

Программный комплекс моделирования динамических процессов работы бурильной колонны

Т. В. Кучер
Донецкий институт ГПС МЧС России, г. Донецк
kucher_t@mail.ru

Аннотация

В работе исследуется динамика продольных колебательных процессов при работе бурильной колонны. Для решения дифференциального уравнения в частных производных использован метод конечных разностей, составлена расчетная разностная схема. Разработан программный комплекс, позволяющий выполнять расчеты при заданных значениях исходных параметров, а также при изменяющемся одном или двух исходных параметрах. По результатам расчетов построены графические зависимости.

Введение

Один из самых распространенных, сложных и трудоемких типов аварии в разведочном бурении – это прихваты, представляющие собой потерю подвижности колонны труб из-за разных причин. На их долю приходится до 60-80% аварийного времени [1].

Существует несколько эффективных методов ликвидации прихватов [1, 2, 3]. В практике разведочного бурения для ликвидации прихватов колонковых наборов обычно применяются ударные механизмы. Такие механизмы действуют по принципу реализации энергии упругой деформации твердого тела [4].

Т.к. размеры ударных механизмов на порядок меньше длины колонны бурильных труб, то в этом случае возможно рассматривать их, соответственно, как пружину и упругий стержень с равномерно распределенной массой. Кроме того, в момент соударения бойка с наковальней устройства допускается рассматривать прихваченный снаряд в состоянии покоя, поскольку, за время от момента размыкания замка ударного механизма до удара, колебания в нем практически затухают.

Колонна является упругим элементом большой протяженности и при определенных условиях работы возникают различного рода колебания. Динамика продольных колебательных процессов при работе бурильной колонны описывается гиперболическим дифференциальным уравнением в частных производных. Особенностью решения данной задачи является то, что рабочий цикл ударного механизма разбивается на несколько этапов, различающихся граничными условиями [5]:

- первая фаза – сжатие или растягивание упругого элемента, предполагается наличие «затвора», что обеспечивает фиксацию бойка при накоплении потенциальной энергии;

- вторая фаза – этот этап рабочего цикла предполагает освобождение бойка путем размыкания «затвора»;

- третья фаза – после размыкания «затвора» осуществляется перемещение бойка, который, достигая наковальни, связанного с прихваченной частью снаряда, передает ей накопленный запас энергии.

Особенностью этой задачи является то, что состояние системы в конце одного рабочего цикла определяет начальные условия для следующего этапа. В этом случае задачу целесообразно решать численными методами с разработкой соответствующего программного обеспечения.

Постановка задачи

При анализе рабочего цикла ударного механизма использовалась расчетная схема, приведенная на рисунке 1. Рассматривается модель, состоящая из бурильной колонны 1, представляющей из себя упругий стержень длиной L , колонна подвешена с помощью талевого каната 6. Талевая система состоит из талевого блока 2, буровой лебедки 7, струн талевой системы 6, представляющих собой упругие нити. Масса талевой системы учитывается в виде сосредоточенной массы M_1 , связанной с верхней частью упругого стержня.

На нижнем торце бурильной колонны закреплены включаемые в состав снаряда 5 утяжеленные бурильные трубы 3 (УБТ) массой M_2 (возможно их отсутствие).

К нижней части колонны сверх веса колонны приложена растягивающая нагрузка P .

Поскольку эффективность применения ударного механизма определяется не только величиной ударной силы, но и характером возбуждаемых в колонне волновых процессов, то рабочий цикл механизма исследуется на всем его протяжении до нарушения контакта между бойком и корпусом в момент прихода

отраженной волны растяжения к нижнему торцу колонны бурильных труб.

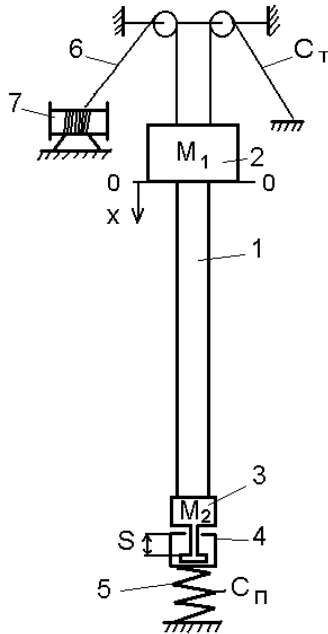


Рисунок 1 - Расчетная схема для анализа рабочего цикла ударного механизма

Цикл работы ударного механизма описывается волновым уравнением продольных колебаний упругого стержня:

$$u_{tt} - c^2 u_{xx} = 0,$$

где x – текущая координата по оси колонны, м, $x=0 \dots L$;

L – длина бурильной колонны, $L=500 \dots 1000$ м;

t – текущее значение времени, с, $t=0 \dots T$, где

$$T = \frac{2L}{c}$$

c – общее время рабочего цикла;

u – перемещение сечения колонны с координатой x , м;

c – скорость распространения волны упругой деформации в материале труб, м/с.

Рабочий цикл ударного механизма разделяется на три этапа, отличающимися друг от друга граничными и начальными условиями.

1. Фаза разгона бойка, при которой накопленная в бурильной колонне энергия упругой деформации переходит в кинетическую энергию движения. Этап начинается в момент размыкания замка ударного механизма и заканчивается в момент контакта бойка с корпусом устройства. При этом верхний конец колонны бурильных труб рассматривается как упруго закрепленный (действует сила упругости со стороны талевой системы), а нижний торец – свободный.

Обозначим $u^I(x, t)$ – перемещение сечения на первом этапе, T_1 – время окончания первой

фазы работы. Тогда условие окончания расчета по первому этапу ($t=T_1$) выглядит

$$u(L, T_1) < U_{пред}^I, \quad U_{пред}^I = U_{нач} - U_{хода},$$

где $U_{нач}$ – начальное растяжение нижнего сечения колонны под воздействием силы P ,

$U_{хода}$ – перемещение нижнего сечения колонны, зависящее от конструктивных особенностей механизма.

Начальные условия для первого этапа ($t_1=0$):

– перемещение сечения колонны с координатой x равно упругой деформации участка бурильных труб от 0 до x :

$$u^I(x, 0) = \frac{Px}{EF}$$

– сечение колонны с координатой x неподвижно:

$$u_t^I(x, 0) = 0.$$

Граничные условия для первого этапа ($t_1 \in [0; T_1]$) – упругая сила в верхнем сечении ($x=0$) и в нижнем торце ($x=l$) бурильной колонны:

$$EFu_x^I(0, t_1) = zu^I(0, t_1) + M_1 u_{tt}^I(0, t_1) + P$$

$$EFu_x^I(l, t_1) = -M_2 u_{tt}^I(l, t_1),$$

где EF – жесткость колонны; z – коэффициент жесткости талевой системы.

2. Фаза удара, при которой боек взаимодействует с корпусом ударного механизма (нижний конец бурильной колонны становится упруго закрепленным), при этом на верхний конец бурильных труб ещё продолжает действовать упругая сила со стороны талевой системы. Обозначим $u^II(x, t)$ – перемещение сечения на втором этапе. Этап заканчивается в момент времени T_2 , когда $u^II(0, T_2) = -u_c$, где u_c – статическое положение равновесия талевой системы под действием веса бурильной колонны. При этом в конце фазы верхний торец колонны разгружается от действия силы упругости талевой системы и далее рассматривается как свободный.

Начальными условиями второй фазы будут значения, полученные при расчете первого цикла работы – перемещение и скорость сечения колонны с координатой x $u^I(x, T_1)$ и $u_t^I(x, T_1)$:

$$u^II(x, 0) = u^I(x, T_1), \quad u_t^II(x, 0) = u_t^I(x, T_1).$$

Граничные условия для второго этапа (для $t_2 \in [0; T_2]$) – упругая сила в верхнем сечении ($x=0$) и в нижнем торце ($x=l$) бурильной колонны:

$$EFu_x^II(0, t_2) = zu^II(0, t_2) + M_1 u_{tt}^II(0, t_2) + P$$

$$EFu_x^II(l, t_2) = -M_2 u_{tt}^II(l, t_2) - G[u^II(l, t_2) - u^I(l, T_1)].$$

3. Фаза удара, при которой контакт бойка с корпусом продолжается, т.е. нижний конец бурильной колонны остаётся упруго закреплённым, а верхний конец бурильных труб свободен. Этап заканчивается в момент прихода отраженной волны растяжения к контактному сечению бойка с наковальной ударного механизма при $T_3 = 2 \cdot l / c - T_1 - T_2$.

Следует отметить, что при значениях растягивающей силы, не превышающих вес колонны, вторая фаза длится до окончания рабочего цикла.

При рассмотрении третьего этапа учитывается, что его начальными условиями ($t_2=0$) являются значения $u''(x, T_2)$ и $u_t''(x, T_2)$ – перемещение и скорость сечения колонны с координатой x

$$u'''(x, 0) = u''(x, T_2), \quad u_t'''(x, 0) = u_t''(x, T_2).$$

Граничные условия для третьего этапа имеют вид (для $t_3 \in [0; T_3]$):

- упругая сила в верхнем сечении ($x=0$) бурильной колонны равна 0:

$$u_x'''(0, t_3) = 0;$$

- упругая сила в нижнем торце бурильной колонны ($x=l$):

$$EF u_x''(l, t_2) = -M_2 u_t''(l, t_2) - G[u''(l, t_2) - u'(l, T_1)].$$

Зная перемещение нижнего сечения бурильной колонны в течение второй и третьей фаз работы ударного механизма, можно определить величину усилия P_y , действующего на прихваченный буровой снаряд:

$$P_y = G[u''-'''(l, t_{2-3}) - u_0]$$

Для решения задачи моделирования динамических процессов в бурильной колонне использован универсальный метод конечных разностей (метод сеток) [5]. Частные производные в уравнении, начальных и граничных условиях заменены разделёнными разностями:

$$U_{tt} = \frac{U_i^{j-1} - 2 \cdot U_i^j + U_i^{j+1}}{\Delta t^2}, \quad U_{xx} = \frac{U_{i-1}^j - 2 \cdot U_i^j + U_{i+1}^j}{h^2},$$

$$U_t = \frac{U_i^j - U_i^{j-1}}{\Delta t}, \quad U_x = \frac{U_{i-1}^j - U_i^j}{h},$$

где h и Δt – шаг сетки по x и t соответственно,

U_i^j – текущий узел сетки, соответствующий значению функции $U(x, t)$.

Шаг по времени выбирается из условия устойчивости явной разностной схемы $\Delta t \leq h / c$ [6].

После замены расчетная формула во внутренних узлах сетки на всех трех этапах имеет вид

$$U_i^{j+1} = 2 \cdot U_i^j - U_i^{j-1} + \frac{c^2 \cdot \Delta t^2}{h^2} \cdot (U_{i-1}^j + U_{i+1}^j - 2 \cdot U_i^j).$$

Аналогичным образом были получены формулы для расчета в пограничных слоях для трех этапов [6].

Результаты работы

В качестве средства разработки программного комплекса решения поставленной задачи была выбрана свободная кроссплатформенная среда визуальной разработки профессионального уровня Lazarus [7, 8, 9].

Стартовое окно разработанной программы показано на рисунке 2, предлагает несколько режимов дальнейшей работы:

- ознакомление с методикой расчета;

- расчет по длине колоны и по времени – в этом случае при заданных характеристиках талевой системы, бурильной колонны и ударного механизма результатами расчета являются величины усилия P_y , действующего на прихваченный буровой снаряд, скорость снаряда, продольные перемещения сечений по длине колонны в зависимости от времени; пример расчета показан на рисунке 3;

- расчет комплекса характеристик физического процесса с одним или двумя изменяющимися параметрами – зависимость перемещений верхнего и нижнего сечений на концах колонны, зависимости скорости снаряда и усилия, действующего на снаряд, от времени.

На рисунках 4 и 5 приведены результаты расчета параметров при одном изменяющемся параметре – коэффициенте для задания значения хода бойка, который влияет на начальное растяжение нижнего сечения колонны под воздействием силы P , и соответственно, на время окончания первой фазы работы, или массы снаряда бурильной колонны. При необходимости можно просмотреть числовые данные, по которым были построены графики. На рисунке 6 приведен результат расчета при двух изменяющихся параметрах, предлагается выбрать два параметра из трех, третьим параметром добавлена длина колонны.

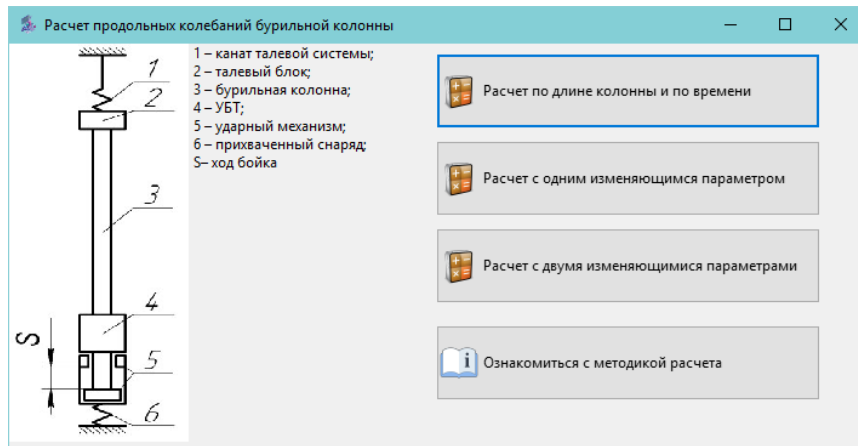


Рисунок 2 – Стартовое окно программы

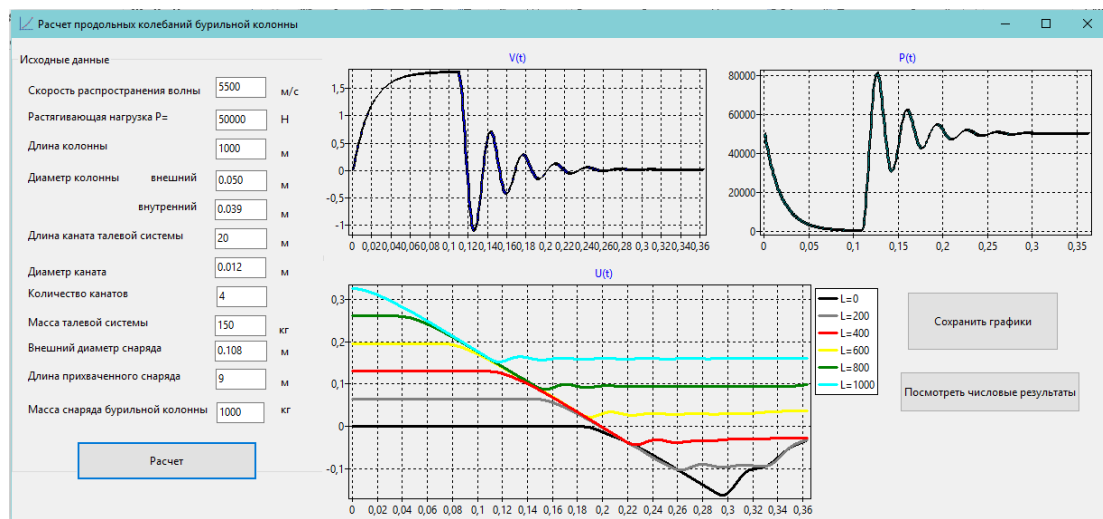


Рисунок 3 – Пример расчета при заданных параметрах

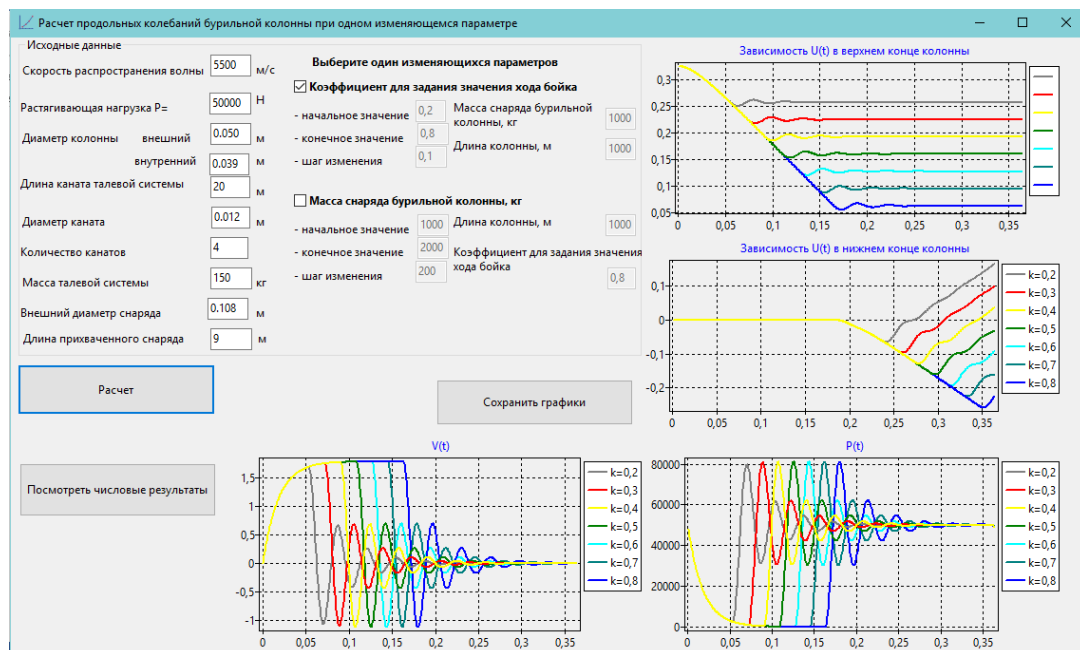


Рисунок 4 – Пример расчета при изменяющемся значении коэффициента хода бойка

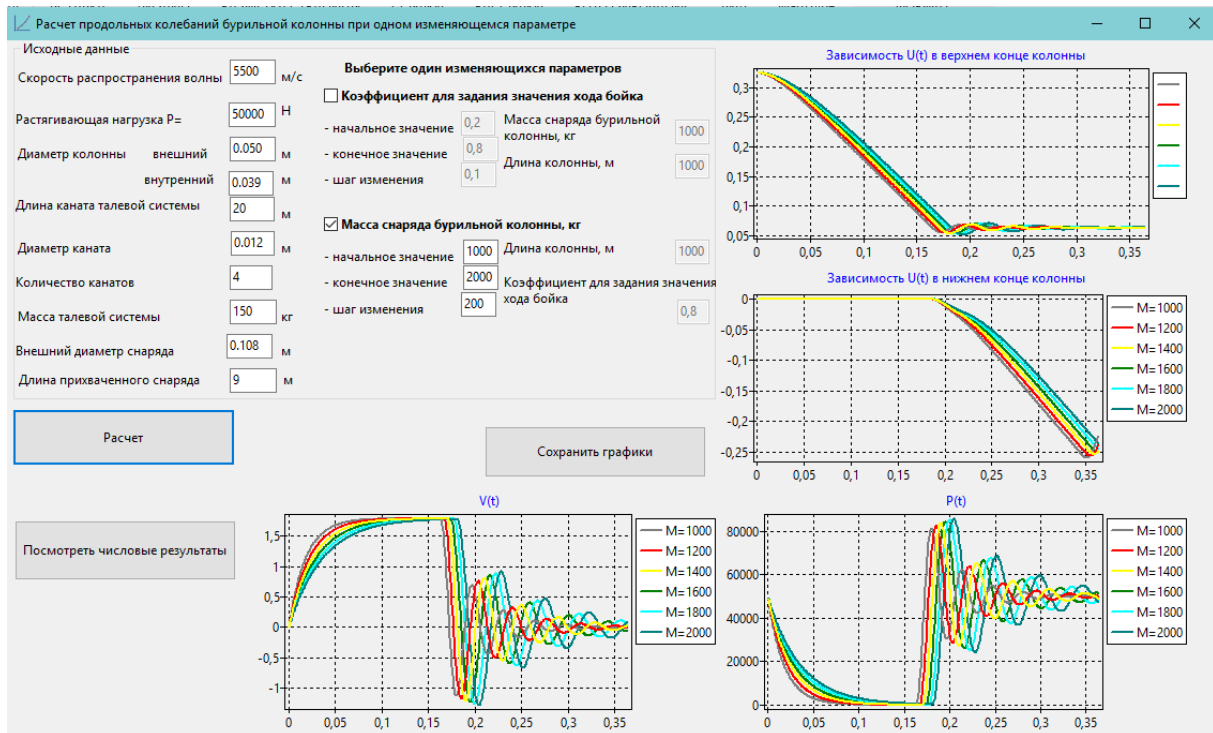


Рисунок 5 - Пример расчета при изменяющемся значении массы снаряда буровой колонны

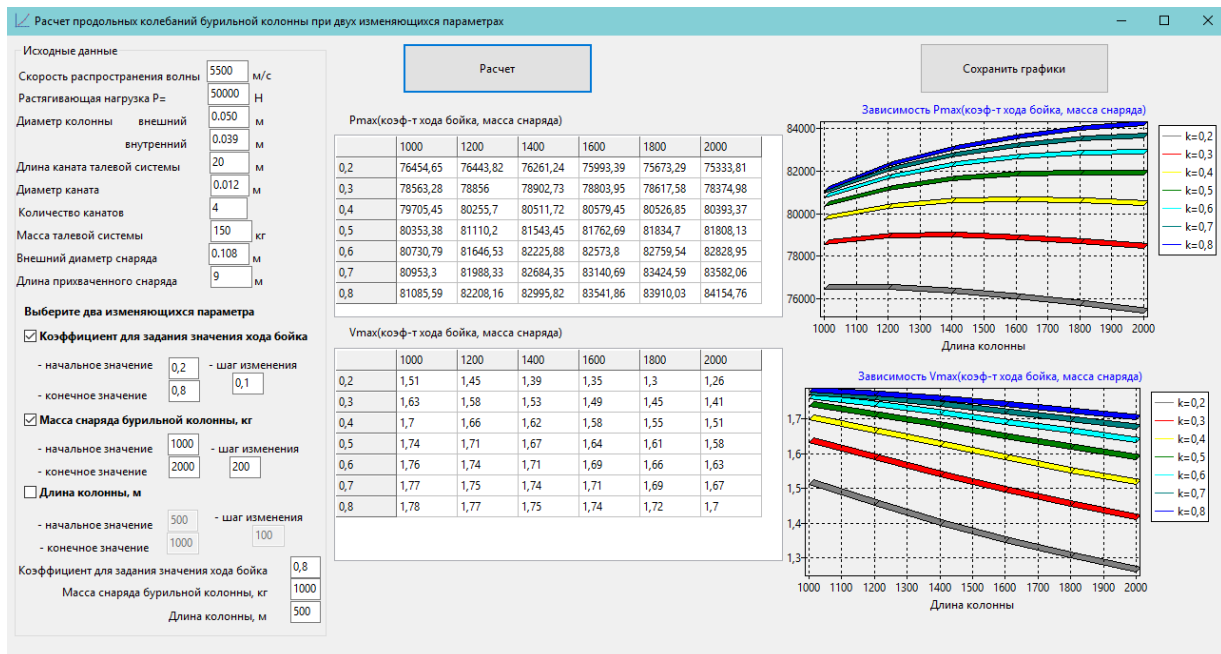


Рисунок 6 - Пример расчета при двух изменяющихся параметрах

Выводы

В ходе работы была исследована динамика продольных колебательных процессов при работе буровой колонны.

Для решения дифференциального уравнения в частных производных была составлена разностная схема. Разработанный

программный комплекс может работать не только с операционными системами семейства Windows, но и с Unix-подобными системами.

По сравнению с результатами, полученными ранее [6], в работе добавлены результаты расчета с изменяющимися параметрами, что позволяет увидеть и проанализировать динамику колебательного

процесса не только по времени, но и при разных значениях массы снаряда бурильной колонны, длины колонны и коэффициента для задания значения хода бойка.

Литература

1. Коломоец, А. В. Предупреждение и ликвидация прихватов в разведочном бурении / А. В. Коломоец. – М.: Недра, 1985. – 220 с.
2. Юртаев, В. Г. Динамика буровых установок / В. Г. Юртаев. – М.: Недра, 1987. – 160 с.
3. Пустовойтенко, И. П. Предупреждение и методы ликвидации аварий и осложнений в бурении: Учебное пособие для профтехобразования / И. П. Пустовойтенко. – М.: Недра, 1987. – 237 с.
4. Головань, Е. В. Применение ударных механизмов для предупреждения и ликвидации прихватов бурильной колонны [Электронный ресурс] / Е. В. Головань, К. Д. Угланов, Р. В. Коршакова, А. А. Пестова // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet», 2020. - №11/2020. – Режим доступа: [https://stud.net.ru/primenenie-udarnykh-mexanizmov-dlya-preduprezhdeniya-i-](https://stud.net.ru/primenenie-udarnykh-mexanizmov-dlya-preduprezhdeniya-i-likvidacii-priхватov-burilnoj-kolonny)

[likvidacii-priхватov-burilnoj-kolonny](https://stud.net.ru/primenenie-udarnykh-mexanizmov-dlya-preduprezhdeniya-i-likvidacii-priхватov-burilnoj-kolonny) (дата обращения: 12.09.2023).

5. Тихонов, А. Н. Уравнения математической физики (6-е изд.) // А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – М.: Наука, 1999. – 799 с.
6. Каракозов, А. А. Разработка программного обеспечения математической модели работы бурильной колонны при ликвидации прихватов бурового снаряда// А. А. Каракозов, Е. Р. Алексеев, Т. В. Кучер, С. Н. Парфенюк // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна». - № 2(19)'2013. - С. 43–51.
7. Lazarus documentation [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://wiki.freepascal.org/Lazarus_Documentation (дата обращения: 12.09.2023).
8. Алексеев, Е. Р. Free Pascal и Lazarus: Учебник по программированию / Е. Р. Алексеев, О. В. Чеснокова, Т. В. Кучер — М.: ALT Linux ; Издательский дом ДМК-пресс, 2010. — 440 с. (Библиотека ALT Linux).
9. Lazarus 2.2.0 - Бесплатная среда по разработке программного обеспечения [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://lazarus-rus.ru/Documentation> (дата обращения: 12.09.2023).

Кучер Т. В. Программный комплекс моделирования динамических процессов работы бурильной колонны. В работе исследуется динамика продольных колебательных процессов при работе бурильной колонны. Для решения дифференциального уравнения в частных производных использован метод конечных разностей, составлена расчетная разностная схема. Разработан программный комплекс, позволяющий выполнять расчеты при заданных значениях исходных параметров, а также при изменяющемся одном или двух исходных параметрах. По результатам расчетов построены графические зависимости.

Ключевые слова: бурильная колонна, ударный механизм, волновое уравнение, программный комплекс, Lazarus

Kucher T. V. A software package for simulation of dynamical processes of the drill string working. The article examines the dynamics of longitudinal oscillatory processes during the operation of a drill string. To solve the partial differential equation, the finite difference method was used, and a calculated difference scheme was compiled. A software package has been developed that allows calculations to be performed at specified values of the initial parameters, as well as with one or two initial parameters changing. Based on the results of calculations, graphical dependencies are constructed.

Keywords: drill string, impact mechanism, wave equation, software package, Lazarus

Статья поступила в редакцию 08.12.2023
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.