

Настоящее изобретение относится к сборному скважинному инструменту, в частности, предназначенному для использования в стволе скважины для добычи углеводородов, содержащему корпус и оправку, проходящую вдоль аксиального направления в корпус, и несущую систему, предназначенную для передачи осевой нагрузки между корпусом и оправкой, обеспечивающую возможность вращения корпуса относительно и вокруг оправки и содержащую по меньшей мере две несущие ступени, каждая из которых выполнена с возможностью передачи части осевой нагрузки, и каждая несущая ступень содержит средство в виде подшипников.

В соответствии с дополнительными аспектами изобретение относится к несущей системе, предназначенной для использования в таком сборном скважинном инструменте, и к способу проектирования такого сборного скважинного инструмента.

При операциях бурения и заканчивания нефтяных скважин используется сборный скважинный инструмент в виде трубчатой бурильной колонны. Эти бурильные колонны могут состоять из трубчатых компонентов различных типов и размеров, таких как бурильные трубы, тяжелые бурильные трубы, утяжеленные бурильные трубы, хвостовик, обсадные трубы и насосно-компрессорные трубы. Эти компоненты могут быть использованы в различных конфигурациях.

Эти бурильные колонны подвергаются механическому растяжению и сжатию вследствие массы бурильной колонны и трения о стенку ствола скважины. Требуется подшипниковый узел, если часть бурильной колонны должна приводиться во вращение независимо от остальной части бурильной колонны. Такой подшипниковый узел подвергается такому же нагружению при растяжении и сжатии, как и окружающие трубчатые элементы в бурильной колонне.

При данном типе применения подшипниковый узел, как правило, предусмотрен в кольцевом пространстве, которое имеется между трубчатым концом одного компонента бурильной колонны, функционирующего как оправка, и трубчатым концом другого компонента бурильной колонны, функционирующего как корпус.

Поперечные сечения оправки и поперечные сечения корпуса часто ограничены определенными пределами вследствие требований, предъявляемых на практике. Например, максимальное поперечное сечение трубчатых элементов, предназначенных для использования в стволе скважины, ограничено необходимостью иметь кольцевое пространство между стволом скважины и трубчатыми элементами для обеспечения возможности прохода достаточного количества бурового раствора, содержащего буровой шлам. Минимальное поперечное сечение может быть ограничено требованием обеспечения возможности достаточного потока бурового раствора или создания возможности пропускания предметов заданного размера, таких как пробки для цементирования скважины или развертываемые инструменты, спускаемые в скважину на тросе. Кроме того, минимальная толщина стенки оправки и корпуса требуется для обеспечения достаточной прочности.

Эти требования ограничивают пространство, доступное для монтажа подшипникового узла в кольцевом пространстве. Одна несущая ступень, которая вставляется в имеющееся пространство, может иметь прочность, недостаточную для того, чтобы нести нагрузку, которой подвергается сборный скважинный инструмент. Следовательно, было предложено использовать несущую систему, имеющую множество несущих ступеней, выполненных с возможностью передачи части осевой нагрузки параллельно друг другу.

На практике соответствующие несущие ступени расположены в кольцевом пространстве с аксиальным смещением друг относительно друга, так что они функционируют параллельно друг другу при передаче осевой нагрузки от корпуса к оправке.

Было установлено, что в том случае, когда каждая несущая ступень несущей системы может передавать определенную максимальную статическую нагрузку до разрушения, последовательность несущих ступеней разрушается уже при статической нагрузке, которая существенно меньше, чем упомянутая максимальная нагрузка на несущую ступень, умноженная на число несущих ступеней в последовательности. Кроме того, в условиях вращения срок службы системы до усталостного разрушения существенно меньше, чем можно было бы ожидать, исходя из заданной усталостной долговечности отдельных подшипников.

Таким образом, цель изобретения состоит в повышении максимальной допустимой нагрузки для сборного скважинного инструмента и, в частности, для несущей системы.

Другая цель изобретения состоит в создании сборного скважинного инструмента и несущей системы для такого сборного скважинного инструмента, имеющих более продолжительный срок службы.

В соответствии с изобретением одна или несколько из данных целей достигаются в сборном скважинном инструменте, содержащем корпус и оправку, проходящую вдоль аксиального направления в корпус, и несущую систему, предназначенную для передачи осевой нагрузки между корпусом и оправкой, обеспечивающую возможность вращения корпуса относительно и вокруг оправки и содержащую по меньшей мере две несущие ступени, каждая из которых выполнена с возможностью передачи части осевой нагрузки и содержит средство в виде подшипников и средство для смягчения действия, предназначенное для распределения нагрузки по существу пропорционально по соответствующим несущим ступеням.

В основе изобретения лежит понимание того, что на практике каждый из элементов, представляющих собой оправку и корпус, ведет себя как упруго деформируемый элемент, имеющий определенную механическую жесткость. Категория "механическая жесткость" в целях настоящего описания определяется как отношение силы, передаваемой через элемент на определенной длине, и величины положительного или отрицательного приращения данной длины. Для предотвращения неравномерного распределения нагрузки по несущим ступеням, возникающего из-за упругой работы оправки, корпуса и подшипников, средство для смягчения действия служит для распределения нагрузки по существу пропорционально по соответствующим несущим ступеням. Тем самым, по существу, избегают того, что некоторые из несущих ступеней будут нести нагрузку, превышающую их максимальную допустимую нагрузку, в то время, когда другие несущие ступени в последовательности по-прежнему могли бы воспринимать избыточную часть нагрузки.

По существу, пропорциональное распределение полной нагрузки по несущим ступеням в целях данной заявки понимается как включающее распределение, при котором нагрузка на несущую ступень, воспринимающую наибольшую часть полной нагрузки, не превышает более чем в 1,5 раза среднюю нагрузку, представляющую собой полную нагрузку, разделенную на число несущих ступеней в несущей системе. Предпочтительно она не превышает среднюю нагрузку более чем в 1,3 раза и более предпочтительно она не превышает среднюю нагрузку более чем в 1,1 раза.

Для избежания преждевременного превышения максимальной нагрузки в одной из несущих ступеней достаточно того, чтобы средство для смягчения действия было выполнено с возможностью распределения нагрузки по существу пропорционально по соответствующим несущим ступеням только тогда, когда нагрузка на одной или нескольких из несущих ступеней приближается к максимальной допустимой нагрузке.

Поскольку вся несущая система выходит из строя при выходе из строя только одной несущей ступени, срок службы также увеличивается в результате смягчения действия нагрузки со стороны наиболее тяжело нагруженной несущей ступени.

В одном варианте осуществления средство для смягчения действия содержит деформируемое средство, выполненное с возможностью передачи по меньшей мере части осевой нагрузки последовательно с соответствующим средством в виде подшипника. Деформируемые средства деформируются под нагрузкой, так что нагрузка в несущей ступени, которая воспринимает нагрузку, превышающую ее пропорциональную долю, частично ослабляется с "переходом" ее в деформацию деформируемого средства, тем самым в результате этого остальные несущие ступени будут, следовательно, принудительно воспринимать относительно большую часть нагрузки.

Деформируемое средство может содержать сеть из гибких гофрированных мембран с текучей средой, которые сообщаются друг с другом по текучей среде, при этом каждая несущая ступень содержит такую гибкую гофрированную мембрану с текучей средой.

Альтернативно, деформируемые средства могут быть образованы из комбинированного упругого и пластичного деформируемого материала или из по существу упруго деформируемого материала.

Преимущество наличия упругих или упругих и пластичных деформируемых средств для смягчения действия состоит в том, что это создает возможность упругого поджима средства для смягчения действия к средствам в виде подшипников, которые, следовательно, остаются в рабочем состоянии в некотором диапазоне нагрузок, включая средневысокие нагрузки по сравнению с максимально допустимой нагрузкой. Когда средневысокие нагрузки также распределяются по существу пропорционально по несущим ступеням, износ средств в виде подшипников распределяется более равномерно по соответствующим несущим ступеням, и, таким образом, общий срок службы всей несущей системы дополнительно увеличивается.

Предпочтительно механическая жесткость деформируемых средств по меньшей мере в одной из ступеней меньше механической жесткости корпуса и механической жесткости оправки, перекрываемых данной ступенью. Посредством этого соответствующим образом можно компенсировать несовместимость между упругой работой в корпусе и оправке.

В идеальном случае осевая нагрузка наиболее легко распределяется пропорционально по имеющимся в наличии несущим ступеням, если механическая жесткость каждой несущей ступени будет меньше механической жесткости корпуса и механической жесткости оправки по меньшей мере приблизительно в 2-2,5 раза на одну несущую ступень в системе. Однако это потребовало бы большой аксиальной длины всей несущей системы, что обычно невозможно обеспечить и нежелательно.

По этой причине механическая жесткость деформируемых средств в одной несущей ступени предпочтительно отличается по величине от механической жесткости деформируемых средств в другой несущей ступени. Посредством этого осевая нагрузка, передаваемая каждой несущей ступенью, может быть перераспределена по несущим ступеням так, как желательно, поскольку относительная осевая нагрузка, воспринимаемая несущей ступенью, имеющей меньшую механическую жесткость, будет меньше, чем она была бы в случае наличия такой же механической жесткости, как у другой несущей ступени. Таким образом, за счет обеспечения наименьшей механической жесткости в несущей ступени, которая в противном случае была бы наиболее тяжело нагруженной, нагрузка распределяется более пропорцио-

нально по несущим ступеням.

За счет этого уменьшается аксиальная длина, требуемая для несущей системы. На практике механическая жесткость в несущих ступенях может составлять более одной десятой от механической жесткости корпуса и/или оправки.

В соответствии со вторым аспектом изобретения создана несущая система, предназначенная для использования в сборном скважинном инструменте, в частности предназначенная для сборного инструмента, используемого на нефтепромыслах, для передачи осевой нагрузки между корпусом и оправкой, проходящей вдоль аксиального направления в корпус, обеспечивающая возможность вращения корпуса относительно и вокруг оправки и содержащая по меньшей мере две несущие ступени, каждая из которых выполнена с возможностью передачи части осевой нагрузки, и содержит средство в виде подшипников и средство для смягчения действия, предназначенное для распределения нагрузки по существу пропорционально по соответствующим несущим ступеням.

Преимущества и дополнительные варианты осуществления несущей системы согласно изобретению были представлены выше в описании, относящемся к сборному скважинному инструменту.

В соответствии с третьим аспектом изобретения разработан способ проектирования сборного скважинного инструмента в соответствии с вышеприведенным описанием, включающий следующие операции:

- а) выбор значения жесткости первой несущей ступени для одной несущей ступени;
- б) расчет для заданных значений жесткости частей корпуса, проходящих между несущими ступенями, и заданных значений жесткости частей оправки, проходящих между несущими ступенями, значения жесткости второй несущей ступени, в результате чего осевая нагрузка распределяется по существу пропорционально по соответствующим несущим ступеням, при этом выбранное значение жесткости первой несущей ступени используется как исходная величина.

Посредством этого можно избежать трудных и трудоемких эмпирических операций, выполняемых путем проб и ошибок на экспериментальной модели.

Данный способ может представлять собой часть способа изготовления сборного скважинного инструмента, в котором корпус, оправку и несущую систему, содержащую несущие ступени, полученные в соответствии с расчетом, выбирают и собирают.

В частности, в том случае, когда как оправка, так и корпус имеют механическую жесткость, которая является постоянной вдоль несущих ступеней, соответствующие значения механической жесткости остальных несущих ступеней предпочтительно выражают в виде соотношений жесткости между жесткостью первой несущей ступени и жесткостью корпуса и между жесткостью первой несущей ступени и жесткостью оправки.

Изобретение в дальнейшем будет описано более подробно и в качестве примера со ссылкой на сопровождающие чертежи, на которых изображено следующее:

фиг. 1 схематически показывает сечение сборного скважинного инструмента;

фиг. 2 показывает упруго-механическое состояние сборного скважинного инструмента, показанного на фиг. 1, для случая растяжения (часть а) и сжатия (часть б).

На фигурах аналогичные ссылочные позиции относятся к аналогичным элементам.

На фиг. 1 схематически показано сечение сборного скважинного инструмента 1. Сборный скважинный инструмент содержит трубчатый корпус 2 и трубчатую оправку 3, проходящую в аксиальном направлении в корпус 2, при этом остается кольцевое пространство между оправкой 3 и корпусом 2. Некоторое количество несущих ступеней 8, 9 предусмотрено в кольцевом пространстве, при этом каждая несущая ступень присоединена к оправке с одной стороны и к корпусу с другой стороны. Несущие ступени 8 выполнены с возможностью передачи параллельно друг другу растягивающей осевой силы между оправкой 3 и корпусом 2. Несущие ступени 9 выполнены с возможностью передачи сжимающей силы между корпусом 2 и оправкой 3.

Как также показано на фиг. 1, каждая из несущих ступеней 8, 9 содержит средства 4, 6 в виде подшипников и средства 5, 7 для смягчения действия. Подшипники могут быть любого типа, включая роликовые подшипники, шариковые подшипники, сферические роликоподшипники, радиально-упорные роликоподшипники (подшипники с коническими роликами), роликоподшипники с роликами в виде усеченных конусов. Удлиненные подшипники, расположенные радиально относительно оси вращения корпуса 2 и оправки 3, предпочтительны, поскольку нагрузка в таких подшипниках распределяется на большей части поверхности подшипника. Средство для смягчения действия может быть предусмотрено в виде любого деформируемого материала, такого как пластик или резиноподобный материал, или в виде пружины сжатия, такой как кольцевая тарельчатая пружина. Как можно видеть, средство для смягчения действия предусмотрено для передачи нагрузки в каждой несущей ступени последовательно с соответствующими средствами в виде подшипников в этой ступени.

За счет размещения деформируемого материала последовательно со средствами в виде подшипников механическую жесткость несущей ступени снижают по отношению к механической жесткости средств в виде подшипников самих по себе. Можно регулировать распределение силы по имеющимся в наличии, несущим ступеням за счет выполнения несущей ступени, которая при отсутствии средств для

смягчения действия воспринимала бы нагрузку, превышающую пропорциональную, с меньшей механической жесткостью по сравнению с несущей ступенью, которая при отсутствии средств для смягчения действия воспринимала бы нагрузку, которая меньше пропорциональной.

Сборный скважинный инструмент, изображенный на фиг. 1, имеет несущую систему с четырьмя несущими ступенями. Было установлено, что при использовании в типовом стволе скважины для добычи углеводородов четыре несущие ступени обеспечивают надлежащие оптимальные соотношения между прочностью, надежностью, усталостной долговечностью и размером инструмента в сборе. Тем не менее, следует понимать, что число несущих ступеней можно изменять до любого числа несущих ступеней при их минимальном количестве, равном двум.

Ниже способ проектирования сборного скважинного инструмента в соответствии с изобретением дополнительно разъяснен на основе математического подхода. Математический подход обобщен для любого числа несущих ступеней, обозначенного n . Следует отметить, что результаты применения математического подхода, рассмотренного выше, имеют силу для нагружения как при сжимающих, так и при растягивающих нагрузках, и он также имеет силу для случая, в котором следующие друг за другом деформируемые средства предварительно деформированы друг относительно друга.

Фиг. 2 показывает упруго-механическое состояние сборного скважинного инструмента, который изображен на фиг. 1, при этом фиг. 2a относится к скважинному инструменту, находящемуся под действием растягивающей нагрузки, а фиг. 2b относится к скважинному инструменту, находящемуся под действием сжимающей нагрузки. Каждая из несущих ступеней обозначена индексом k , где $k=1, 2, \dots, n$. Индекс $k=1$ относится к первой несущей ступени, в которой полная нагрузка (растягивающая или сжимающая) действует в оправке. Индекс $k=n$ относится к последней несущей ступени, где полная нагрузка (растягивающая или сжимающая) действует в корпусе.

Корпус и оправка могут состоять из различных секций, имеющих, например, разную длину или разные площади поперечного сечения. Каждая такая секция обозначена индексом i . Общее число секций равно $2n$. Каждая такая секция имеет механическую жесткость, определяемую как отношение силы, передаваемой через секцию, имеющую определенную длину, и величины приращения или уменьшения этой длины. Значения жесткости соответствующих секций вдоль корпуса обозначены K_{hi} , где $i=1, 2, \dots, 2n$. Значения жесткости соответствующих секций вдоль оправки обозначены K_{mi} , где $i=1, 2, \dots, 2n$.

Смещения точек с индексами между секциями вдоль оправки и корпуса обозначены U_j , где $j=1, 2, 3, \dots, (4n+2)$. Четные числа j соответствуют точкам на корпусе, и нечетные числа j соответствуют точкам на оправке.

Жесткость K_{mi} оправки и жесткость K_{hi} корпуса для определенной секции (с номером i) можно рассчитать на основе размеров и свойств материала поперечных сечений, используя следующие выражения:

$$K_{hi} = \frac{A_{hi} E_h}{L_i},$$

$$K_{mi} = \frac{A_{mi} E_m}{L_i},$$

где A_{hi} - площадь поперечного сечения секции i корпуса, m^2 ;

A_{mi} - площадь поперечного сечения секции i оправки, m^2 ;

L_i - длина секции i корпуса или оправки, m ;

E_h - модуль упругости материала корпуса, H/m^2 ;

E_m - модуль упругости материала оправки, H/m^2 .

Значения жесткости $K_1, K_2, \dots, K_n$ несущих ступеней соответствуют комбинированной жесткости комбинации подшипника и деформируемого средства, в данном примере выполненного в виде пружины, при этом подшипник и деформируемое средство расположены последовательно в несущей ступени с номером k .

$$K_k = \frac{K_{spring,k} K_{bearing,k}}{K_{spring,k} + K_{bearing,k}},$$

где $K_{bearing,k}$ и $K_{spring,k}$ соответственно представляют собой жесткость подшипника и жесткость пружины для k -й несущей ступени.

Задача состоит в том, чтобы найти такие соответствующие значения жесткости $K_{spring,k}$ пружины, чтобы полная осевая сила F , передаваемая между оправкой и корпусом, была пропорционально распределена по имеющимся в наличии несущим ступеням. Другими словами, сила F_k , передаваемая каждой несущей ступенью, в идеальном случае должна составлять $1/n$ -ую часть полной силы:

$$F_k = \frac{1}{n} F.$$

В том случае, когда достигается пропорциональное распределение силы, смещения (сдвиги) U_j (см. фиг. 2) вдоль оправки будут составлять:

$U_1 = 0$ (принято за базу)

$$U_3 = \frac{F}{K_{m1}},$$

$$U_5 = U_3 + \frac{n-1}{n} \frac{F}{K_{m2}} = U_3 + \frac{1}{n} \left[(n-1) \frac{1}{K_{m2}} \right] F,$$

$$U_7 = U_5 + \frac{F}{K_{m3}} = U_3 + \frac{1}{n} \left[(n-1) \left(\frac{1}{K_{m2}} + \frac{1}{K_{m3}} \right) \right] F,$$

$$U_9 = U_7 + \left(1 - \frac{2}{n} \right) \frac{F}{K_{m4}} = U_3 + \frac{1}{n} \left[(n-1) \left(\frac{1}{K_{m2}} + \frac{1}{K_{m3}} \right) + (n-2) \left(\frac{1}{K_{m4}} \right) \right] F,$$

$$U_{11} = U_9 + \left(1 - \frac{2}{n} \right) \frac{F}{K_{m5}} = U_3 + \frac{1}{n} \left[(n-1) \left(\frac{1}{K_{m2}} + \frac{1}{K_{m3}} \right) + (n-2) \left(\frac{1}{K_{m4}} + \frac{1}{K_{m5}} \right) \right] F,$$

$$U_{13} = U_{11} + \left(1 - \frac{3}{n} \right) \frac{F}{K_{m6}} = U_3 + \frac{1}{n} \left[(n-1) \left(\frac{1}{K_{m2}} + \frac{1}{K_{m3}} \right) + (n-2) \left(\frac{1}{K_{m4}} + \frac{1}{K_{m5}} \right) + (n-3) \left(\frac{1}{K_{m6}} \right) \right] F,$$

$$U_{15} = U_{13} + \left(1 - \frac{3}{n} \right) \frac{F}{K_{m7}} = U_3 + \frac{1}{n} \left[(n-1) \left(\frac{1}{K_{m2}} + \frac{1}{K_{m3}} \right) + (n-2) \left(\frac{1}{K_{m4}} + \frac{1}{K_{m5}} \right) + (n-3) \left(\frac{1}{K_{m6}} + \frac{1}{K_{m7}} \right) \right] F,$$

и т.д.

Выбирают значение K_1 жесткости первой несущей ступени. Обычно жесткость средств в виде подшипников имеет заданное значение, так что выбранную жесткость несущей ступени получают путем соответствующего выбора средства для смягчения действия, имеющего соответствующее значение жесткости. Выбор соответствующей жесткости несущей ступени может быть основан на соображениях, связанных с прочностью. В желательном случае пропорционально распределенной силы, смещения U_j вдоль корпуса могут быть выражены через K_1

$$U_2 = U_3 + \frac{1}{K_1} \frac{F}{n},$$

$$U_4 = U_2 + \frac{1}{n} \frac{F}{K_{h1}} = U_3 + \frac{1}{n} \left[\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_{h1}} \right] F,$$

$$U_6 = U_4 + \frac{1}{n} \frac{F}{K_{h2}} = U_3 + \frac{1}{n} \left[\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_{h1}} + \frac{1}{K_{h2}} \right] F,$$

$$U_8 = U_6 + \frac{2}{n} \frac{F}{K_{h3}} = U_3 + \frac{1}{n} \left[\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_{h1}} + \frac{1}{K_{h2}} + \frac{2}{K_{h3}} \right] F,$$

$$U_{10} = U_8 + \frac{2}{n} \frac{F}{K_{h4}} = U_3 + \frac{1}{n} \left[\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_{h1}} + \frac{1}{K_{h2}} + \frac{2}{K_{h3}} + \frac{2}{K_{h4}} \right] F,$$

$$U_{12} = U_{10} + \frac{3}{n} \frac{F}{K_{h5}} = U_3 + \frac{1}{n} \left[\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_{h1}} + \frac{1}{K_{h2}} + \frac{2}{K_{h3}} + \frac{2}{K_{h4}} + \frac{3}{K_{h5}} \right] F,$$

$$U_{14} = U_{12} + \frac{3}{n} \frac{F}{K_{h6}} = U_3 + \frac{1}{n} \left[\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_{h1}} + \frac{1}{K_{h2}} + \frac{2}{K_{h3}} + \frac{2}{K_{h4}} + \frac{3}{K_{h5}} + \frac{3}{K_{h6}} \right] F,$$

и т.д.

После выбора значения жесткости K_1 можно математически определить оптимальные значения жесткости $K_2, K_3, \dots, K_n$ для остальных несущих ступеней, чтобы получить равномерное распределение силы. Это делают следующим образом. Для оптимальной жесткости второй несущей ступени должно иметь силу следующее:

$$F_2 = K_2(U_6 - U_7) \equiv \frac{1}{n} F ,$$

$$F_3 = K_3(U_{10} - U_{11}) \equiv \frac{1}{n} F ,$$

$$F_4 = K_4(U_{14} - U_{15}) \equiv \frac{1}{n} F ,$$

и т.д.

При подстановке выражений, приведенных выше для смещений U_j вдоль оправки (нечетные j) и корпуса (четные j), получают оптимальные соотношения значений жесткости несущих ступеней K_k/K_1 , $k=2, 3, \dots, n$

$$\frac{K_2}{K_1} = \left[1 + \left(\frac{K_1}{K_{h1}} + \frac{K_1}{K_{h2}} \right) - (n-1) \left(\frac{K_1}{K_{m2}} + \frac{K_1}{K_{m3}} \right) \right]^{-1} ,$$

$$\frac{K_3}{K_1} = \left[1 + \left(\frac{K_1}{K_{h1}} + \frac{K_1}{K_{h2}} \right) + 2 \left(\frac{K_1}{K_{h3}} + \frac{K_1}{K_{h4}} \right) - (n-1) \left(\frac{K_1}{K_{m2}} + \frac{K_1}{K_{m3}} \right) - (n-2) \left(\frac{K_1}{K_{m4}} + \frac{K_1}{K_{m5}} \right) \right]^{-1} ,$$

$$\frac{K_4}{K_1} = \left[1 + \left(\frac{K_1}{K_{h1}} + \frac{K_1}{K_{h2}} \right) + 2 \left(\frac{K_1}{K_{h3}} + \frac{K_1}{K_{h4}} \right) + 3 \left(\frac{K_1}{K_{h5}} + \frac{K_1}{K_{h6}} \right) \dots \right. \\ \left. \dots - (n-1) \left(\frac{K_1}{K_{m2}} + \frac{K_1}{K_{m3}} \right) - (n-2) \left(\frac{K_1}{K_{m4}} + \frac{K_1}{K_{m5}} \right) - (n-3) \left(\frac{K_1}{K_{m6}} + \frac{K_1}{K_{m7}} \right) \right]^{-1} ,$$

и т.д.

Эти уравнения имеют силу для общей ситуации, при которой значения жесткости корпуса и оправки могут различаться для каждой секции i . Однако для возможно более реалистичной ситуации, при которой значения жесткости корпуса и оправки являются постоянными вдоль секций, т.е. принимая, что $K_{m1}=K_{m2}=\dots=K_{mn}=K_m$ для оправки и что $K_{h1}=K_{h2}=\dots=K_{hn}=K_h$ для корпуса, уравнения могут быть существенно упрощены. В этом случае возможные значения жесткости несущих ступеней задаются следующими уравнениями:

$$\frac{K_k}{K_1} = \left[1 + A_k \frac{K_1}{K_h} + B_k \frac{K_1}{K_m} \right]^{-1} ,$$

$$A_k = k(k-1) ,$$

$$B_k = (k-1)(k-2n)$$

Как можно видеть, оптимальные соотношения K_k/K_1 жесткости, при которых сила распределяется пропорционально по имеющимся в наличии несущим ступеням, зависят только от отношений K_1/K_h и K_1/K_m . Различия в значениях оптимальной жесткости уменьшаются, когда значение жесткости первой несущей ступени выбирается меньшим.

Следует отметить, что жесткость как категория, включая K_h , K_m , K_1 , K_k , задается в единицах силы на единичное расстояние [Н/м]. Множители A_k и B_k , а также индексирующие числа являются безразмерными.

Если механическая жесткость деформируемого средства для смягчения действия в каждой несущей ступени будет меньше механической жесткости корпуса или механической жесткости оправки (какая бы величина из двух ни была наименьшей) по меньшей мере в 2-2,5 раза на несущую ступень в несущей системе, то осевая нагрузка наиболее легко распределяется пропорционально по имеющимся в наличии несущим ступеням, поскольку отношения между значениями жесткости различных несущих ступеней приближаются к единице.

Однако при наличии ограничений, налагаемых при практическом применении, таких как размер и требуемая прочность, механическая жесткость деформируемого средства для смягчения действия в каждой несущей ступени приблизительно в 0,25-2,5 раза меньше в расчете на несущую ступень, чем меньшее значение жесткости корпуса или оправки. В этом случае более пропорциональное распределение силы по имеющимся в наличии несущим ступеням может быть получено за счет оптимизации значений жесткости соответствующих несущих ступеней. Предпочтительно посредством этого предотвращается ситуация, при которой одна отдельная несущая ступень воспринимает существенно большую нагрузку, чем пропорциональная часть полной нагрузки, например, самое большее $1,5 \times F/n$.

Для сборного скважинного инструмента, имеющего несущую систему с двумя несущими ступенями и постоянную жесткость вдоль оправки и корпуса, оптимальная жесткость K_2 , которая согласуется с выбранным значением K_1 для достижения пропорционального распределения силы на обеих несущих ступенях, определяется, таким образом, выражением

$$\frac{K_2}{K_1} = \left[1 + 2 \frac{K_1}{K_h} - 2 \frac{K_1}{K_m} \right]^{-1}.$$

Для сборного скважинного инструмента, имеющего несущую систему с тремя несущими ступенями и постоянную жесткость вдоль оправки и корпуса, оптимальные значения жесткости K_2 и K_3 составляют

$$\frac{K_2}{K_1} = \left[1 + 2 \frac{K_1}{K_h} - 4 \frac{K_1}{K_m} \right]^{-1},$$

$$\frac{K_3}{K_1} = \left[1 + 6 \frac{K_1}{K_h} - 6 \frac{K_1}{K_m} \right]^{-1}.$$

Для сборного скважинного инструмента, имеющего несущую систему с четырьмя несущими ступенями и постоянную жесткость вдоль оправки и корпуса, оптимальные значения жесткости K_2 , K_3 и K_4 составляют

$$\frac{K_2}{K_1} = \left[1 + 2 \frac{K_1}{K_h} - 6 \frac{K_1}{K_m} \right]^{-1},$$

$$\frac{K_3}{K_1} = \left[1 + 6 \frac{K_1}{K_h} - 10 \frac{K_1}{K_m} \right]^{-1},$$

$$\frac{K_4}{K_1} = \left[1 + 12 \frac{K_1}{K_h} - 12 \frac{K_1}{K_m} \right]^{-1}.$$

В вышеприведенном разъяснении было сделано допущение, что механическая жесткость изменяется линейно при изменении нагрузки. В тех случаях, когда механическая реакция элемента на нагрузку является нелинейной, механическую жесткость данного элемента следует определять для нагрузки, которая имеет место, если полная расчетная нагрузка для несущей системы достаточно пропорционально распределена по несущим ступеням.

Следует понимать, что практические ограничения, такие как наличие пружин, могут привести к конструкции, в которой некоторые из значений L_i длины секций корпуса/оправки должны быть больше, чем другие, для получения заданной жесткости несущей ступени. В этом случае уравнения, приведенные выше, должны быть адаптированы для данного конкретного случая.

Пример. Рассматривается инструмент для бурения нефтяных скважин, который способен передавать 2000 кН при нагружении как при растяжении, так и при сжатии. Полная сила должна быть равномерно распределена по $n=4$ несущим ступеням. Таким образом, отсутствует преждевременное превышение статической прочности любого из подшипников, и, кроме того, срок службы несущей системы увеличивается. Инструмент "базируется" на круглой цилиндрической оправке и круглом цилиндрическом корпусе.

Функциональные требования к конструкции накладывают ограничения на размеры, в частности на площади поперечных сечений, оправки и корпуса. Оправка и корпус изготовлены из стали с модулем упругости $E_m = E_h = 2,1 \times 10^5$ Н/мм². Наружный диаметр корпуса ограничен максимальным значением, составляющим 181 мм. Внутренний диаметр цилиндрической оправки ограничен минимальным значением, составляющим 63,5 мм.

Подшипники, которые используются, представляют собой упорные подшипники, которые имеют внутренний диаметр (диаметр вала), составляющий 110 мм, наружный диаметр (диаметр корпуса), составляющий 145 мм, и аксиальную длину, составляющую 25 мм. Жесткость всех подшипников в том виде, как они получены от производителя подшипников, составляет $K_{bearing} = 4,11 \times 10^6$ Н/мм и определяется как отношение осевой силы, приложенной к подшипнику, и уменьшения аксиальной длины подшипника, возникающего в результате приложением осевой силы к подшипнику. Наружный диаметр оправки вдоль секций оправки составляет 100 мм, так что подшипники могут быть установлены и сцентрированы в инструменте. Внутренний диаметр корпуса вдоль секций корпуса составляет 150 мм. Длина (L_1 , L_2 , L_3 и т.д.) секций вдоль корпуса и оправки, необходимая для подшипников, пружины и зажимных приспособлений/оснастки для оправки и корпуса составляет 75 мм.

Для обеспечения возможности передачи нагрузки, составляющей 500 кН, на несущей ступени предусмотрена тарельчатая пружина, имеющая толщину 20 мм и жесткость $K_{spring} = 1,35 \times 10^6$ Н/мм.

Жесткость K_h каждой секции длиной 75 мм вдоль корпуса определяется следующим выражением:

$$K_h = \frac{E_h A_h}{L} = \frac{2,1 \times 10^5 \times \frac{\pi}{4} (181^2 - 150^2)}{75} = 22,6 \times 10^6 \text{ Н/мм}.$$

Жесткость K_m каждой секции длиной 75 мм вдоль оправки определяется следующим выражением:

$$K_m = \frac{E_m A_m}{L} = \frac{2,1 \times 10^5 \times \frac{\pi}{4} (100^2 - 63,5^2)}{75} = 13,1 \times 10^6 \text{ Н/мм.}$$

В первой несущей ступени две тарельчатые пружины установлены последовательно, что в более практической ситуации приводит к уменьшению жесткости в два раза. Комбинированная жесткость K_1 двух пружин и подшипника, установленных последовательно в первой несущей ступени, определяется выражением

$$K_1 = \frac{\frac{1}{2} S_{spring} \times S_{bearing}}{\frac{1}{2} S_{spring} + S_{bearing}} = \frac{\frac{1}{2} \times 1,35 \times 10^6 \times 4,11 \times 10^6}{\frac{1}{2} \times 1,35 \times 10^6 + 4,11 \times 10^6} = 0,58 \times 10^6 \text{ Н/мм.}$$

Таким образом, соответствующие отношения значений жесткости K_1/K_h и K_1/K_m становятся следующими:

$$\frac{K_1}{K_h} = \frac{0,58 \times 10^6}{22,6 \times 10^6} = 0,025,$$

$$\frac{K_1}{K_m} = \frac{0,58 \times 10^6}{13,1 \times 10^6} = 0,044.$$

При использовании данных величин можно рассчитать отношения значений жесткости для других несущих ступеней, для чего нагрузку делят пропорционально по всем несущим ступеням

$$\frac{K_2}{K_1} = \left[1 + 2 \frac{K_1}{K_h} - 6 \frac{K_1}{K_m} \right]^{-1} = [1 + 2 \times 0,025 - 6 \times 0,044]^{-1} = 1,27 \Rightarrow K_2 =$$

$$1,27 K_1,$$

$$\frac{K_3}{K_1} = \left[1 + 6 \frac{K_1}{K_h} - 10 \frac{K_1}{K_m} \right]^{-1} = [1 + 6 \times 0,025 - 10 \times 0,044]^{-1} = 1,16 \Rightarrow K_3 =$$

$$1,16 K_1,$$

$$\frac{K_4}{K_1} = \left[1 + 12 \frac{K_1}{K_h} - 12 \frac{K_1}{K_m} \right]^{-1} = [1 + 12 \times 0,025 - 12 \times 0,044]^{-1} = 1,29 \Rightarrow K_4 =$$

$$1,29 K_1.$$

Эти большие значения жесткости несущих ступеней могут быть достигнуты путем установки последовательно с подшипниками более жестких пружин, чем в ступени 1. Зависимость для комбинированной жесткости K_k на несущей ступени k (с двумя пружинами, установленными последовательно) может быть переформулирована следующим образом:

$$K_k = \frac{\frac{1}{2} K_{spring,k} \times K_{bearing}}{\frac{1}{2} K_{spring,k} + K_{bearing}} \Rightarrow K_{spring,k} = 2 \frac{K_{bearing} \times K_k}{K_{bearing} - K_k}.$$

Теперь требуемые значения жесткости пружин для несущих ступеней 2, 3, 4 составляют

$$K_{spring,1} = 2 \frac{K_{bearing} \times 1,27 K_1}{K_{bearing} - 1,27 K_1} = 2 \frac{4,11 \times 1,27 \times 0,58}{4,11 - 1,27 \times 0,58} \times 10^6 = 1,796 \times 10^6 \text{ Н/мм,}$$

$$K_{spring,2} = 2 \frac{K_{bearing} \times 1,16 K_1}{K_{bearing} - 1,16 K_1} = 2 \frac{4,11 \times 1,16 \times 0,58}{4,11 - 1,16 \times 0,58} \times 10^6 = 1,608 \times 10^6 \text{ Н/мм,}$$

$$K_{spring,3} = 2 \frac{K_{bearing} \times 1,29 K_1}{K_{bearing} - 1,29 K_1} = 2 \frac{4,11 \times 1,29 \times 0,58}{4,11 - 1,29 \times 0,58} \times 10^6 = 1,830 \times 10^6 \text{ Н/мм.}$$

В данном практическом примере различия в значениях оптимальной жесткости сравнительно малы. Это обусловлено тем, что за счет конструкции площади поперечных сечений оправки и корпуса отличаются только приблизительно в 2 раза, что благоприятно. Кроме того, при использовании двух пружин, устанавливаемых последовательно в первой несущей ступени, можно ограничить величины важных отношений K_1/K_m и K_1/K_h . При выборе других конструктивных решений различия в значениях оптимальной жесткости пружин могут быть существенно большими.

Несмотря на то, что для некоторых применений, подобных описанному выше, оправка предпочтительно выполнена в виде трубчатого элемента, изобретение также имеет силу для сплошной оправки и даже для корпуса и/или оправки, имеющих некруглое поперечное сечение, такое как квадратное поперечное сечение.

Следует отметить, что несущая система, подобная описанной здесь, помимо ее использования в сборном скважинном инструменте, предпочтительно может быть использована в других областях техни-

ки, в которых желательна передача с возможностью вращения сравнительно больших осевых нагрузок от корпуса к оправке или оси или наоборот. К примерам таких областей относятся применения в автомобильной промышленности, в частности в тяжелых грузовых автомобилях, в локомотивах, в приводных валах для морских судов. Это также верно с соответствующими изменениями для описанного способа проектирования сборного скважинного инструмента.

В неопубликованной заявке на европейский патент № 02080230, которая служит в качестве приоритетной заявки для настоящей заявки и включена в данный материал путем ссылки, описаны детализированные варианты осуществления системы, предназначенной для использования в стволе скважины, в котором сборный скважинный инструмент в соответствии с настоящим изобретением предпочтительно может быть реализован.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Сборный скважинный инструмент, содержащий корпус и оправку, проходящую вдоль аксиального направления в корпус, и несущую систему, предназначенную для передачи осевой нагрузки между корпусом и оправкой, обеспечивающую возможность вращения корпуса относительно и вокруг оправки и содержащую по меньшей мере две несущие ступени, каждая из которых выполнена с возможностью передачи части осевой нагрузки, при этом каждая несущая ступень содержит средство в виде подшипников и средство для смягчения действия, предназначенное для распределения нагрузки, по существу, пропорционально по соответствующим несущим ступеням и содержащее деформируемое средство, имеющее механическую жесткость, выполненное с возможностью передачи по меньшей мере части осевой нагрузки последовательно с соответствующими средствами в виде подшипников, при этом механическая жесткость деформируемого средства по меньшей мере в одной из несущих ступеней отличается по величине от механической жесткости деформируемого средства в другой несущей ступени или по меньшей мере в одной другой из несущих ступеней.

2. Сборный скважинный инструмент по п.1, в котором механическая жесткость деформируемого средства по меньшей мере в одной из несущих ступеней меньше механической жесткости корпуса и механической жесткости оправки в секции, перекрываемой данной несущей ступенью.

3. Сборный скважинный инструмент по любому из предшествующих пунктов, в котором механическая жесткость части корпуса, проходящей между несущими ступенями, и механическая жесткость части оправки, проходящей между несущими ступенями, отличаются друг от друга менее чем в 3 раза.

4. Сборный скважинный инструмент по любому из предшествующих пунктов, в котором оправка представляет собой трубчатый конец и предпочтительно корпус представляет собой трубчатый конец.

5. Несущая система, предназначенная для использования в сборном скважинном инструменте для передачи осевой нагрузки между корпусом и оправкой, проходящей вдоль аксиального направления в корпус, обеспечивающая возможность вращения корпуса относительно и вокруг оправки и содержащая по меньшей мере две несущие ступени, каждая из которых выполнена с возможностью передачи части осевой нагрузки и содержит средство в виде подшипников и средство для смягчения действия, предназначенное для распределения нагрузки, по существу, пропорционально по соответствующим несущим ступеням и содержащее деформируемое средство, имеющее механическую жесткость, выполненное с возможностью передачи по меньшей мере части осевой нагрузки последовательно с соответствующим средством в виде подшипника, при этом механическая жесткость деформируемого средства по меньшей мере в одной из несущих ступеней отличается по величине от механической жесткости деформируемого средства в другой несущей ступени или по меньшей мере в одной другой из несущих ступеней.

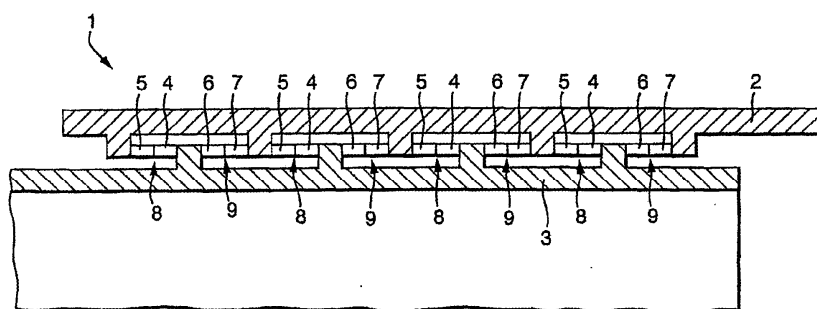
6. Способ проектирования сборного скважинного инструмента по любому из пп.1-4, включающий следующие операции:

а) выбор значения жесткости первой несущей ступени для одной несущей ступени;
б) расчет для заданных значений жесткости частей корпуса, проходящих между несущими ступенями, и заданных значений жесткости частей оправки, проходящих между несущими ступенями, значения жесткости второй несущей ступени, в результате чего осевая нагрузка распределяется, по существу, пропорционально по соответствующим несущим ступеням, при этом значение жесткости первой несущей ступени используют в качестве исходной величины.

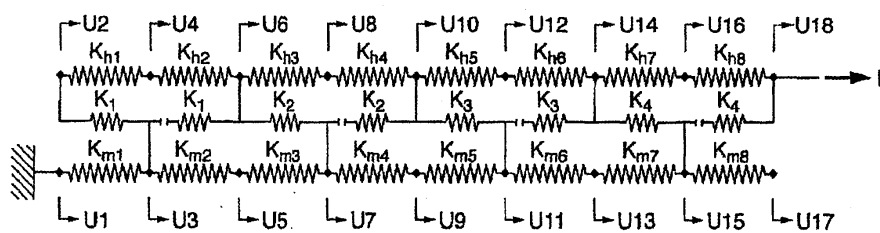
7. Способ по п.6, в котором операция б) включает следующие операции:

б₁) определение первого отношения значений жесткости, представляющего собой отношение указанной жесткости первой несущей ступени и жесткости корпуса;

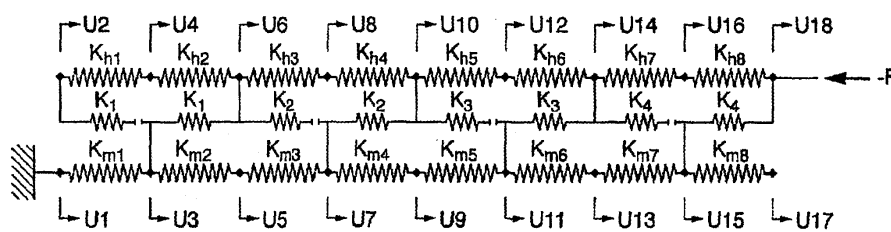
б₂) определение второго отношения значений жесткости, представляющего собой отношение указанной жесткости первой несущей ступени и жесткости оправки.



Фиг. 1



Фиг. 2a



Фиг. 2b



Евразийская патентная организация, ЕАПВ

Россия, 109012, Москва, Малый Черкасский пер., 2/6