

УДК 519.63:85, 622.24, 004.4

## **КРОССПЛАТФОРМЕННАЯ ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ПРИХВАТОВ БУРОВОГО СНАРЯДА УДАРНЫМИ МЕХАНИЗМАМИ**

Е. Р. Алексеев, А. А. Каракозов, Т. В. Кучер

*Донецкий национальный технический университет,  
ул. Артема, 58, 83001, Донецк, Украина  
ealekseev@gmail.com, karakozov@donntu.edu.ua, kucher\_t@mail.ru*

Описана математическая модель динамических процессов в бурильной колонне. Рассмотрена конечно-разностная схема решения гиперболического уравнения на трёх этапах рабочего цикла механизма. Проанализированы программные средства решения задачи. Обоснован выбор компилятора, используемого в программной модели. Проведён инженерный анализ полученного в результате компьютерного моделирования решения.

*Ключевые слова:* бурильная колонна, ударный механизм, гиперболическое уравнение, компилятор, компьютерная модель.

В работе рассматривается математическая модель, описывающая динамические процессы в бурильной колонне в течение рабочего цикла ударного механизма для ликвидации прихватов бурового снаряда, реализующего энергию упругой деформации бурильных труб (ясы). Математическая модель является гиперболическим дифференциальным уравнением в частных производных, при этом, на каждом из этапов рабочего цикла меняются граничные и начальные условия. Решение дифференциального уравнения на предыдущем этапе позволяет сформировать начальные условия последующего. Кроме того, длительность каждого из этапов определяется в процессе решения уравнения с учётом дополнительно налагаемых ограничений, обусловленных параметрами системы «ударный механизм – бурильная колонна – талевая система». Подобные особенности модели не позволяют использовать известные приложения решения дифференциальных уравнений в частных производных. Поэтому был разработан комплекс программных средств для решения данной задачи.

### **Постановка задачи**

Ударные механизмы (гидравлические и механические ясы) широко используются в практике бурения нефтяных и газовых скважин, и их работа исследовалась рядом авторов [1–5]. В практике бурения геологоразведочных скважин ударные механизмы применяются для ликвидации прихватов колонковых наборов, длина которых на один – два порядка меньше длины колонны бурильных труб. В этом случае справедливо рассматривать их, соответственно, как пружину и упругий стержень с равномерно распределенной массой. В момент соударения бойка с наковальной устройства можно рассматривать прихваченный снаряд в состоянии покоя, поскольку, за время от момента размыкания

«замка» ударного механизма до удара, колебания в нем практически затухают.

При анализе рабочего цикла ударного механизма использовалась расчетная схема, представленная на рис. 1. Талевая система представлена в виде упругой нити. Масса талевой системы учитывается в виде сосредоточенной массы  $M_1$ , связанной с верхней частью упругого стержня, а включаемые в состав снаряда утяжеленные бурильные трубы (УБТ) – массой  $M_2$ , закрепленной на нижнем торце бурильной колонны. 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.

### Математическая модель работы бурильной колонны

Цикл работы ударного механизма описывается волновым уравнением продольных колебаний упругого стержня

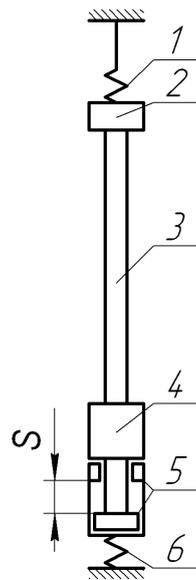


Рис. 1. Расчетная схема для анализа рабочего цикла ударного механизма: 1 – талевая система (жёсткость  $z$ ); 2 – талевый блок (масса  $M_1$ ); 3 – бурильная колонна; 4 – утяжеленные бурильные трубы (масса  $M_2$ ); 5 – ударный механизм; 6 – прихваченный снаряд (жёсткость  $G$ );  $S$  – ход бойка.

$$u_{tt} = c^2 u_{xx} \quad (1)$$

где  $x = 0 \dots L$ ;  $t = 0 \dots T$ ,  $T = \frac{2L}{c}$  – общее время рабочего цикла<sup>1</sup>.

Рабочий цикл разделяется на три этапа, отличающиеся друг от друга граничными и начальными условиями. Перемещение сечения колонны с координатой  $x$  в текущий момент времени  $t$  обозначим следующим образом:  $u^I(x, t)$  – перемещение на первом этапе,  $u^{II}(x, t)$ ,  $u^{III}(x, t)$  – перемещение на втором и третьем этапах соответственно.

Рассмотрим фазы работы ударного механизма.

1. Первый этап – фаза разгона бойка, при которой накопленная в бурильной колонне энергия упругой деформации переходит в кинетическую энергию её движения. Этап начинается в момент размыкания «замка» ударного механизма и заканчивается в момент  $T_1$  контакта бойка с корпусом устройства. Условие окончания первого этапа ( $t=T_1$ )  $u(L, T_1) < U_{пред}^I$ ,  $U_{пред}^I = U_{нач} - U_{хода}$ , где  $U_{нач}$  – начальное растяжение нижнего сечения колонны под воздействием силы  $P$ ,  $U_{хода}$  – перемещение нижнего сечения колонны, определяющееся конструкцией механизма. Верхний конец колонны бурильных труб рассматривается как упруго закреплённый (действует сила упругости со стороны талевого системы), а нижний конец – свободный.

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

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

$$u^I(x, 0) = Px/(EF) \quad (2)$$

– сечения колонны с координатой  $x$  неподвижны:

$$u_t^I(x, 0) = 0 \quad (3)$$

Граничные условия для первого этапа ( $t_1 \in [0; T_1]$ ):

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

$$EFu_x^I(0, t_1) = zu^I(0, t_1) + M_1 u_t^I(0, t_1) + P \quad (4)$$

– нижний торец бурильной колонны ( $x=L$ ):

$$EFu_x^I(L, t_1) = -M_2 u_t^I(L, t_1) \quad (5)$$

2. Второй этап – фаза удара, при которой боек взаимодействует с корпусом ударного механизма (нижний конец бурильной колонны становится упруго закреплённым), при этом на верхний конец бурильных труб ещё продолжает действовать упругая сила со

<sup>1</sup> При составлении расчетной модели приняты следующие обозначения:  $x$  – текущая координата по оси колонны, м;  $t$  – текущее значение времени, с;  $u$  – перемещение сечения колонны с координатой  $x$ , м;  $c$  – скорость распространения волны упругой деформации в материале труб, м/с;  $P$  – растягивающая нагрузка, приложенная сверх веса колонны, Н;  $Z$  – коэффициент жесткости талевого системы;  $G$  – жесткость прихваченного снаряда;  $M_1$  – сосредоточенная масса талевого системы;  $M_2$  – сосредоточенная масса снаряда, закреплённого на нижнем конце бурильной колонны;  $L$  – длина бурильной колонны,  $L=500 \dots 1000$  м.

стороны талевой системы. Этап заканчивается в момент времени  $T_2$ , когда  $u''(0, T_2) = -u_c$ , 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.

Рассматривая вторую фазу, следует помнить, что её начальными условиями будут значения  $u'(x, T_1)$  и  $u_t'(x, T_1)$  или перемещение сечения колонны с координатой  $x$

$$u''(x, 0) = u'(x, T_1) \quad (6)$$

– скорость сечения колонны с координатой  $x$ :

$$u_t''(x, 0) = u_t'(x, T_1) \quad (7)$$

Граничные условия для второго этапа имеют вид (для  $t_2 \in [0; T_2]$ ):

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

$$EFu_x''(0, t_2) = zu''(0, t_2) + M_1u''(0, t_2) + P \quad (8)$$

– нижний торец бурильной колонны ( $x=L$ ):

$$EFu_x''(L, t_2) = -M_2u''(L, t_2) - G[u''(L, t_2) - u_0] \quad (9)$$

где  $u_0 = u'(L, T_1)$ .

3. Третий этап – продолжение фазы 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  $T_3 = 2L/c - T_1 - T_2$ .

Следует отметить, что при определённых сочетаниях значений растягивающей силы и хода бойка ударного механизма вторая фаза может длиться до окончания рабочего цикла, т.е. в этом случае третьего этапа не будет.

На третьем этапе начальными условиями являются значения  $u''(x, T_2)$  и  $u_t''(x, T_2)$ .

Начальные условия для третьего этапа ( $t_2=0$ ):

– перемещение сечения колонны с координатой  $x$

$$u'''(x, 0) = u''(x, T_2) \quad (10)$$

– скорость сечения колонны с координатой  $x$ :

$$u_t'''(x, 0) = u_t''(x, T_2) \quad (11)$$

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:

$$u_x'''(0, t_3) = 0 \quad (12)$$

– нижний торец бурильной колонны ( $x=L$ ):

$$EFu_x^{III}(L, t_3) = -M_2 u_u^{III}(L, t_3) - G[u^{III}(L, t_3) - u_0] \quad (13)$$

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:

$$P_y^{II} = G[u^{II}(L, t_2) - u_0], \quad P_y^{III} = G[u^{III}(L, t_3) - u_0] \quad (14)$$

Для решения задачи моделирования динамических процессов в бурильной колонне использован метод сеток [6]. Частные производные в уравнении, начальных и граничных условиях заменены разделёнными разностями [6].

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

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

где  $h$  и  $\Delta t$  – шаг сетки по  $x$  и  $t$  соответственно,  $U_i^j$  – текущий узел сетки, соответствующий значению функции  $U(x_i, t_j)$ . Шаг по времени выбирается из условия Куранта устойчивости разностной схемы  $\Delta t \leq \frac{h}{c}$  [6].

В разностной схеме расчетная формула во внутренних узлах сетки на всех трех этапах принимает вид

$$U_i^{j+1} = 2 \cdot U_i^j - U_i^{j-1} + \frac{c^2 \cdot \Delta t^2}{h^2} \cdot (U_{i-1}^j + U_{i+1}^j - 2 \cdot U_i^j). \quad (15)$$

На первом этапе формулы для расчета в пограничных слоях имеют вид ( $N$  – количество узлов в сетке по координате  $x$ ,  $L1$  – количество узлов по времени в сетке на первой фазе):

$$U_i^0 = \frac{Px_i}{(EF)}, \quad i=0...N \quad (16)$$

$$U_i^1 = U_i^0$$

$$U_0^j = \frac{EF\Delta t^2}{M_1 \cdot h} \cdot \left( U_1^{j-1} - U_0^{j-1} \cdot \left( 1 + \frac{z \cdot h}{EF} - 2 \frac{M_1 \cdot h}{EF\Delta t^2} \right) - \frac{M_1 \cdot h}{EF\Delta t^2} \cdot U_0^{j-2} - \frac{Ph}{(EF)} \right), \quad (17)^2$$

$j=2...L1$

---

<sup>2</sup> Если  $M_1 = 0$ , то  $U_0^j = \frac{1}{\left(1 + \frac{zh}{EF}\right)} \cdot \left( U_1^j - \frac{Ph}{(EF)} \right)$ .

$$U_{N-1}^j = \frac{EF\Delta t^2}{M_2 \cdot h} \cdot \left( U_{N-2}^{j-1} - U_{N-1}^{j-1} \cdot \left( 1 - \frac{2M_2 \cdot h}{EF\Delta t^2} \right) - \frac{M_2 \cdot h}{EF\Delta t^2} U_{N-1}^{j-2} \right), \quad (18)^3$$

$$j=2...L1$$

$$U_{N-1}^j = U_{N-2}^j, \quad j=2...L1 \quad (19)$$

Время окончания первого этапа определяется из соотношения  $u_N^{I L1} < U_{пред}^I$ .

На втором этапе формулы для расчета в пограничных слоях имеют вид ( $L2$  – количество узлов по времени на второй фазе).

$$U_i^0 = U_i^{(I)L1}, \quad i=0...N-1 \quad (20)$$

$$U_i^1 = U_i^0 + U_i^{(I)L1} - U_i^{(I)L1-1}, \quad i=0...N-1 \quad (21)$$

$$U_0^j = \frac{EF\Delta t^2}{M_1 \cdot h} \cdot \left( U_1^{j-1} - U_0^{j-1} \cdot \left( 1 + \frac{z \cdot h}{EF} - 2 \frac{M_1 \cdot h}{EF\Delta t^2} \right) - \frac{M_1 \cdot h}{EF\Delta t^2} \cdot U_0^{j-2} - \frac{Ph}{(EF)} \right), \quad (22)^4$$

$$j = L1+1...L2$$

$$U_{N-1}^j = \frac{EF\Delta t^2}{M_2 \cdot h} \cdot \left( U_{N-2}^{j-1} - U_{N-1}^{j-1} \cdot \left( 1 - \frac{2M_2 \cdot h}{EF\Delta t^2} + \frac{G \cdot h}{EF} \right) - \frac{M_2 \cdot h}{EF\Delta t^2} U_{N-1}^{j-2} + \frac{G \cdot h}{EF} \cdot U_{N-1}^{(I)M1} \right), \quad j = L1+1...L2 \quad (23)^5$$

Время окончания второго этапа будет находиться из соотношения  $u_0^{II M2} = -u_c$ .

Можно записать следующие расчетные формулы для третьего этапа в пограничных слоях ( $M$  – количество узлов по времени для трех этапов).

$$U_i^0 = U_i^{(II)T2}, \quad i=0...N-1, \quad (24)$$

$$U_i^1 = U_i^0 + U_i^{(II)L2} - U_i^{(II)L2-1}, \quad i=0...N-1 \quad (25)$$

$$U_1^j = U_0^j, \quad j=L2+1...M \quad (26)$$

<sup>3</sup> Если  $M_2=0$   $U_{N-1}^j = U_{N-2}^j$

<sup>4</sup> Если  $M_1 = 0$ , то  $U_0^j = \frac{1}{\left(1 + \frac{zh}{EF}\right)} \cdot \left( U_1^j - \frac{Ph}{(EF)} \right)$ .

<sup>5</sup> Если  $M_1 = 0$ , то  $U_0^j = \frac{1}{\left(1 + \frac{zh}{EF}\right)} \cdot \left( U_1^j - \frac{Ph}{(EF)} \right)$ .

$$U_{N-1}^j = \frac{EF\Delta t^2}{M_2 \cdot h} \cdot \left( U_{N-2}^{j-1} - U_{N-1}^{j-1} \cdot \left( 1 - \frac{2M_2 \cdot h}{EF\Delta t^2} + \frac{G \cdot h}{EF} \right) - \frac{M_2 \cdot h}{EF\Delta t^2} U_{N-1}^{j-2} + \frac{G \cdot h}{EF} \cdot U_{N-1}^{(II)M1} \right), \quad j=L2+1...M \quad (27)^6$$

Таким образом, задача моделирования бурильной колонны свелась к разностным уравнения (15) – (27) с условиями нахождения времени окончания первого и второго этапов  $u_{N-1}^{IM1} < U_{пред}^I$  и  $u_0^{IM2} = -u_c$ .

Для хранения всей матрицы  $U(N,M)$  ( $N=8000$ ,  $M=128000$ , при  $h = 0,125$ ,  $t \approx 0,0000029$ ) понадобилось бы около 7 Гб оперативной памяти<sup>7</sup>. Поэтому авторами был разработан алгоритм послойного хранения матрицы, реализующий формулы (15) – (19), (15), (20) – (23) и (15), (24) – (27) с автоматическим выбором шага по  $x$ , шаг по времени выбирается из условия устойчивости явной разностной схемы.

#### Выбор программного обеспечения для построения модели

Так как была поставлена задача создания кроссплатформенной программы на языке C++ для моделирования динамических процессов работы бурильной колонны, то возникла проблема выбора компилятора. Авторами были рассмотрены и проанализированы следующие компиляторы:

- свободный компилятор g++ (версии 4.6) из набора компиляторов GNU Compiler Collection (GCC) [7];
- компилятор языка C++ из пакета MS Visual Studio 2010 (сотрудники и студенты Донецкого национального технического университета могут пользоваться этим компилятором по лицензии MSDN AA[8]);
- компилятор языка C++ (icc) из пакета Intel Parallel Studio XE 2013 (программы из пакета Intel Parallel Studio XE 2013 доступны для некоммерческого использования под управлением ОС Linux) [9].

Несмотря на то, что компилятор Intel является очень дорогими при использовании в операционной системе Windows, а MS Visual Studio работает только под управлением ОС семейства Windows, авторами был проведен сравнительный анализ быстродействия разработанного приложения при использовании свободного компилятора gcc и проприетарных компиляторов из пакетов Intel Parallel Studio XE 2013 и MS Visual Studio 2010. Тестирование проводилось на следующих персональных компьютерах:

- настольный ПК – ОЗУ4 Гб, процессор Intel Core I5–2500, 3.3 ГГц (операционные системы: 64-х разрядная Windows 8 Профессиональная, 32-х разрядная Linux Mint 13 с рае ядром);

<sup>6</sup> Если  $M_2=0$ , то  $U_{N-1}^j = \frac{1}{\left(1 + \frac{G \cdot h}{EF}\right)} \cdot \left( U_{N-2}^j + \frac{G \cdot h}{EF} \cdot U_{N-1}^{M1} \right)$ .

<sup>7</sup> Рассматривалась бурильная колона длиной до 1000 м, сосредоточенная масса талевой системы  $M_1 = 150$  кг, сосредоточенная масса УБТ  $M_2 = 0...1000$  кг, скорость распространения волны упругой деформации в материале труб  $c = 5050$  м/с.

- ноутбук – ОЗУ 2 Гб, процессор AMD Athlon II X2 M320, 2.1 ГГц (32-х разрядные операционные системы: ОС Windows 7 Профессиональная, Linux Mint 13).

При решении задачи на компьютере с процессором Athlon II X2 M320 время счёта (под управлением ОС Windows 7) при использовании компилятора gcc составило 23.96с, компилятора из пакета MS Visual Studio 2010 – 21.16с. При использовании процессора Core i5–2500 время счёта программы, полученной с использованием компилятора gcc составляет 8.9с, при использовании компилятора из пакета MS Visual Studio 2010 – 9.0 с<sup>8</sup>.

По результатам исследования можно сделать вывод, что проприетарные компиляторы на современном персональном компьютере (процессор i5) даже под управлением операционных систем семейства Windows по быстродействию не превосходят свободный компилятор gcc. При работе приложения под управлением операционных систем семейства Linux время счёта несколько уменьшается. При компиляции приложения с помощью компилятора gcc на компьютере, оснащённым процессором Intel Core I5–2500 (ОЗУ – 4 Гб) время счёта составило 8.23с, на компьютере с процессором Athlon II X2 M320 (ОЗУ 2 Гб) время счёта уменьшилось до 21.86с.

Под управлением ОС Linux на этой же задаче были протестированы компиляторы icc из пакета Intel Parallel Studio XE 2013. Время счёта на ПК с процессором Core i5–2500 под управлением 32-х разрядной операционной системы Linux Mint 13 с рае ядром версии 3.2 составило 8.96 с, на ПК с процессором Athlon II X2 M320 – 27.21с.

В завершении было проведено сравнение времени работы программ, созданных с использованием компиляторов icc и gcc и средств оптимизации кода (ключ -O2) в ОС Linux Mint 13. При использовании процессора i5-2500 и компилятора icc время решения задачи составило 1.72 с, при использовании компилятора gcc – 2.62 с.

Понятно, что расхождение между временем работы программ, которые скомпилированы с использованием проприетарных и свободного компиляторов в ОС Linux и Windows незначительно<sup>9</sup>. Однако, наиболее быстрыми получились программы с использованием компилятора gcc (без ключей оптимизации кода) и icc (при использовании ключей -O2 и -O3), которые работают под управлением ОС Linux. Однако, с учётом того, что использование свободного компилятора gcc не накладывает никаких правовых ограничений на использование получаемых приложений, авторами было принято решение использовать именно компилятор gcc для разработки кроссплатформенной программы решения задачи (1)-(14).

Специалистам в области бурения скважин легче анализировать результаты моделирования, если наряду с числовыми данными будут присутствовать и графики зависимостей. При выборе ПО для графического отображения результатов авторы остановили свой выбор на кроссплатформенном свободном пакете GNU Octave [10, 11], так как его преимуществами являются:

<sup>8</sup> У авторов не было возможности использовать компиляторы Intel (в виду их дороговизны) под управлением ОС Windows.

<sup>9</sup> На тестовой задаче при использовании процессора AMD Athlon II X2 M320 программы, созданные с использованием компилятора MS Visual Studio работали на 12–14% быстрее, чем при использовании компилятора gcc, а при использовании более современного процессора Intel Core I5–2500 уже программы, созданные с использованием gcc, оказались быстрее на 2–5%.

1. Кроссплатформенность.
2. Лицензия распространения – GNU GPL.
3. Совместимость программного кода приложений GNU с мощным проприетарным приложением MATLAB.
4. Мощный модуль построения графиков и поверхностей.
5. Отсутствие проблем при работе с огромными массивами (100 000 элементов) и матрицами (более 1 000 000) элементов.

Именно возможность работать с огромными<sup>10</sup> массивами данных позволяет использовать GNU Octave для построения графиков при решении задачи (1) – (14). Большое количество вычислений в рассматриваемой задаче не позволяют использовать интерпретаторы (Scilab, Octave, и даже проприетарный пакет Matlab) в качестве основного средства вычислений. На ПК с процессором Core i5–2500 Matlab считал в 40 раз медленнее, чем программа, созданная с использованием gcc. Время счёта задачи (1) – (14) в GNU Octave составило 6 часов.

Разработанная программная модель динамических процессов многоэтапной работы буровой колонны представляет скрипт, в который включены команды компилятора gcc (с ключами оптимизации) для создания исполняемого приложения решения задачи (1)–(14), его запуск, вызов интерпретатора GNU Octave, передачу в него файла с разработанным приложением для построения графиков, запись построенных графиков в файлы с расширением eps.

### Результаты моделирования и анализ результатов

Разработанная компьютерная модель, описывающая динамические процессы в буровой колонне в течение рабочего цикла ударного механизма для ликвидации прихватов бурового снаряда, была использована при решении реальной инженерной задачи с исходными данными, приведенными выше. Некоторые результаты расчёта, представленные в виде графических зависимостей, приведены на рис. 2–4.

Анализ полученных при программном моделировании результатов показывает, что качественная картина протекания рабочего цикла соответствует математической модели, а также известным данным: как теоретическим, полученным ранее другими исследователями, так и промышленным, полученным при эксплуатации ударных механизмов. Однако некоторые количественные показатели существенно отличаются от известных теоретических результатов. Так, например, по сравнению с данными, полученными в работах [1–5], усилие, действующее на прихваченный колонковый набор, оказывается существенно ниже, особенно по сравнению с моделями, приведенными в [2] и [5], в которых вся буровая колонна рассматривалась как сосредоточенная масса, связанная с пружиной. В то же время, данные, полученные по разработанной компьютерной модели, более согласуются с известными результатами эксплуатации ударных механизмов в геолого-разведочных скважинах, в частности, с результатами использования ударных механизмов РШ-73 [13].

<sup>10</sup> Математический пакет Scilab [12] не всегда справлялся с огромными массивами данных. Электронная таблица LibreOffice Calc очень медленно осуществляет чтение и обработку больших массивов данных.

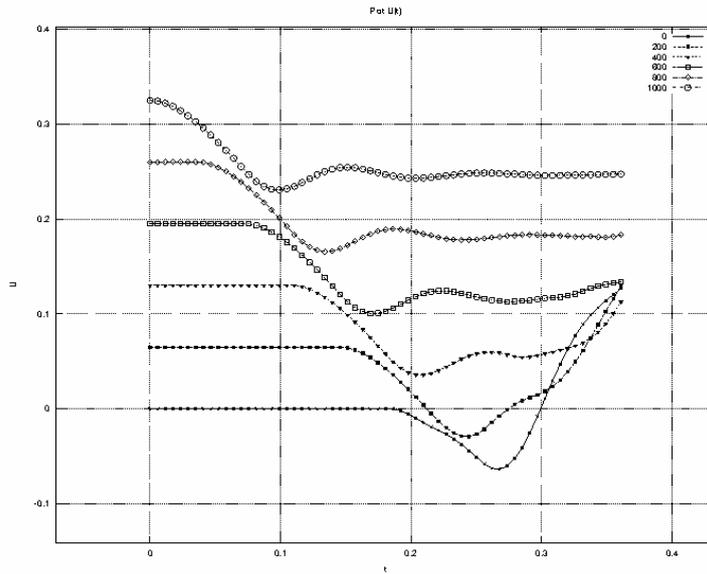


Рис. 2. Пример графика зависимости продольных перемещений  $U(t)$  в различных сечениях буровой колонны (при  $x=0, 200, 400, 600, 800$  и  $1000$  м)

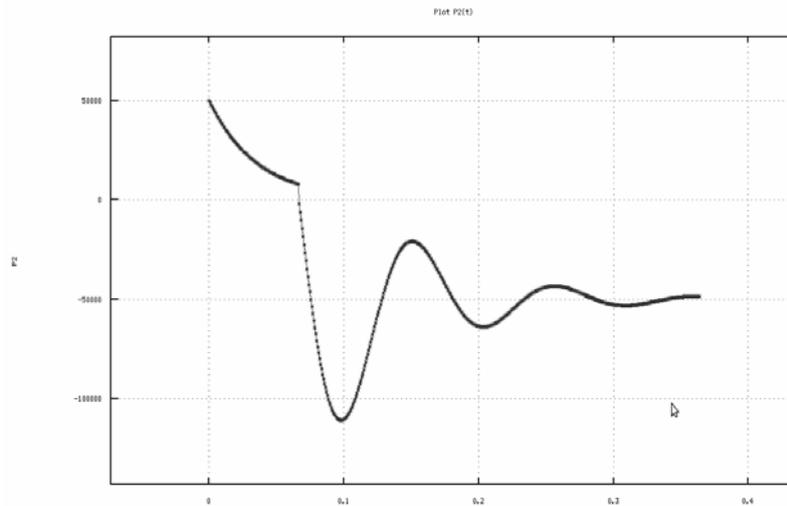


Рис. 3. Пример графика изменения усилия в нижнем сечении буровой колонны с течением времени, позволяющий определить усилие  $P(t)$ , действующее на прихваченный буровой снаряд

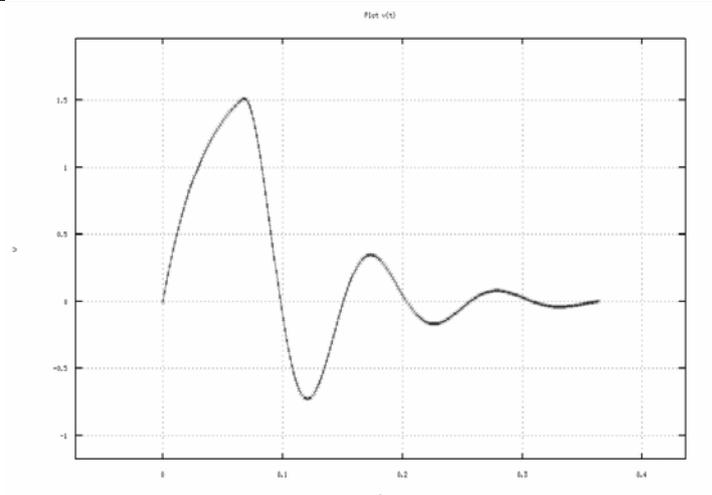


Рис. 4. Пример графика зависимости скорости  $V(t)$  нижнего сечения колонны от времени

В пользу более низких усилий свидетельствует факт беспрепятственного ведения аварийных работ, хотя результаты, приведенные в [1, 2, 5], показывали высокую вероятность обрывов буровой колонны из-за высоких динамических нагрузок.

Разработанная авторами компьютерная модель может работать как на компьютерах, с установленными операционными системами семейства Windows, так и на ПК, работающих под управлением unix-подобных ОС. Полученные результаты позволяют специалистам в области бурения скважин анализировать работу буровой колонны при ликвидации прихватов бурового снаряда ударными механизмами.

1. Ферштер А.В. Выбор оптимальных условий работы яса / Ферштер А.В., Блейх Б.А., Шейнбаум С.А. // Нефтяное хозяйство. – 1977. – №2. – С. 17–19.
2. Самотой А.К. Предупреждение и ликвидация прихватов труб при бурении скважин / Самотой А.К. – М.:Недра, 1979. – 182 с.
3. Friedman M.B. Drillstring Dynamics During Jar Operation / Friedman M.B., Skeem M.R., Walker B.H. // Journal of Petroleum Technology. – 1979. Vol 31, №11.
4. Самотой А.К. Прихваты колонн при бурении скважин / Самотой А.К. – М.: Недра, 1984. – 204 с.
5. Юртаев В. Г. Динамика буровых установок / Юртаев В. Г. – М.: Недра, 1987. – 160 с.
6. Калиткин Н.Н. Численные методы / Калиткин Н.Н. – М.: Наука., 1978. – 512 с.
7. GCC, the GNU Compiler Collection– GNU Project – Free Software Foundation (FSF). URL: <http://gcc.gnu.org/> (дата обращения: 16.03.2013)
8. Donetsk national Technical University – Computer Science and Technology – DreamSpark Premium | Академические скидки на программное обеспечение.– URL: <http://e5.onthetHub.com/WebStore/Welcome.aspx?vsro=8&ws=62E5EE8C-759B-E011-969D-0030487D8897> (дата обращения: 16.03.2013)

9. Intel® Developer Zone. URL: <http://software.intel.com/> (дата обращения: 16.03.2013)
10. GNU Octave. URL: <http://www.gnu.org/software/octave/> (дата обращения: 16.03.2013)
11. Алексеев Е.Р. Введение в Octave для инженеров и математиков / Алексеев Е.Р., Чеснокова О. В. – М.: ALT Linux, 2012. – 368 с.
12. (<http://www.altlinux.org/images/0/07/OctaveBook.pdf>)
13. Алексеев Е.Р. Scilab: Решение инженерных и математических задач / Алексеев Е.Р., Чеснокова О.В., Рудченко Е.А. – М.: ALT Linux; Бинум. Лаборатория знаний, 2008. – 260 с. (<http://docs.altlinux.org/books/2008/altlibrary-scilab-20090409.pdf>)
14. Коломоец А.В. Предупреждение и ликвидация аварий в разведочном бурении / Коломоец А.В. – М.: Недра, 1985. – 224 с.

### **БАГАТОПЛАТФОРМОВА ПРОГРАМНА МОДЕЛЬ РОБОТИ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ ПРИ ЛІКВІДАЦІЇ ПРИХВАТІВ БУРОВОГО СНАРЯДА УДАРНИМИ МЕХАНІЗМАМИ**

**Е. Р. Алексеев, А. А. Каракозов, Т. В. Кучер**

*Донецький національний технічний університет,  
вул. Артема, 58, 83001, Донецьк, Україна  
ealekseev@gmail.com, karakozov@donntu.edu.ua, kucher\_t@mail.ru*

Описано математичну модель динамічних процесів у бурильної колоні. Розглянута скінченно-різницева схема розв'язування гіперболічного рівняння на трьох етапах робочого циклу механізму. Проаналізовано програмні засоби розв'язування задачі. Обґрунтовано вибір компілятора, використуваного в програмній моделі. Проведено інженерний аналіз отриманого в результаті комп'ютерного моделювання рішення.

*Ключові слова:* бурильна колона, ударний механізм, гіперболічне рівняння, компілятор, комп'ютерна модель

### **CROSS-PLATFORM PROGRAMMING MODEL OF THE DRILL STRING IN LIQUIDATION STICKING JAR**

**E. R. Alekseev, A. A. Karakozov, T. V. Kucher**

*Donetsk National Technical University,  
Artema str., 58, 83001, Donetsk, Ukraine  
ealekseev@gmail.com, karakozov@donntu.edu.ua, kucher\_t@mail.ru*

The mathematical model of the dynamic processes in the drill string is described. A finite-difference scheme for solving the hyperbolic equation in three phase's cycle mechanism is considered. Software of the solution is analyzed. The choice of the compiler used in the programming model is reasonable. Engineering analysis of the resulting simulation solutions is carried out.

*Key words:* the drill string, percussion mechanism, hyperbolic equation, the compiler, the computer model

Стаття надійшла до редколегії 14.01.2013.

Прийнята до друку 13.02.2013.