\rho)$ представляет максимум выбранного индекса

$$PI'(\omega_0) = \max_{k=1}^m \{ \max_{j=1}^n (w_k(\omega_0) \cdot PI)_{jk} \} \quad (e103)$$

Весовые коэффициенты в уравнениях (e102) и (e103) могут быть вещественными числами и/или могут быть функциями скорости вращения. Уравнения, описанные применительно к ранее описанным моделям вибрации, включают в себя подразумеваемый весовой коэффициент, равный единице для кратных чисел, которые вычисляются, и нулю для всех остальных кратных чисел скорости вращения. Измеренные данные дают возможность пользователям настоящих систем и способов учитывать каждое из значимых кратных чисел скорости вращения и учитывать вес различных режимов для отражения количества энергии в анализе Фурье, на основе измеренных данных бурения. Эти веса обычно будут зависеть от самой скорости вращения, так как можно определить изменения в величинах кратных чисел RPM на чертеже. Веса также могут зависеть от свойств месторождения, глубины, свойств бурового раствора и других параметров, ассоциированных с буровой работой.

Когда отсутствуют пики и имеется "размытость" энергии, например, которая может определяться в направлении высоких частот в случаях 81 и 102 RPM, то может иметь место объединение спектрального состава в подмассивы с центральной частотой для идентификации подмассива. Общий запас спектральной энергии будет сохранен, и будет иметь место распределение по всей полосе частот. Весовые коэффициенты тогда можно нормализовать для согласованности.

Сопоставление измеренных данных о состоянии и индексов с имитированными данными о состоянии и индексами может значительно улучшить понимание характера вибрации. В качестве одного типового результата моделированные и измеренные данные могут дать пользователю возможность улучшить одну или несколько особенностей моделей и/или уравнений, используемых в этом документе и рассмотренных выше. Например, одно или несколько отношений, граничных условий, предположений и т.д., описанных выше, может быть усовершенствовано на основе понимания, приобретенного посредством сравнения измеренных результатов с предсказанными результатами. Дополнительно или в качестве альтернативы измеренные результаты можно сравнить с предсказанными данными, чтобы определить предпочтительные условия эксплуатации для продолжения буровой работы. Например, оператор может опре-

делить, что предпочтительна другая конфигурация компоновки низа бурильной колонны, чтобы преодолеть вибрации, ассоциированные с конкретным месторождением, или что изменения в нагрузке на долото, скорости вращения или каком-нибудь другом рабочем параметре может уменьшить вибрации и улучшить работы в целом.

Другое типовое использование измеренных данных в каротажном режиме может облегчить или дать возможность взвешивания различных факторов и параметров, которые включаются в эксплуатационные характеристики вибрации, описанные в этом документе. Например, используя множественные результаты независимого возбуждения для значений индексов (деформации КНБК, переданной деформации, индексов бокового усилия и крутящего момента, кривизны конечной точки и т.д.) и/или для имитированных состояний с использованием описанных выше виртуальных датчиков, может быть установлена функциональная зависимость для соотнесения предсказанных значений с соответствующими измеренными значениями. Например, линейное взвешивание множественных результатов режима, как проиллюстрировано на фиг. 24, можно сравнить с MSE для оценки, какой из режимов может вносить наибольший вклад в MSE. Стандартные методики линейной регрессии или другие методики могут применяться к этим последовательностям глубин, чтобы вывести функциональные зависимости, и с тем же успехом можно исследовать нелинейные зависимости. В качестве примера визуальный осмотр фиг. 24 показывает, что индексы 2442 кручения могут сильнее соотноситься с индексом 2435 MSE, чем режимы 2437-2441 сгибания. Формат графика DVDT, проиллюстрированный на фиг. 25, также может быть полезен для этой цели.

Хотя настоящие методики изобретения могут быть восприимчивы к различным модификациям и альтернативным видам, рассмотренные выше типовые варианты осуществления показаны в качестве примера. Однако следует понимать, что изобретение не имеет целью ограничиваться конкретными вариантами осуществления, раскрытыми в этом документе. Конечно, настоящие методики изобретения должны охватывать все модификации, эквиваленты и альтернативы, входящие в сущность и объем изобретения, который задан нижеисследующей прилагаемой формулой изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ моделирования бурового оборудования для представления вибрационной характеристики бурового оборудования, содержащий этапы, на которых

задают по меньшей мере одну модель КНБК (компоновки низа буровой колонны), представляющую по меньшей мере часть компоновки низа бурильной колонны, расположенной в буровой скважине; и представляющую собой модель КНБК с сосредоточенными параметрами или модель КНБК с распределенной массой;

используют модель частотной области для вычисления бокового усилия по меньшей мере одной точки контакта между компоновкой низа бурильной колонны и буровой скважиной, где боковое усилие вычисляется в зависимости от скорости вращения для каждой модели КНБК;

определяют по меньшей мере один угловой коэффициент бокового усилия в зависимости от скорости вращения по меньшей мере для одной точки контакта; и

отображают вычисленный угловой коэффициент бокового усилия в зависимости от скорости вращения.

2. Способ по п.1, используемый в качестве способа бурения скважины для использования при добыче углеводородов, содержащий этапы, на которых

создают по меньшей мере одну модель КНБК, представляющую по меньшей мере часть компоновки низа бурильной колонны, расположенной в буровой скважине;

определяют по меньшей мере один угловой коэффициент бокового усилия в зависимости от скорости вращения по меньшей мере для одной точки контакта между компоновкой низа бурильной колонны и буровой скважиной;

выбирают оптимизированную конфигурацию компоновки низа бурильной колонны для буровой работы на основе, по меньшей мере частично, по меньшей мере одного определенного углового коэффициента бокового усилия; и

бурят скважину с помощью бурового оборудования, включающего компоновку низа бурильной колонны, по меньшей мере, существенно изображающую выбранную конфигурацию компоновки низа бурильной колонны.

3. Способ по п.2, в котором этап, на котором бурят скважину, проводится в соответствии с планом бурения, разработанным, по меньшей мере частично, на основе по меньшей мере одного определенного углового коэффициента бокового усилия.

4. Способ по п.2, в котором этап, на котором выбирают оптимизированную конфигурацию компоновки низа бурильной колонны, содержит этап, на котором выбирают разные конфигурации компоновки низа бурильной колонны для разных частей бурения.

5. Способ по п.2, дополнительно содержащий этап, на котором добывают углеводороды из буровой скважины.

6. Способ по п.2, в котором этап, на котором определяют по меньшей мере один угловой коэффициент бокового усилия, содержит этап, на котором используют модель частотной области для вычисления бокового усилия по меньшей мере в одной точке контакта между компоновкой низа бурильной колонны и буровой скважиной, где боковое усилие вычисляется в зависимости от скорости вращения для каждой модели КНБК.

7. Способ по любому из пп.1 или 2, в котором коэффициент трения по меньшей мере в одной точке контакта предполагается непостоянным по сравнению с рассмотренными скоростями вращения.

8. Способ по любому из пп.1 или 2, в котором по меньшей мере один из угловых коэффициентов бокового усилия определяется графически.

9. Способ по любому из пп.1 или 2, в котором по меньшей мере один из угловых коэффициентов бокового усилия определяется численно.

10. Способ по любому из пп.1 или 2, в котором определенный угловой коэффициент бокового усилия является объединенным индексом, характерным для множества точек контакта между компоновкой низа бурильной колонны и буровой скважиной.

11. Способ по любому из пп.1 или 2, в котором ненулевой определенный угловой коэффициент бокового усилия предсказывает повышенную вероятность вибрации.

12. Способ по любому из пп.1 или 2, дополнительно содержащий этап, на котором наносят на график абсолютное значение углового коэффициента бокового усилия в зависимости от скорости вращения, чтобы определить количественную вероятность вибрации.

13. Способ по любому из пп.1 или 2, дополнительно содержащий этап, на котором выявляют одну или несколько точек контакта, имеющих наибольшую вероятность вибрации.

14. Способ по п.1, используемый с системой моделирования, содержащей процессор; запоминающее устройство, соединенное с процессором; и набор машиночитаемых команд, доступный процессору, где набор машиночитаемых команд сконфигурирован для

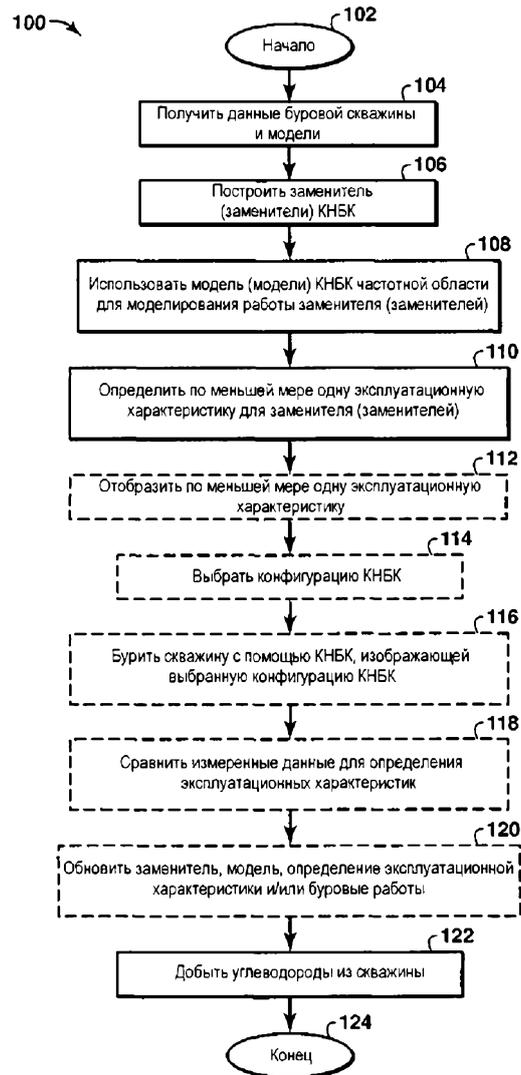
построения по меньшей мере одной модели КНБК, представляющей по меньшей мере часть компоновки низа бурильной колонны, расположенной в буровой скважине;

определения по меньшей мере одного углового коэффициента бокового усилия в зависимости от скорости вращения по меньшей мере для одной точки контакта между компоновкой низа бурильной колонны и буровой скважиной; и

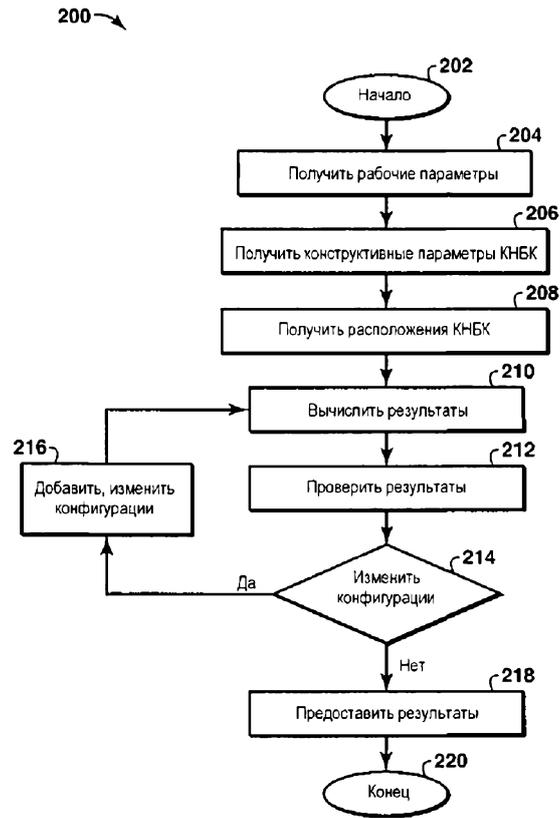
вывода по меньшей мере одного углового коэффициента бокового усилия для использования при выборе оптимизированной конфигурации компоновки низа бурильной колонны для буровой работы на основе, по меньшей мере частично, по меньшей мере одного определенного углового коэффициента бокового усилия.

15. Способ по п.14, в котором угловой коэффициент бокового усилия определяется с использованием по меньшей мере одной модели частотной области, чтобы вычислить боковое усилие по меньшей мере в одной точке контакта.

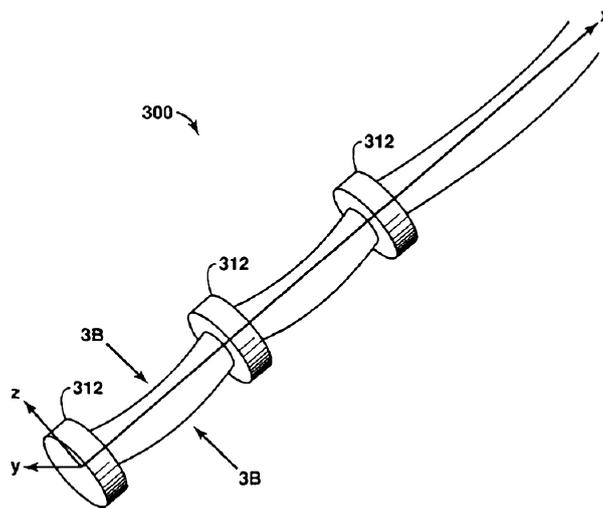
16. Способ по п.14, в котором вывод предоставляется в виде графического представления углового коэффициента бокового усилия у конфигурации компоновки низа бурильной колонны в одной или нескольких точках на конфигурации компоновки низа бурильной колонны.



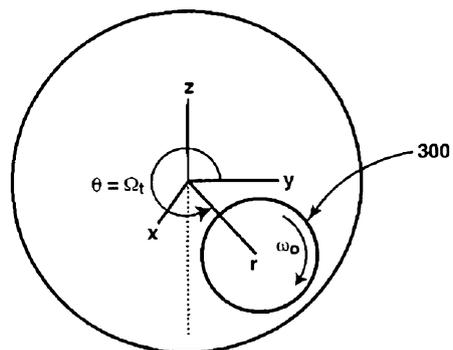
Фиг. 1



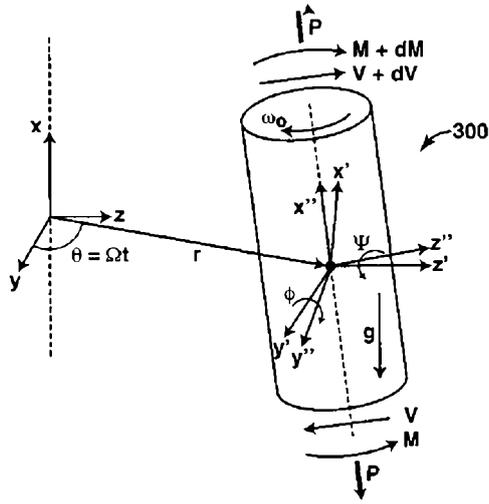
Фиг. 2



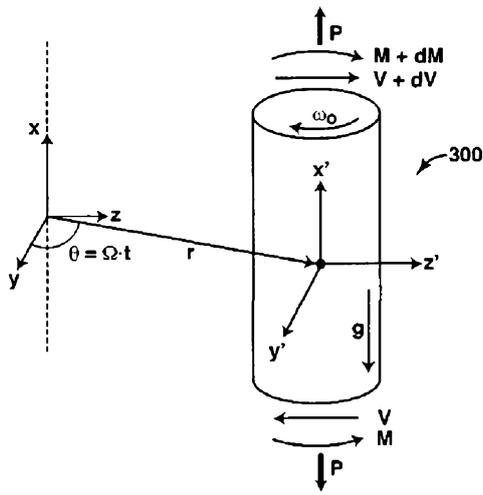
Фиг. 3А



Фиг. 3В

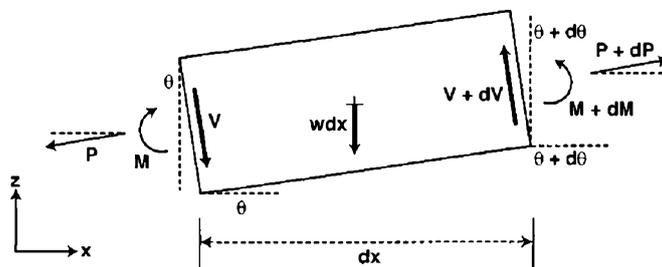


Фиг. 3С

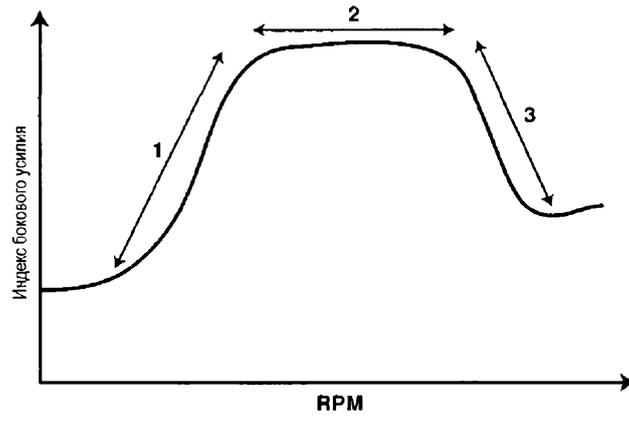


Фиг. 3D

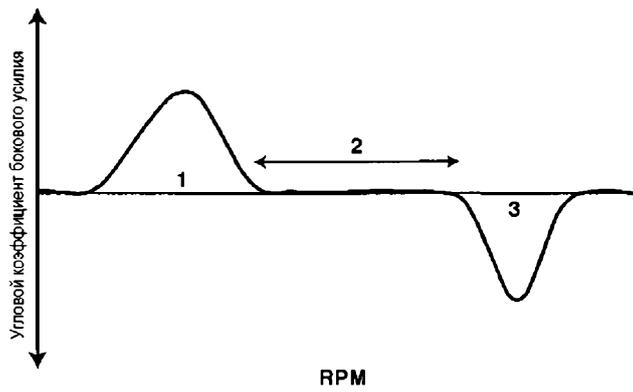
400 ↗



Фиг. 4

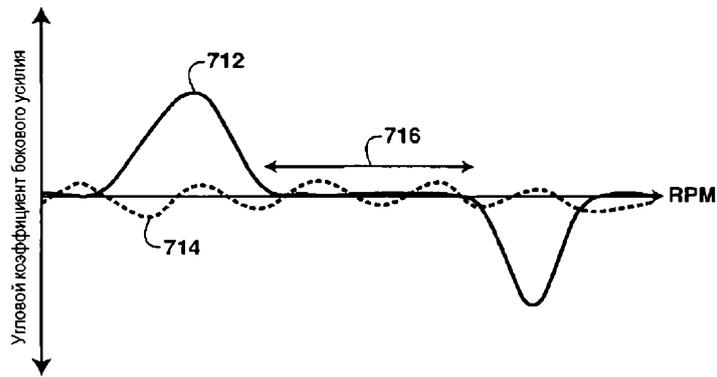


Фиг. 5

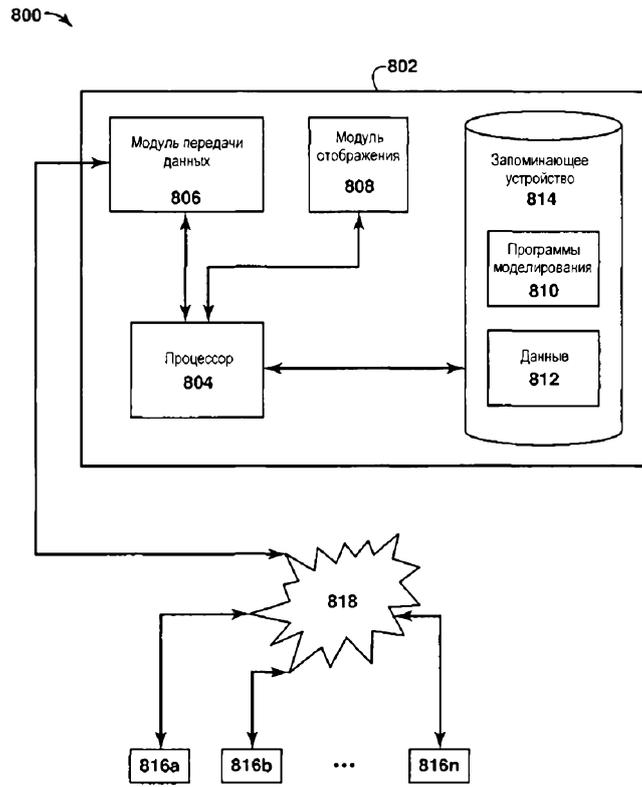


Фиг. 6

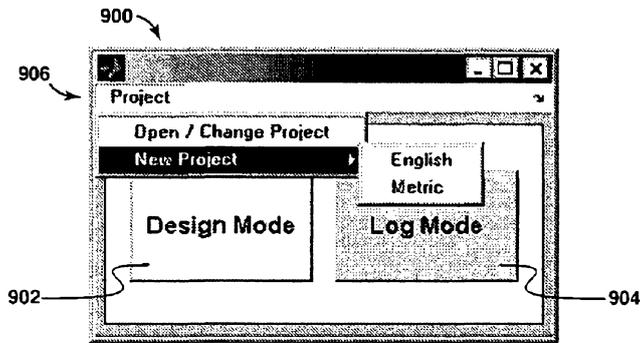
710 →



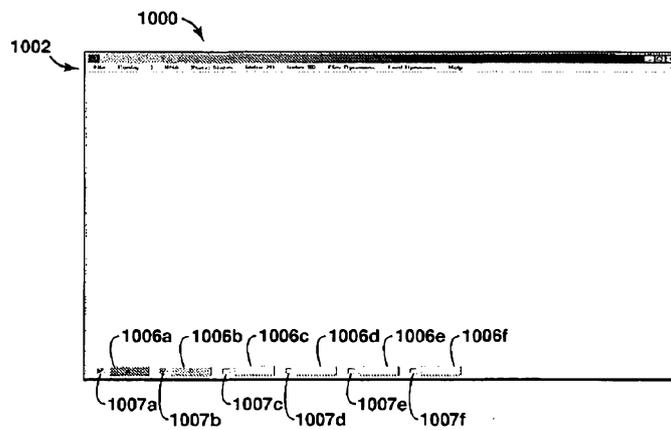
Фиг. 7



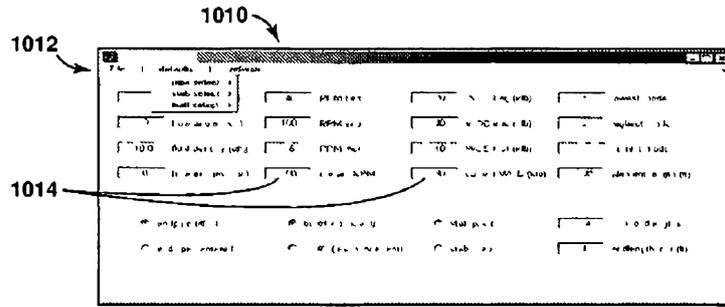
Фиг. 8



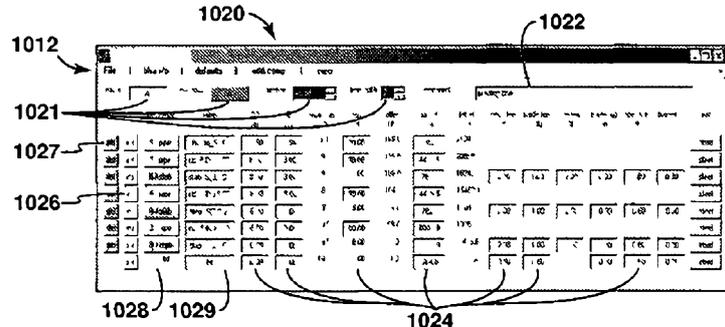
Фиг. 9



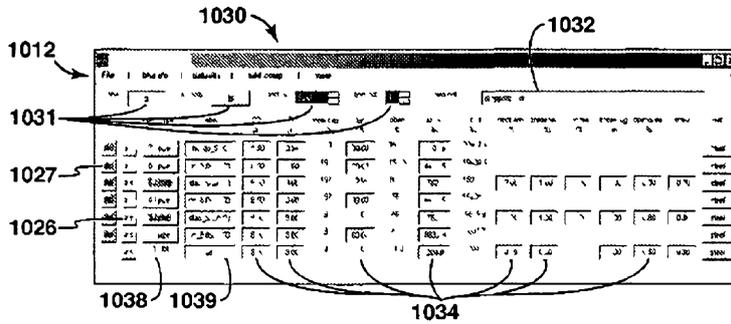
Фиг. 10А



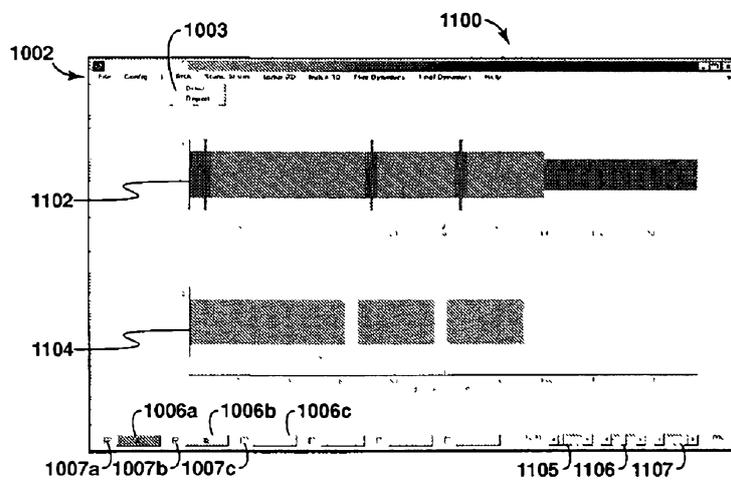
Фиг. 10В



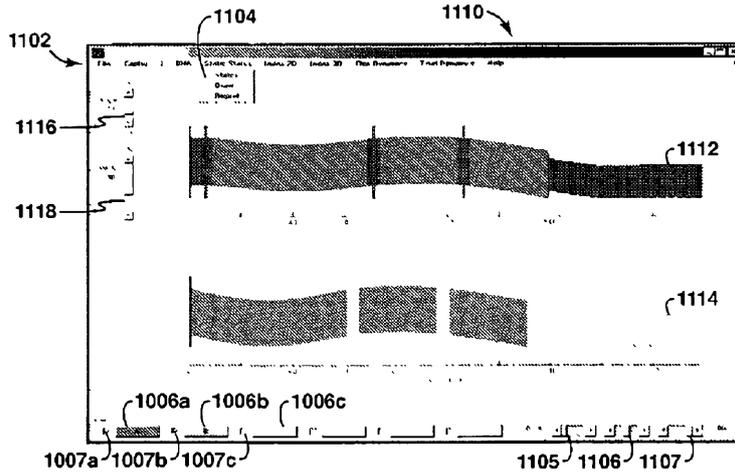
Фиг. 10С



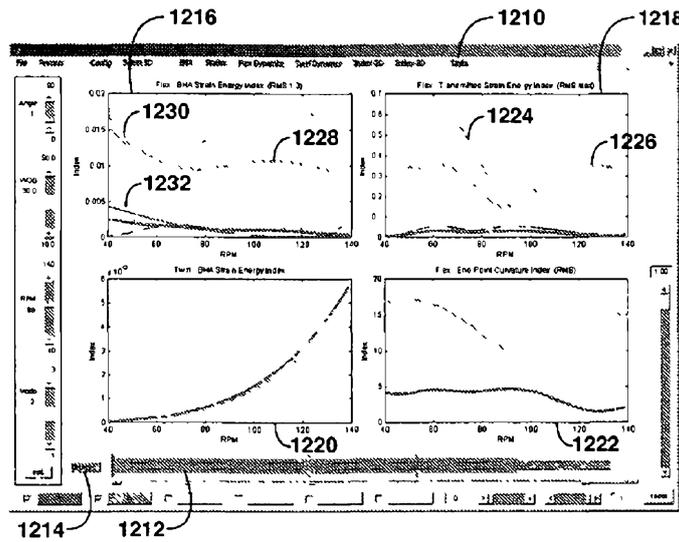
Фиг. 10D



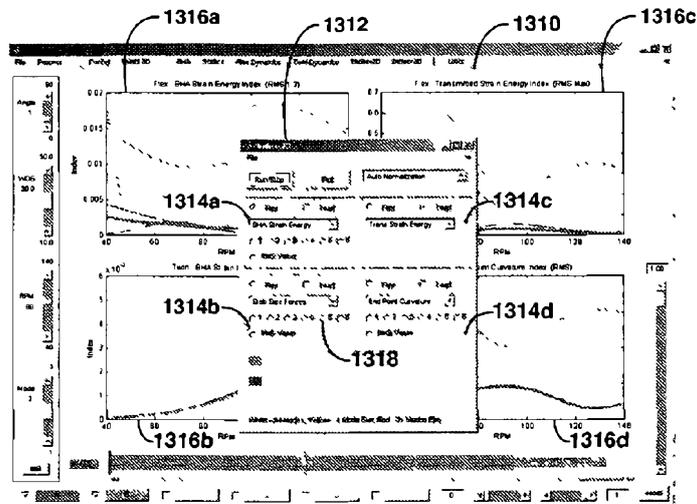
Фиг. 11А



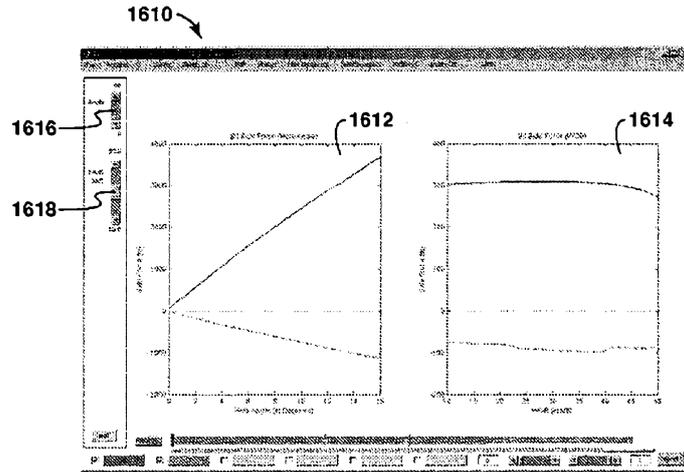
Фиг. 11В



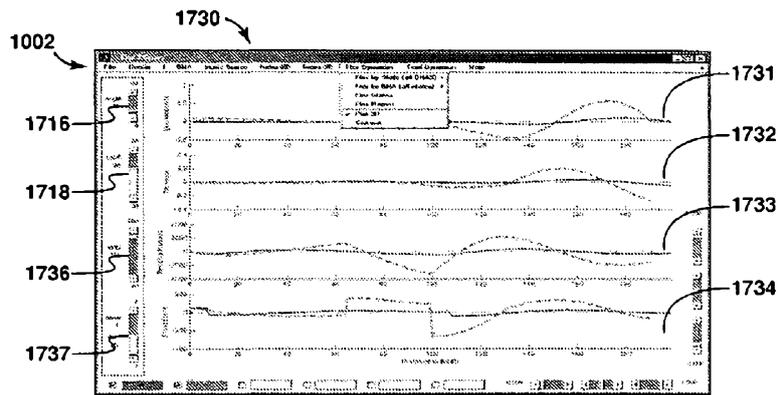
Фиг. 12



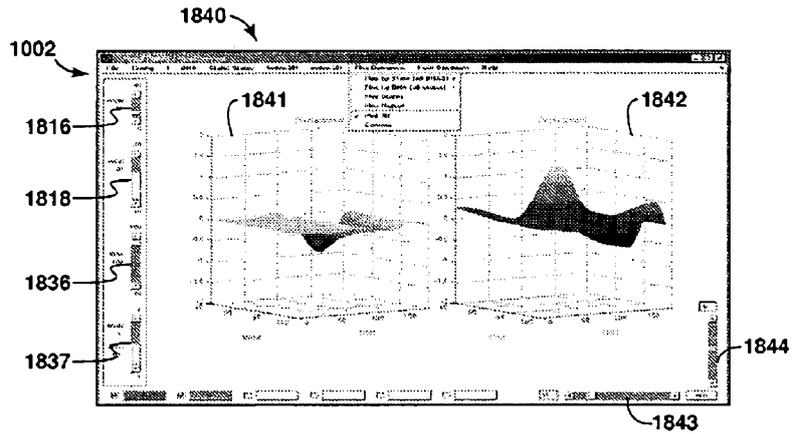
Фиг. 13



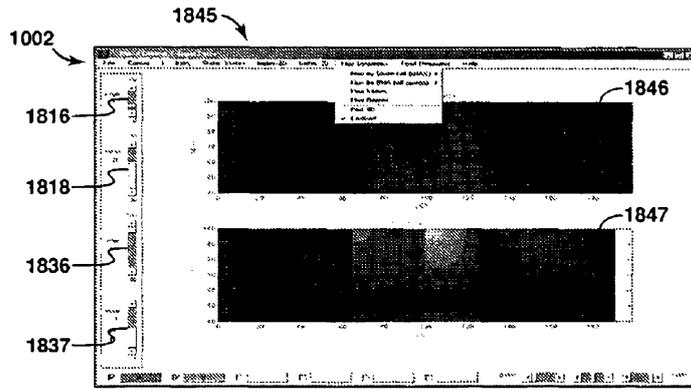
Фиг. 16



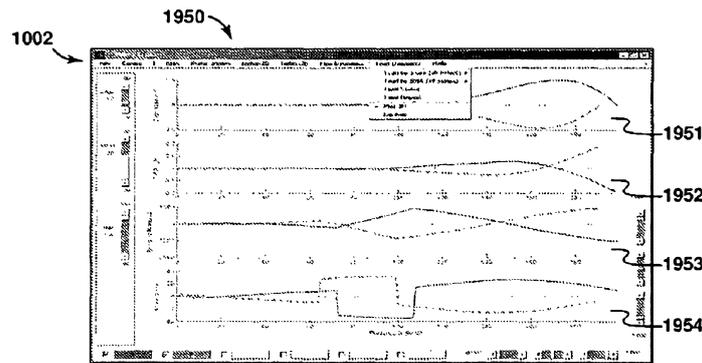
Фиг. 17



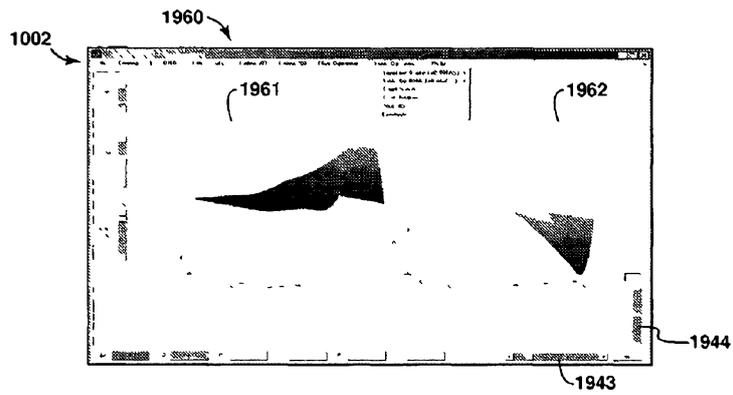
Фиг. 18А



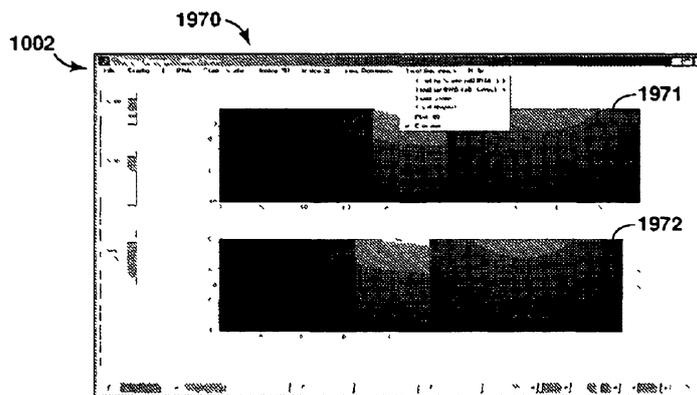
Фиг. 18В



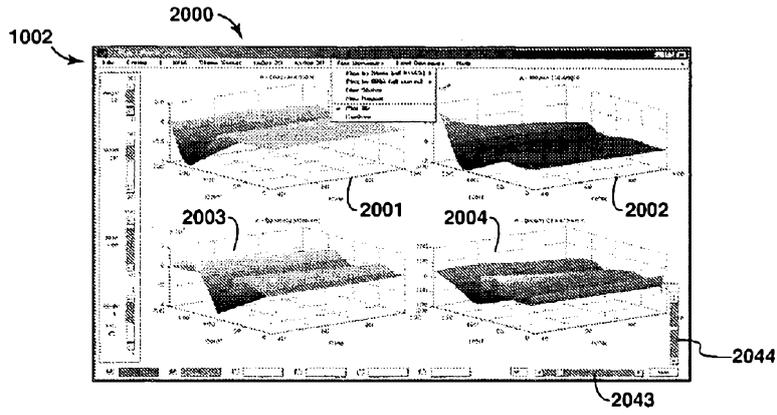
Фиг. 19А



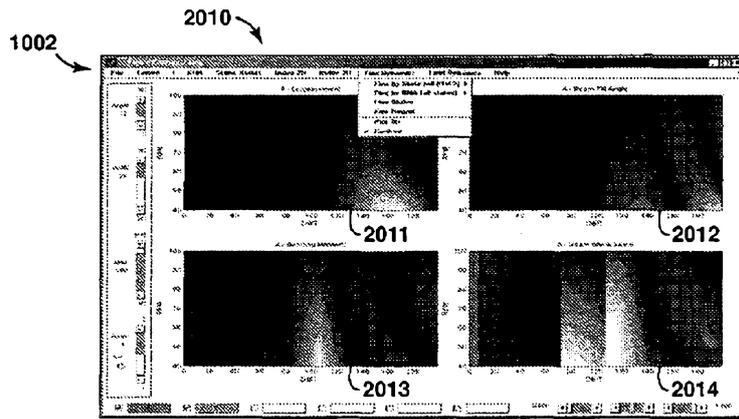
Фиг. 19В



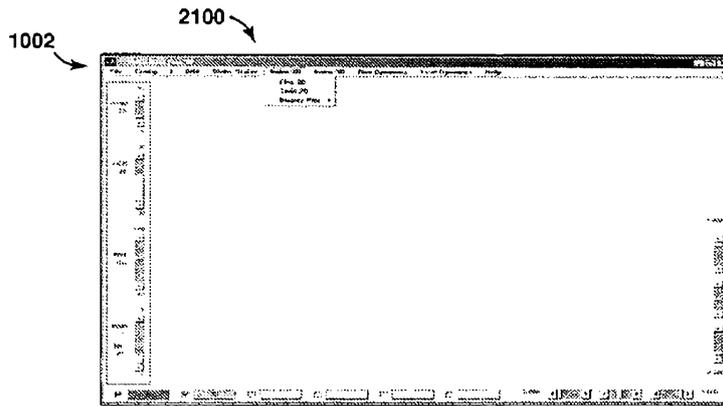
Фиг. 19С



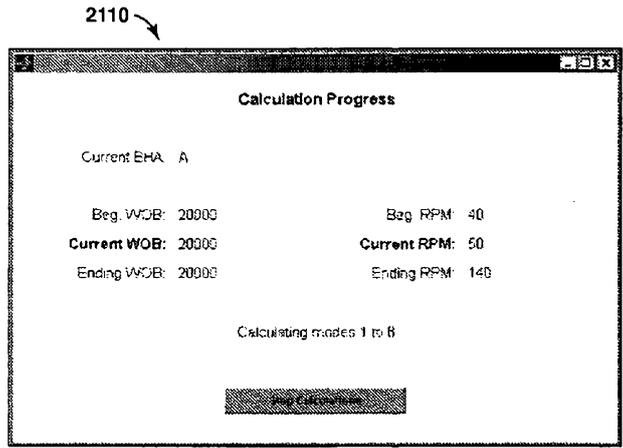
Фиг. 20А



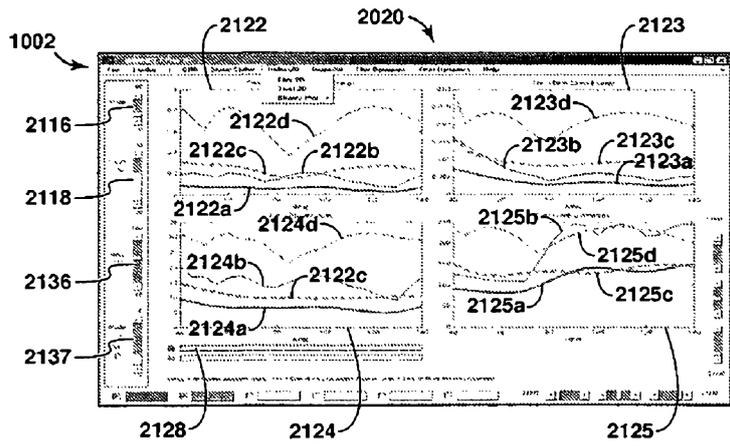
Фиг. 20В



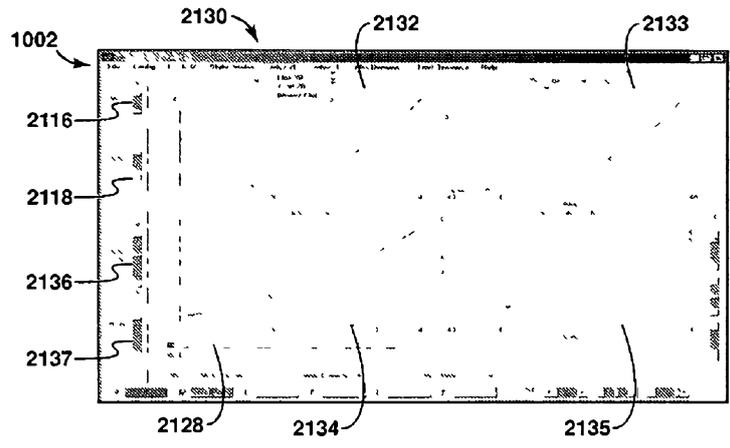
Фиг. 21А



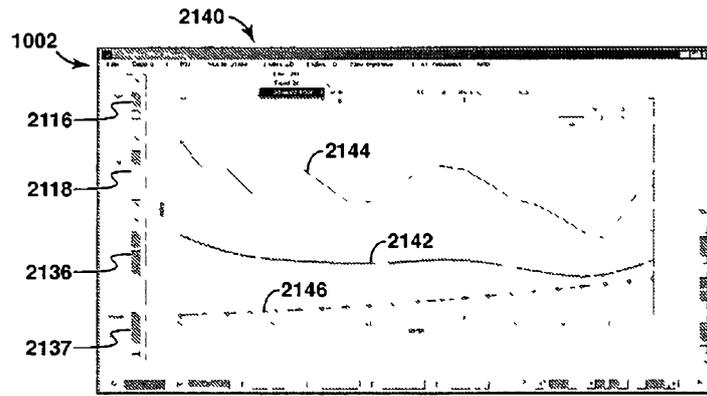
Фиг. 21В



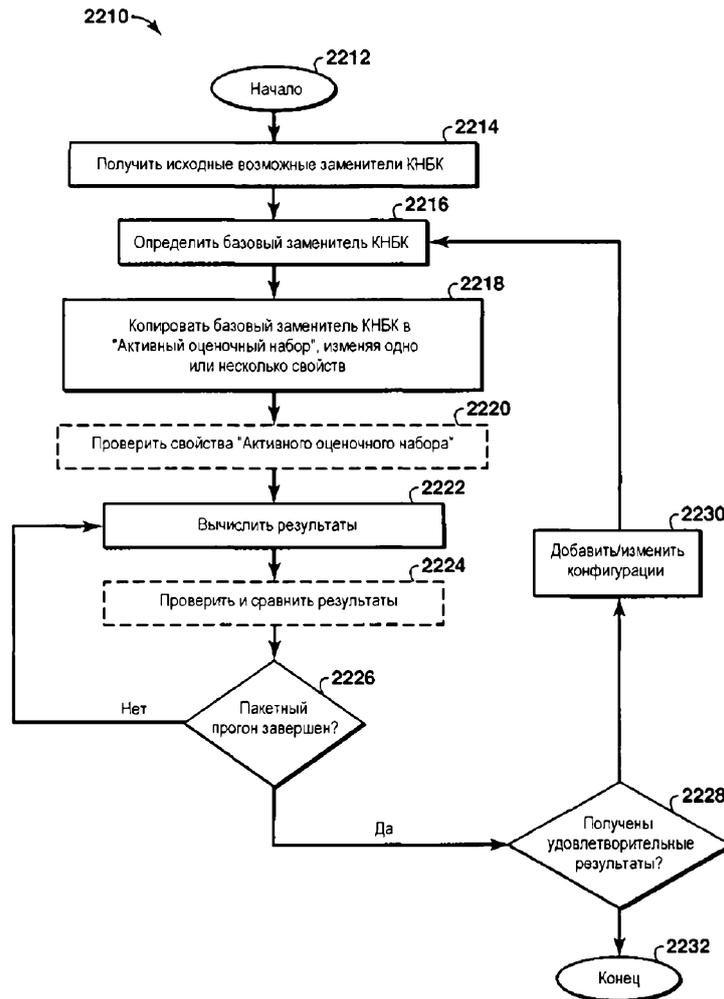
Фиг. 21С



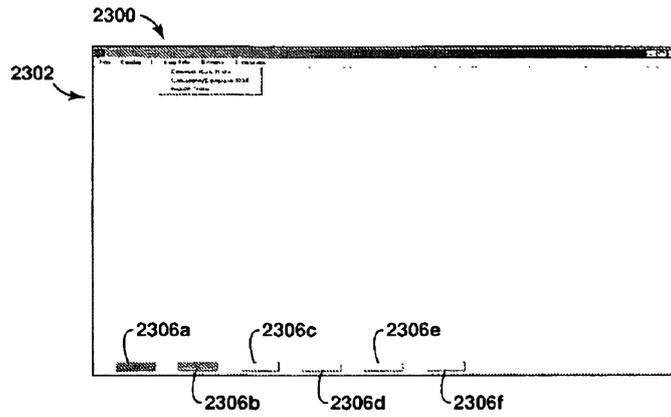
Фиг. 21D



Фиг. 21Е



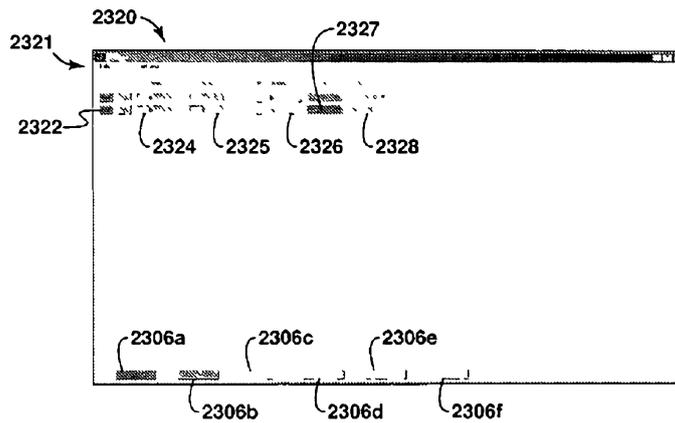
Фиг. 22



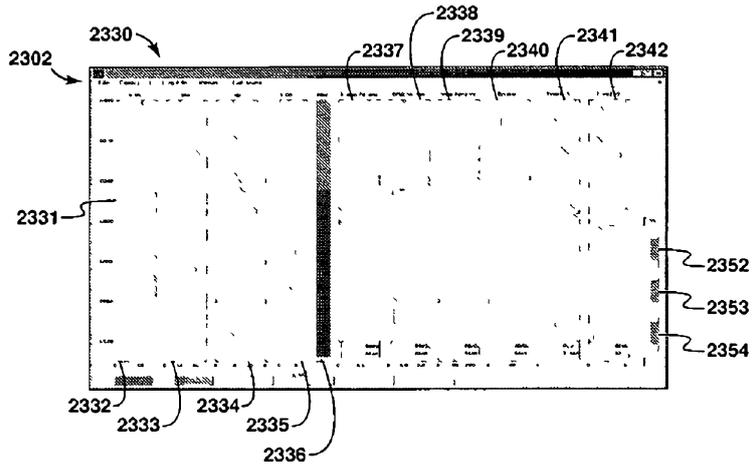
Фиг. 23А

	A	B	C	D	E
1	глубина	wob	rpm	rop	mse
2	6000	10600.4	87.42734	21.57391	36200.14
3	6001	10469.29	80.93805	19.93806	28742.66
4	6002	10977.88	80.30625	19.25371	26362.07
5	6003	10547.13	81.00431	18.26779	28800.57
6	6004	10868.41	88.40511	22.07111	34976.24
7	6005	10427.28	88.17861	18.66668	36581.03
8	6006	10709.65	80.31921	18.56332	27496.1
9	6007	10192.68	89.85639	18.82523	3940.2
10	6008	10114.99	89.81298	18.88884	39609.2
11	6009	10533.82	89.48103	21.0887	37715.95
12	6010	10056.64	86.66617	21.3486	36842.9
13	6011	10851.66	81.30286	21.25888	27368.26
14	6012	10746.78	80.36914	17.75059	26949.14
15	6013	10667.17	88.78165	22.52675	35888.51
16	6014	10193.86	88.25132	18.8149	37337.84

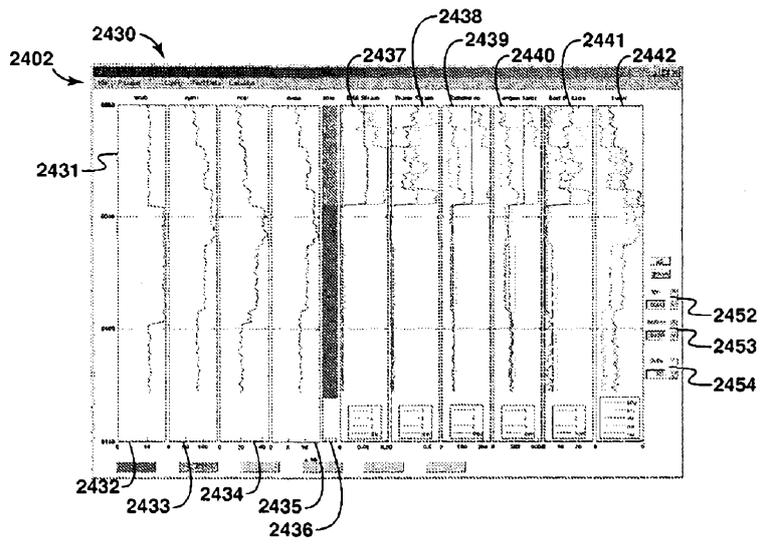
Фиг. 23В



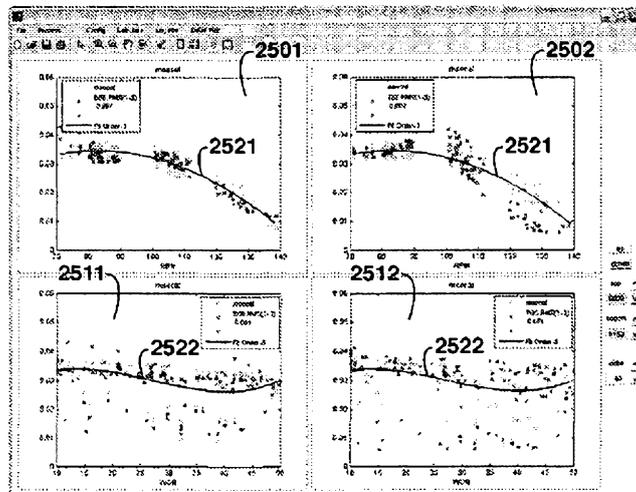
Фиг. 23С



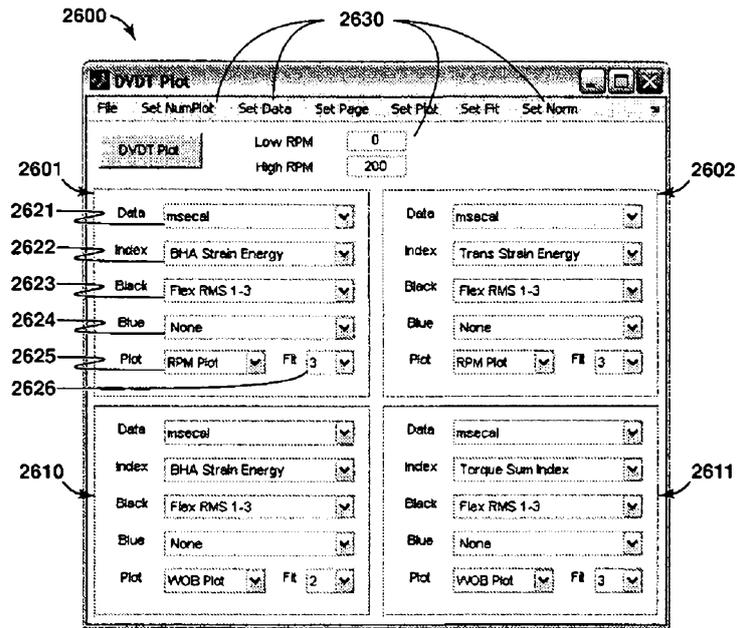
Фиг. 23D



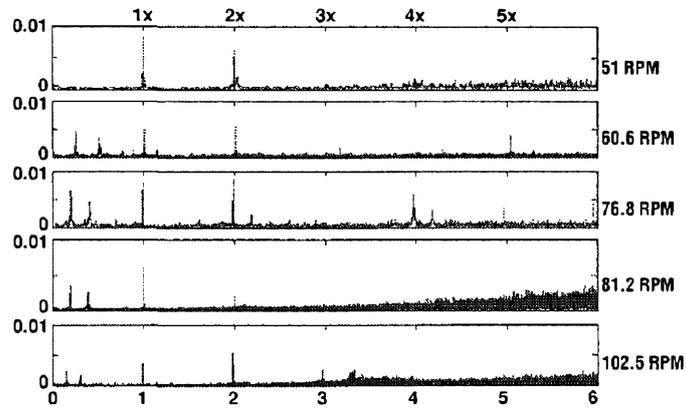
Фиг. 24



Фиг. 25



Фиг. 26



Фиг. 27

