

## ЭФФЕКТ НАПРАВЛЕННОГО СХЛОПЫВАНИЯ ЗАМКНУТОЙ ПРУЖИНЫ РАСТЯЖЕНИЯ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ЗОНДАХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРУНТОВ

*Березин С.Я.*

*Забайкальский государственный университет, Чита*

**Ключевые слова:** импульс, удар, грунт, грунтовый зонд, пенетратор, снаряд, привод, преобразование энергии, ударная пружина, боёк, ударный наконечник, кулачок, пружина сжатия, эффект направленного схлопывания пружины.

**Аннотация.** В представленном материале рассматриваются теоретические вопросы физической сущности эффекта направленного схлопывания замкнутой пружины применительно к приводам кабельных грунтовых зондов (пенетраторов). Рассмотрены основные типы грунтовых зондов для исследования физических и механических свойств грунтов земного и инопланетного происхождения, а также для испытания свойств грунтов. Приведены конструкции и принципы действия известных пенетраторов аналогичного назначения. Разработана математическая модель эффекта направленного схлопывания ударной пружины на основе кинетической энергии относительного движения смыкающихся витков пружины, формирующей ударный импульс для продвижения наконечника пенетратора. Установлены такие параметры как время направленного схлопывания пружины, время ударного импульса и суммарное его усилие. Показано, что энергия ударного импульса за время схлопывания пружины преобразуется в суммарную энергию инерции массы наконечника и энергию лобового сопротивления грунта. Разработана динамическая модель проникающей способности наконечника, характер его импульсного движения в грунте и производительность перемещения пенетратора.

## THE EFFECT OF DIRECTIONAL COLLAPSE OF A CLOSED TENSION SPRING AND ITS APPLICATION IN PROBES FOR SOIL RESEARCH

*Berezin S.Ya.*

*Transbaikal State University, Chita*

**Keywords:** impulse, impact, ground, ground probe, penetrator, drilling projectile, drive, energy conversion, shock spring, striker, impact tip, cam, compression spring, the effect of directional spring collapse.

**Abstract.** The presented material discusses the theoretical issues of the physical essence of the effect of directional collapse of a closed spring in relation to the drives of cable ground probes (penetrators). The main types of soil probes for studying the physical and mechanical properties of soils of terrestrial and alien origin, as well as for testing soil properties, are considered. The designs and principles of operation of known penetrators of a similar purpose are given. A mathematical model of the effect of directional collapse of a shock spring has been developed based on the kinetic energy of the relative motion of the closing coils of the spring forming a shock pulse to advance the tip of the penetrator. Parameters such as the time of the directional collapse of the spring, the time of the shock pulse and its total force are established. It is shown that the energy of the shock pulse during the collapse of the spring is converted into the total inertia energy of the tip mass and the drag energy of the ground. A dynamic model of the penetrating ability of the tip, the nature of its pulsed movement in the ground and the displacement performance of the penetrator has been developed.

Замкнутые пружины растяжения обладают первоначальным усилием смыкания витков. Иными словами, их упругая характеристика начинается не с

нуля, а с некоторого суммарного усилия, с которым предварительно сжаты витки. При растяжении такой пружины, один из концов которой зафиксирован, и внезапном отпуске её свободного конца, витки пружины схлопываются со значительным ударным усилием, вектор которого направлен на зафиксированную точку. Такой эффект можно использовать в различных устройствах для исследования физических и механических свойств грунтов земного и космического происхождения, зондирования грунтов для производства строительных работ, испытания материалов на твердость, в копрах, инструментах для клёпки и клеймения, в канатных подъёмниках, и в прочей импульсной механике.

Грунтовые пенетраторы для исследований земных и инопланетных грунтов разделены на две группы – быстрые и медленные. Первые внедряются в грунт с помощью реактивных двигателей или пороховых зарядов на большой скорости (ударные проникающие зонды) [1, 2]. Медленные устанавливаются на поверхность либо манипуляторами спускаемых аппаратов, либо сбрасываемыми модулями, которые придают им устойчивое начальное положение и дальнейшее продвижение в грунт происходит за счет внутренних или внешних приводных устройств. Эта группа представлена снарядами ударного действия [3-6].

В статье рассматривается конструкция и особенности работы геофизического снаряда, продвижение которого обеспечивается приводом, основанным на эффекте направленного схлопывания ударной замкнутой пружины растяжения. В более ранних материалах автора описывались некоторые конструкции и силовые характеристики работы таких пенетраторов и их конструктивные схемы [7, 8]. Работа подобных приводов основана на циклическом растяжении ударной пружины, нижний конец которой жестко закреплен на наконечнике снаряда, отпуске её, производстве удара пружины по наконечнику, повторному захвату, растяжению и т.д. Такая механика ударов приводит к тому, что пенетратор как бы сам себя забивает в грунт.

В технике известны и другие конструкции ударных систем, например, на основе пружин сжатия, которые циклически сокращаются с помощью кулачкового механизма, отпускаются, и разгоняют подвижный ударник, бьющий по наконечнику снаряда [5]. Имеются данные о приводах зондов на основе линейных электродвигателей, реверсивных шарико-винтовых механизмов и др. [9, 10]. И те, и другие изделия несут в себе миниатюрную аппаратуру для исследования физико-химических свойств грунта и дистанционной передачи данных.

Параметры смыкания витков пружин различного назначения рассматривался и в других работах, например, в работе [11] установлены зависимости геометрических и прочностных характеристик пружины сжатия от допускаемой скорости соударения витков для упругих и пластических деформаций в зоне контакта. Для формализации эффекта направленного схлопывания ударной замкнутой пружины растяжения эти данные окажутся полезными при описании напряженного состояния наиболее нагруженных витков при соударении. Здесь же рассматривается сущность самого эффекта и связанных с ним параметров.

Схема снаряда с пружиной растяжения приведена на рисунке 1. Вся механика смонтирована в цилиндрическом корпусе 1 и приводится в действие от мотор-редуктора 2 с муфтой 3. Подвод энергии производится через кабельную бухту 4, уложенную в специальном отсеке. По мере продвижения снаряда происходит разматывание бухты. Вращательное движение передается преобразовательному механизму 5 возвратно-поступательного движения. Шток данного механизма несет захватно-спусковое устройство 6, рычаги которого, при ходе вниз захватывают грибок 7 ударной пружины 8, а при ходе назад разводятся упорами 9 и отпускают пружину. Последняя смыкается, производя своей суммарной массой ударный импульс по наконечнику 10. Шток механизма 5 и захватно-спусковое устройство 6 удерживаются от вращения направляющей шпонкой 11. Схлопывание пружины обеспечено тем, что она выполнена с замкнутыми витками, которые плотно прижаты друг к другу силой предварительного натяга.

Рассмотрим работу схлопывающейся пружины, представив её в виде следующей графической модели на рисунке 2.

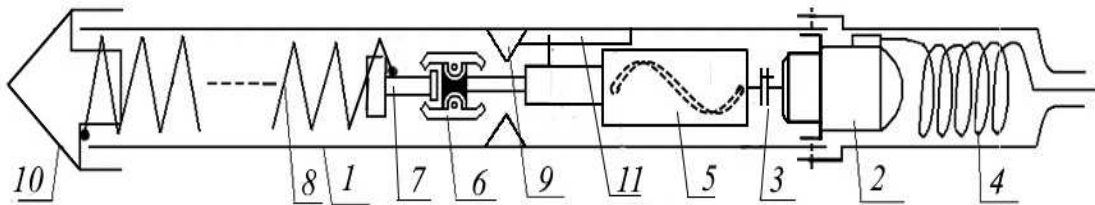


Рис. 1. Схема бурового снаряда с приводом возвратно-поступательного движения и ударной пружиной

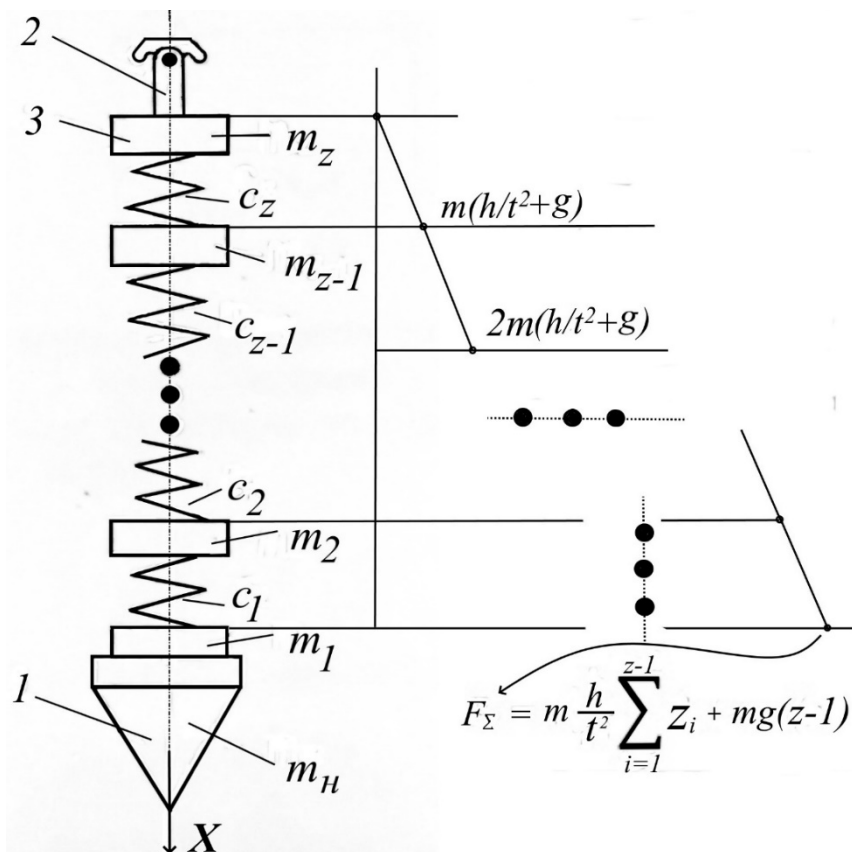


Рис.2. Механическая модель срабатывания замкнутой пружины растяжения

Уточним, что пружина расположена вертикально и первый её виток жестко закреплён на наконечнике 1 (ударнике), по которому пружина производит удар при схлопывании её витков. Пружина растягивается реверсивным возвратно-поступательным механизмом путём захвата за рычаги спускового устройства 2. Каждый виток пружины представлен отдельными массами 3 ( $m_1 \dots m_z$ ), соединенных друг с другом осевыми элементами жесткости  $C_1 \dots C_z$ . При натяжении пружины каждый виток растягивается на величину  $h$ , при этом витки прижаты друг к другу усилием предварительного натяга ( $C_i h_\Delta$ ), который формируется в процессе навивки пружины. Здесь  $h_\Delta$  – величина межвиткового натяга, образуемый при навивке пружины. Поскольку первый виток закреплён на наконечнике, то при схлопывании второй виток наносит удар по первому, третий по второму и первому, четвёртый по третьему, второму и первому и т.д. по цепи. Таким образом формируется суммарное усилие схлопывания. Т.к. первый виток только принимает удар, то в процессе будет участвовать только  $(Z - 1)$  витков. Необходимо отметить, что, в случае вертикальной схемы ударной пружины, к инерционной составляющей удара необходимо добавлять и гравитационную его часть. При горизонтальной схеме последней можно пренебречь.

Представим потенциальную энергию растянутой пружины в виде двух составляющих

$$P = P_C + P_D, \tag{1}$$

где  $P$  – общая потенциальная энергия;  $P_C$  – энергия заряженной растянутой пружины;  $P_D$  – суммарная энергия поднятых при растяжении витков.

Составляющие  $P_C$  и  $P_D$  определяются по следующим рекуррентным формулам

$$\begin{cases} P_C = \frac{C(h+h_3)^2}{2} + 4 \frac{C(h+h_3)^2}{2} + \dots + Z^2 \frac{C(h+h_3)^2}{2} = \frac{C(h+h_3)^2}{2} S_{zk}; \\ P_D = m_1 gh + m_2 g(2h) + m_3 g(3h) + \dots + m_z g((z-1)h) = mgh \cdot S_z; \end{cases} \tag{2}$$

где  $C$  – жесткость пружины;  $S_{zk}$  и  $S_z$  – суммы последовательностей вида

$$\begin{cases} S_z = \frac{z}{2} (z-1); \\ S_{zk} = \sum_{z=1}^{z-1} (z+2^2+3^2+\dots+(z-1)^2) = \frac{z}{6} (z^2-1); \end{cases} \tag{3}$$

где  $Z$  – общее число витков пружины при условии, что суммы  $S_z$  и  $S_{zk}$  рассчитаны только для  $(Z - 1)$  рабочих витков.

Потенциальная энергия, описанная суммой (1), при отпуске пружины превращается в кинетическую энергию движения витков  $K$ . При этом для составления модели работы пружины необходимо установить некоторые условия:

- 1) массы витков пружины равны по всей её длине;
- 2) время схлопывания пружины одинаково для каждого витка, т.е. все витки смыкаются одновременно  $t_1 = t_2 = t_3 = \dots = t_z$ ;
- 3) каждый последующий виток проходит удвоенный путь относительно предыдущего

$$\begin{cases} h_1 = 0; \\ h_2 = h; \\ h_3 = 2h; \\ \dots \\ h_z = (z-1)h. \end{cases}$$

Тогда кинетическая энергия витков, движущихся при схлопывании, будет представлена рекуррентной формулой

$$K = \frac{m_1 h_1^2}{2t^2} + \frac{m_2}{2} 4 \frac{h_2^2}{t^2} + \dots + \frac{m_z}{2} (z-1)^2 \frac{h_{z-1}^2}{t^2} = \frac{m}{2} \cdot \frac{h^2}{t^2} \cdot S_{zk}^*, \quad (4)$$

где  $S_{zk}^*$  – сумма последовательности чисел вида

$$S_{zk}^* = \frac{z-1}{6} \cdot [2(z-1)^2 + 3(z-1) + 1]. \quad (5)$$

Приравнявая потенциальную энергию (1) к кинетической и решая уравнение относительно времени схлопывания пружины, имеем

$$t_c = \sqrt{\frac{mh^2 \cdot S_{zk}^*}{c(h+h_3)^2 \cdot S_{zk} + 2mgh \cdot S_z}}. \quad (6)$$

За время схлопывания (смыкания) пружины каждый виток проходит свой определенный путь, приобретая соответствующее ускорение  $hz_i/t_c^2$ , где  $z_i$  – порядковый номер витка. Тогда суммарное усилие удара пружины с учетом веса витков будет соответствовать следующему выражению

$$F_{\Sigma} = m \frac{h}{t_c^2} (1 + 2 + 3 + \dots + (z-1)) + mg(z-1) = m \frac{h}{t_c^2} S_z + mg(z-1), \quad (7)$$

где  $S_z$  – сумма из системы (3).

Процесс удара и продвижения происходит в следующей последовательности в соответствии с рисунком 3. В результате схлопывания пружины за время  $t_c$  формируется ударный импульс с временем  $t_y$ . Амплитудное значение ударного импульса вызывает перемещение наконечника за время  $t_H$ .

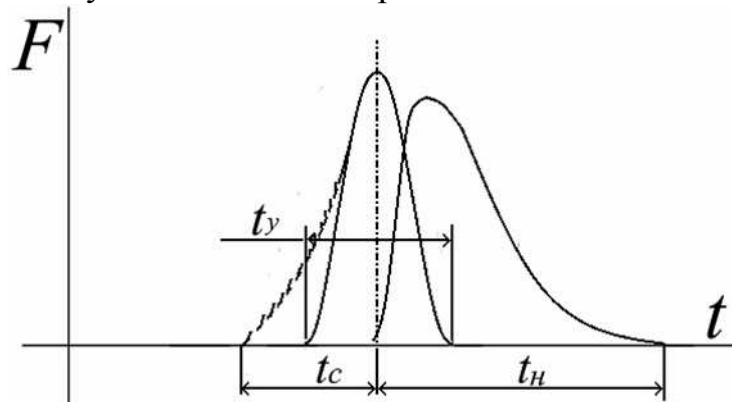


Рис. 3. Распределение времен действий в механике снаряда

Время ударного импульса можно установить на основании формулы Герца [12, 13]

$$t_y = 3,213 \left( \frac{m_{np}^2}{V_y \cdot K_E^2} \right)^{1/5}, \quad (8)$$

где  $K_E$  – коэффициент, равный

$$K_E = \frac{4E}{3(1-\mu^2)} \cdot \sqrt{\frac{R}{2}},$$

где  $E$  и  $\mu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала пружины соответственно;  $R$  – радиус проволоки пружины;  $V_y$  – скорость соударения при условии сохранения упругих свойств

$$V_y = \frac{\sigma_y}{\sqrt{E\rho}}, \quad (9)$$

где  $\sigma_y$  – предел упругости;  $\rho$  – плотность материала.

Суммарное усилие схлопывания пружины будет преодолевать инерцию наконечника и сопротивление грунта внедрению наконечника. Этот момент можно описать следующим уравнением

$$m_n \ddot{Y} + \sigma_1 \frac{\pi d^2}{4} = m_{np} \frac{h}{t_c^2} S_{z-1} + m_{np} g(z-1), \quad (10)$$

где  $m_n$  – масса наконечника;  $\sigma_1$  – напряжение сопротивления грунта;  $d$  – диаметр наконечника;  $m_{np}$  – масса пружины.

Преобразуем уравнение (10) и, с целью упрощения, введём в него величины  $a$  и  $b$

$$\begin{cases} \ddot{Y} = \frac{m_{np}}{m_n} \left( \frac{h}{t_c^2} S_{z-1} + g(z-1) \right) - \sigma_1 \frac{\pi d^2}{4m_n}, \\ \left\{ \begin{array}{l} a = \left[ \frac{h}{t_c^2} S_{z-1} + g(z-1) \right] \cdot \frac{m_{np}}{m_n}, \\ b = \sigma_1 \frac{\pi d^2}{4m_n}. \end{array} \right. \end{cases} \quad (11)$$

Решение системы (11) относительно  $Y(t)$  и его первая производная будут иметь вид

$$\begin{cases} Y(t) = C_2 + C_1 t + t^2(a/2 - b/2); \\ \dot{Y}(t) = C_1 + 2t(a/2 - b/2). \end{cases} \quad (12)$$

При начальных условиях, указанных ниже, определим нулевые значения постоянных интегрирования:

$$t = t_n = 0, \quad \begin{cases} Y(t) = 0, & C_2 = 0; \\ \dot{Y}(t) = 0, & C_1 = 0. \end{cases}$$

Тогда величина перемещения наконечника за время одного ударного импульса и время самого перемещения  $t_n$  будут соответственно равны

$$\begin{cases} Y_H = t_H^2 \left( \frac{a-b}{2} \right); \\ t_H = \sqrt{\frac{2Y_H}{a-b}}. \end{cases} \quad (13)$$

С другой стороны, энергия ударного импульса за время схлопывания пружины  $t_c$ , преобразуется в суммарную энергию инерции массы наконечника и энергию лобового сопротивления грунта за время  $t_H$ , что можно описать уравнением следующего вида

$$\left( m_{np} \frac{h}{t_c^2} S_{z-1} + m_{np} g(z-1) \right) \cdot t_c = m_H \frac{z_H}{t_H} + \sigma_1 \frac{\pi d^2}{4} \cdot t_H.$$

С учетом величин  $a$  и  $b$  (см. формулу (11)), уравнение приобретает более простой вид

$$at_c = \frac{Y_H}{t_H} + bt_H. \quad (14)$$

Подставляя  $Y_H$  из формулы (13) и, решая относительно  $t_H$ , после преобразований получим

$$t_H = 2at_c / (a+b) = 2t_c / (1 + [0,25\sigma_1 \cdot \pi d^2 / [\frac{h}{t_c^2} S_{z-1} + g(z-1)] \cdot m_{np}]). \quad (15)$$

Дальнейшие преобразования формул (13 и 15) относительно величины  $Y_H$  приводят к громоздким результатам в виде кубических форм выражения в квадратных скобках  $[\frac{h}{t_c^2} S_{z-1} + g(z-1)]$ , что делает вычисления

затруднительными. Кроме того, принятая величина лобового сопротивления грунта, с целью упрощения учитывала только прочностной показатель без учета показателя вязкости. Поэтому, для получения величины  $Y_H$  аппаратными исследованиями, в соответствии с известной методикой [14], были установлены характеристики грунтов. Исследования состояли в том, что в различные виды грунта на специальном копре единичными ударами забивался индентор, при одновременной регистрации времени удара, величины перемещения и спектра ударной силы [15]. На основе экспериментальных исследований были установлены величины напряжения сопротивления грунта (лобового сопротивления), жесткости, вязкость грунта, величина и время внедрения индентора за один ударный импульс. Например, для грунтов 3-й категории лобовое сопротивление составляло 3...11 МПа, а вязкость 85...100 Нс/м.

Таким образом, можно представить лобовое сопротивление грунта в соответствии с полученными экспериментальными данными по сопротивлению и вязкости в следующей форме

$$C_G Y_H + v_G \dot{Y}_G = K_D \sigma_1 \frac{\pi d^2}{4}, \quad (16)$$

где  $C_G$  – показатель жесткости грунта [Н/м];

$v_G$  – вязкость грунта [Н·с/м];

$K_D$  – коэффициент динамичности из работ [7, 12].

Решение уравнения (16) относительно величины смещения будет иметь более простой вид

$$Y_n = \frac{K_D \sigma_1 \pi d^2}{4C_\Gamma} \left( 1 - e^{-\left(\frac{C_\Gamma \cdot t}{v_\Gamma}\right)} \right). \quad (17)$$

Выражение в скобках описывает переходной процесс перемещения ударного наконечника в период времени  $(0 \leq t \leq t_n)$ . Опуская характер этого процесса, определим максимальные значения смещения и скорости наконечника за один удар

$$\begin{cases} Y_n^{\max} = \frac{K_D \sigma_1 \pi d^2}{4C_\Gamma}; \\ V_n^{\max} = \frac{K_D \sigma_1 \pi d^2 [1 + 0,25 \sigma_1 \cdot \pi d^2 / [\frac{h}{t_c^2} S_{z-1} + g(z-1)] \cdot m_{np}]}{8C_\Gamma t_c}. \end{cases} \quad (18)$$

На рисунке 4 представлен характер периодического перемещения ударного наконечника. С учетом выражения (18) процесс смещения в пределах времени одного ударного импульса хорошо аппроксимируется функцией гиперболического тангенса

$$Y_n = \frac{K_D \sigma_1 \pi d^2}{4C_\Gamma} \cdot \tanh(b \cdot t), \text{ при } (0 \leq t \leq t_n), \quad (19)$$

где  $b$  – коэффициент приведения функции тангенса к указанному в формуле временному диапазону ( $b \sim 60-65$ ).

На рисунке 4 представлены также формы временных кривых перемещений  $Y_n$  за время единичного импульса при последовательности ударов.

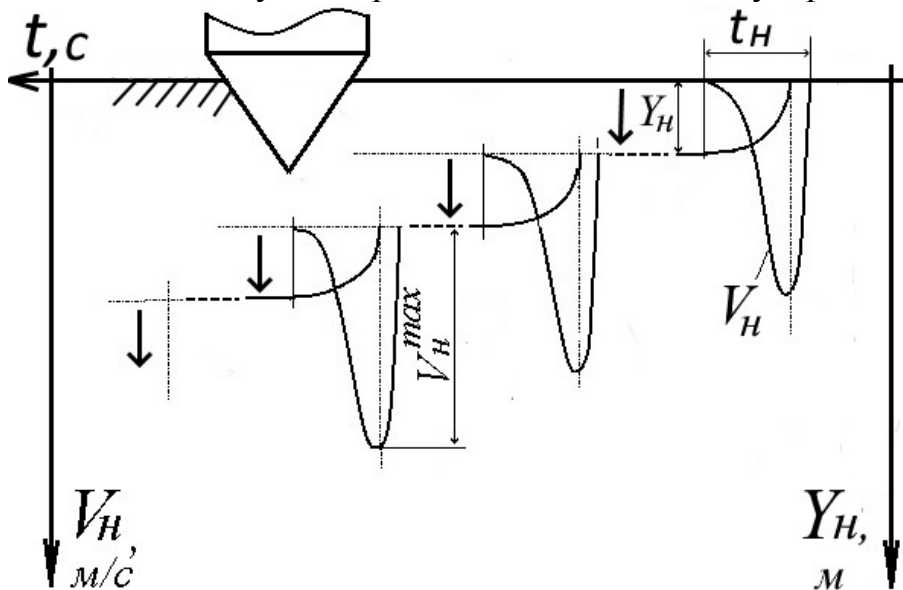


Рис. 4. Параметры последовательности импульсов перемещения наконечника

Отсюда можно определить интенсивность продвижения снаряда (производительность)



$$Q_V = Y_n \cdot n,$$

где  $n$  – частота ударов механизма снаряда в минуту.

Таким образом, с увеличением пиковой скорости удара, его усилие будет расти.

Приведенная методика анализа динамики ударного движителя со схлопывающейся пружиной позволяет не только установить рабочие режимы процесса, рассчитать параметры механизмов, но и моделировать условия работы, подбирая необходимые данные в соответствии с требуемыми техническими характеристиками снарядов.

### **Заключение**

1. Представлен анализ областей применения и разновидностей пенетраторов для исследования подповерхностных слоев грунтов различного происхождения. Установлен наиболее перспективный тип грунтовых зондов на основе редкоударных механизмов с замкнутой пружиной растяжения и реверсивным устройством её периодического заряда и спуска.

2. Сформировано представление об эффекте направленного схлопывания ударной пружины, который позволяет обеспечить необходимую производительность продвижения пенетраторов за счет периодического преобразования энергии заряженной ударной пружины в энергию удара и продвижения проникающего наконечника.

3. Разработана математическая модель эффекта направленного схлопывания замкнутой пружины растяжения. Решена проблема получения расчетных моделей основных параметров продвижения пенетратора в грунте в виде времени схлопывания пружины, времени ударного импульса, величины элементарного перемещения за один удар.

4. Установлены временные спектры этапов преобразования энергии от начального импульса схлопывания пружины до импульса продвижения наконечника. Получены формулы для расчета времени единичного проникающего импульса и расчета производительности продвижения в грунте.

### **Список литературы**

1. Патент №2626792 РФ. Способ доставки полезного груза в грунт небесного тела, обеспечения исследований грунта и небесного тела и устройство его реализации (варианты) / В.В. Шалай, К.М. Пичхадзе, А.А. Багров и др.: заяв. и патентообладатель Омский гос. техн. ун-т. – №2015154859; заявл. 16.05.2016; опубл. 01.08.2017, Бюл. № 22. – 8 с.
2. Родченко В.В., Заговорчев В.А., Садретдинова Э.Р., Пронина П.Ф. Применение реактивных пенетраторов для движения в лунном грунте // Вестник УГАТУ. 2019. Т. 23, № 1 (83). С.56-63.
3. Буровые снаряды ударного действия для геофизических исследований в космосе / Е.А.Кудряшов, Н.Н.Грушева, С.Я.Березин и др. // Авиационные технологии и оборудование: Матер. междунар. науч.-практ. конф.– Казань: Казан. гос. техн. ун-т им. А.Н.Туполева, 2006. – С. 55-56.
4. Линник Е.Ю. Определение параметров модели локального взаимодействия при внедрении конических ударников в песчаный грунт // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Механика. 2014. № 1 (1). С. 186-191.
5. Mangkuan Wang, Jinguo Liu, Jingkai Feng et al. Dynamics Research and Parameter Optimization of Planetary Penetrators // IEEE ACCESS. 2019. Vol. 7. – P. 82052-82065.

6. Yang Gao, Alex Ellery, Mustafa Jaddou et al. A Novel Penetration System for in situ Astrobiological Studies // International Journal of Advanced Robotic Systems. December, 2005. P. 281-286. DOI: 10.5772/5779.
7. Березин С.Я. Динамическая модель редкоударного привода кабельного бурового снаряда // Вестник ЧитГТУ. 2002. № 23. С. 102-106.
8. Березин С.Я. Динамическая модель редкоударного привода кабельных буровых снарядов // Трибофатика: Труды V международного симпозиума 3-7 окт. 2005. В 3-х т. Т. 3. – Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2005. – С. 256-259.
9. А.с. №1696654 СССР. Устройство для проходки выработок / С.Я. Березин, Н.Н. Грушева, В.В. Степанов и др.: заяв. и патентообладатель Читинский гос. техн. ун-т. – №4768804/03; заявл. 15.12.89; опубл. 07.12.91, Бюл. №45. – 2 с.
10. Березин С.Я. Реверсивные механизмы для создания периодических редкоударных импульсов в приводах снарядов для исследования грунта // Глобальные вызовы развития естественных, технических и гуманитарных наук: Сборник научных трудов по материалам междунар. науч.-практ. конф. – Белгород: ООО Агенство перспективных научных исследований (АПНИ), 2022. – С. 25-28.
11. Стихановский Б.Н. Определение допустимых скоростей удара витков цилиндрической пружины сжатия // Омский научный вестник. 2005. №4 (33). С. 118-119.
12. Пановко Я.Г. Введение теорию механического удара. – М.: Наука, 1977. – 224 с.
13. Манжосов В.К. Модели продольного удара. Монография. – Ульяновск: УлГТУ, 2006. – 160с.
14. Оперативный контроль плотности и прочности грунтов земляных сооружений зондированием: Лабораторный практикум / Сост.: В.А. Гриценко, В.Н. Шестаков. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2008. – 48 с.
15. Березин С.Я., Грушева Н.Н., Степанов В.В. Средства и метод испытаний динамических характеристик автономных геофизических снарядов: Матер. VII Всесоюзн конф. (ЭИИС-91). – Сумы: Обл. типогр., 1991. – С. 147-149.

Сведения об авторе:

*Березин Сергей Яковлевич* – д.т.н., профессор, профессор кафедры технических систем и робототехники.