

2. Лапшин В.Л., Демаков Е.И. Упруго-вязко-пластичная механореологическая модель для оценки упруго-вязких свойств минералов при моделировании процессов вибросепарации // VI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Механика – XXI веку»: сб. докл. Братск, 2007. С. 67–71.

3. Влияние упруго-пластических параметров блока механореологической модели на силу ударного взаимодействия сферического тела с плоской поверхностью / В.Л. Лапшин,

В.П. Ященко, А.Ю. Перельгина, Е.И. Демаков // Современные технологии, системный анализ, моделирование. 2009. Вып. 2 (22). С. 36-41.

4. Лапшин В.Л., Глухов А.В. Компьютерное исследование упруго-вязко-пластичной механореологической модели // Современная техника и технологии: исследования и разработки: сб. докл. Междунар. науч. заочной конф. Липецк, 2011. С. 20-27.

УДК 621.878

Ю.А. Геллер

### ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТА НА ЧАСТОТУ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧЕГО ОРГАНА РЫХЛИТЕЛЯ С АККУМУЛЯТОРОМ ЭНЕРГИИ

*В работе проведен анализ формирования грунтовых элементов при взаимодействии рабочего органа рыхлителя с аккумулятором энергии. Рассмотрено влияние упругой связи на характер разрушения грунта и перераспределение зон упругой и пластической деформации при формировании грунтовых элементов. Представлена аналитическая зависимость, устанавливающая взаимосвязь между механическими свойствами грунта и параметрами ведения земляных работ.*

**Ключевые слова:** рыхлительное оборудование, базовая машина, прочный грунт, замыкание динамической нагрузки, энергоемкость процесса, аккумулярование, угол внутреннего трения, касательные нагрузки.

Рыхлитель с аккумулятором энергии относится к классу машин, работа которых основана на принципе замыкания динамических нагрузок на рыхлительном оборудовании и грунте [1 – 8].

Эффективность процесса разработки грунта рыхлителем с аккумулятором характеризуется двумя основными моментами.

С одной стороны, применение аккумулятора энергии оказывает влияние на механизм образования грунтовых элементов, вызывая изменение соотношения между зонами пластического деформирования и хрупкого разрушения, возникающего при отделении элементов от грунтового массива. С другой – оказывает влияние на перераспределение энергии, высвобождаемой в результате резкого изменения сил сопротивления грунта разрушению в период между очередным отделением грунтового элемента и формированием нового. Важную роль при этом оказывают

параметры рыхлительного оборудования и режимы ведения земляных работ.

При оценке параметров процесса влияние обоих моментов взаимосвязано, и определить ожидаемый эффект по одному из них невозможно.

Последовательность формирования элементов грунтовой стружки при передаче энергии на рабочий орган через упругую связь в целом подобна их образованию при жесткой связи рабочего органа с элементами навески рыхлительного оборудования, но некоторые моменты, свойственные упругой связи, предъявляют определенные условия к процессу разрушения мерзлого грунта.

Изучение физической сущности процесса отделения грунтовых элементов от массива проводилось тензометрированием касательной составляющей сопротивления грунта разрушению с записью процесса на осциллографическую ленту, а также фотосъемкой этапов

образования грунтового элемента при свободном разрушении грунта.

Изучение кадров фотосъемки и расшифровка осциллограмм касательной составляющей усилия сопротивления грунта разрушению, возникающего в процессе разработки грунта, позволили установить следующее.

Процесс разрушения грунта при передаче энергии на рабочий орган через упругую связь представляет собой повторяющийся цикл скола грунтовых элементов от массива. Рабочий орган, внедряясь в грунт, вызывает его сжатие. При этом наибольшее значение касательной составляющей  $P_t$  усилия сопротивления грунта разрушению достигается перед непосредственным отделением грунтового элемента, когда контакт передней грани ножа с грунтовым массивом достигает своего максимального значения, после чего происходит резкое падение усилия  $P_t$ . Этому моменту соответствует формирование грунтового элемента и начало перемещения его на поверхность. Дальнейшее движение рабочего органа осуществляется под действием потенциальной энергии, накопленной в аккумуляторе. В этот период происходит продвижение основного элемента на поверхность и скол промежуточных малых грунтовых элементов. Цикл движения рабочего органа завершается началом образования очередного основного элемента грунтовой стружки. В это время накопленная рабочим органом кинетическая энергия и передаваемая ему от упругого элемента потенциальная переходят в грунт, вызывая его смятие в месте контакта с передней поверхностью и создание площадки сдвига. Дальнейшее формирование основного грунтового элемента происходит с одновременным накоплением энергии в аккумуляторе.

Сравнение осциллограмм усилий сопротивления грунта разрушению, возникающих при разработке грунта рабочим органом с жесткой и упругой связью, позволило также отметить следующее.

При жесткой связи рабочего органа осциллограмма касательной составляющей силы  $P_t$  на восходящих участках близка к прямолинейной или незначительно вогнута, что указывает на хрупкий характер разрушения грунта. Кроме этого, кривая силы  $P_t$  возрастает от минимального своего значения до максимального не сразу, а многократно изменяясь по величине (спектр высоких частот  $\nu=10...20 \text{ с}^{-1}$ ), возрастает до максимума (спектр низких частот  $\nu=2,5...4 \text{ с}^{-1}$ ), после чего падает;

При передаче энергии на рабочий орган через упругую связь осциллограмма силы сопротивления грунта разрушению на восходящих участках имеет незначительную выпуклость, что указывает на дополнительные затраты энергии, связанные с пластическим деформированием грунта и сжатием упругого элемента. Однако меньшее значение силы  $P_t$  и больший размер сколотых элементов (превалирует спектр низких частот  $\nu=2,5...4 \text{ с}^{-1}$ ) позволяет судить о некотором снижении энергоемкости процесса разработки грунта. Необходимо также отметить, что часть энергии, накопленная аккумулятором, затрачивается на перемещение отделившихся и скол промежуточных элементов грунтовой стружки. На осциллограмме этот процесс отмечен незначительным наклоном спадающей части кривой и последующим, как правило, одиночным всплеском в области высоких частот ( $\nu=10...20 \text{ с}^{-1}$ ).

На основании проведенных экспериментов установлено, что передача энергии от базовой машины на рабочий орган через аккумулятор может быть разбита на следующие четыре этапа.

1. Аккумулятор накапливает энергию, но отделения грунтового элемента еще не происходит. В этот период начинается образование и рост ядра уплотнения.

2. Внутреннее напряжение в грунтовом массиве перед рабочим органом, соответствующее потенциальной энергии, накопленной в аккумуляторе, достигает своего критического значения. Для этого периода характерно завершение образования грунтового элемента, падение силы сопротивления грунта разрушению и возрастание скорости движения рабочего органа.

3. Абсолютная скорость рабочего органа достигает своего максимального значения, превышающего скорость движения базовой машины. Энергия, запасенная аккумулятором, переходит в кинетическую энергию рабочего органа. В этот период происходит передача кинетической энергии на отделение промежуточных элементов грунта и перемещение основного к дневной поверхности.

4. Абсолютная скорость рабочего органа падает до минимального своего значения – меньшего, чем скорость движения базовой машины. Оставшаяся часть энергии (кинетической) переходит в грунт на образование нового ядра уплотнения и создание микротрещин, определяющих новую площадку скола

основного грунтового элемента. При этом часть энергии в виде упругих деформаций возвращается обратно в механическую систему. Начинается накопление потенциальной энергии в аккумуляторе.

В процессе проведения экспериментальных исследований установлено, что одной из главных причин изменения размеров образуемых грунтовых элементов является увеличение или уменьшение критической площади контакта передней грани режущего инструмента с грунтом. Отмечено также, что с уменьшением жесткости упругой связи или увеличением скорости подачи рабочего органа площадь контакта передней грани режущего инструмента с грунтом уменьшается, тогда как касательная составляющая силы сопротивления грунта разрушению в этом случае возрастает.

Таким образом, в основе образования грунтовых элементов как при изменении жесткости упругой связи, так и скорости подачи рабочего органа, лежит одно и то же явление, обусловленное смещением характера разрушения грунта из зоны пластического деформирования в зону хрупкого и наоборот, т. е. определяющим фактором при образовании грунтовых элементов является скорость деформирования материала. Указанные выводы не противоречат теории физики твердого тела [9] и хорошо согласуются с исследованиями влияния скорости резания на энергоемкость процесса [10].

Если процесс разработки грунта рассматривать как периодический, в результате которого происходит скол грунтовых элементов с некоторой постоянной частотой  $\nu$  (рис. 1), то общий объем разработанного грунта можно представить в виде объемов отдельных элементов стружки

$$V_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n V_i, \quad (1)$$

где  $V_{\text{общ}}$  – общий объем разработанного грунта,  $\text{м}^3$ ;  $n$  – суммарное количество сколотых грунтовых элементов;  $V_i$  – объем  $i$ -го грунтового элемента,  $\text{м}^3$ .

Известно, что в процессе образования очередного грунтового элемента [11, 12, 13] отделение его происходит по плоскости скола, расположенной под углом  $\psi$  к основанию прорезаемой щели. Таким образом, объем вырезаемого грунтового элемента для свободно-

го резания грунта можно выразить следующим соотношением:

$$V_{\text{cmp}} = (AB * AF + CE * GD / 2)b, \quad (2)$$

но

$$AB = CE = l_{\text{cm}}; AF = AE * \sin(\alpha + \psi);$$

$$AE = AD - ED = (h - l_{\text{cm}} \sin \alpha) / \sin \psi;$$

$$GD = ED \sin(\alpha + \psi) = l_{\text{cm}} \sin \alpha \sin(\alpha + \psi) / \sin \psi,$$

тогда

$$V_{\text{cmp}} = \{ [l_{\text{cm}}(h - l_{\text{cmp}} \sin \alpha) \sin(\alpha + \psi) / \sin \psi] + l_{\text{cm}}^2 \sin \alpha \sin(\alpha + \psi) / 2 \sin \alpha \} b, \quad (3)$$

где  $V_{\text{cmp}}$  – объем вырезаемого грунтового элемента,  $\text{м}^3$ ;  $b$  – ширина прорезаемой щели,  $\text{м}$ ;  $l_{\text{cmp}}$  – длина площадки среза,  $\text{м}$ ;  $l_{\text{cm}}$  – длина площадки смятия,  $\text{м}$ ;  $\alpha$  – угол резания, град.;  $\psi$  – угол наклона площадки скола, град.;  $h$  – глубина резания,  $\text{м}$ .

При рассмотрении процесса резания как последовательного скалывания элементов вдоль направления, определяемого углом скалывания  $\psi$ , между параметрами  $l_{\text{cmp}}$  и  $l_{\text{cm}}$  существует следующая зависимость:

$$l_{\text{cmp}} = l_{\text{cm}} \sin(180 - \alpha - \psi) / \sin \psi. \quad (4)$$

Из выражения следует, что при определенной геометрии рабочего органа  $l_{\text{cmp}}$  и  $l_{\text{cm}}$  вполне определяются углом скалывания  $\psi$ . Все прочие факторы, в том числе и свойства разрабатываемого грунта, влияют на  $l_{\text{cmp}}$  и  $l_{\text{cm}}$  через угол  $\psi$ . В соответствие с ранее проводимыми исследованиями [14] и наблюдениями автора, можно сказать, что с изменением скорости резания происходит изменение размеров ядра структурного уплотнения. Это, в свою очередь, определяет длину зоны смятия  $l_{\text{cm}}$ . Кроме того, наличие упругой связи в кинематической цепи рабочего органа также вносит свои коррективы в размеры скалываемого элемента стружки. Учитывая это, выражение (4) примет следующий вид:

$$l_{\text{cmp}} = l_{\text{cm}} (\sin(180 - \alpha - \psi) / \sin \psi) K_v K_c, \quad (5)$$

где  $K_v$ ,  $K_c$  – коэффициенты, учитывающие влияние скорости и жесткости упругой связи на размер скалываемого элемента.

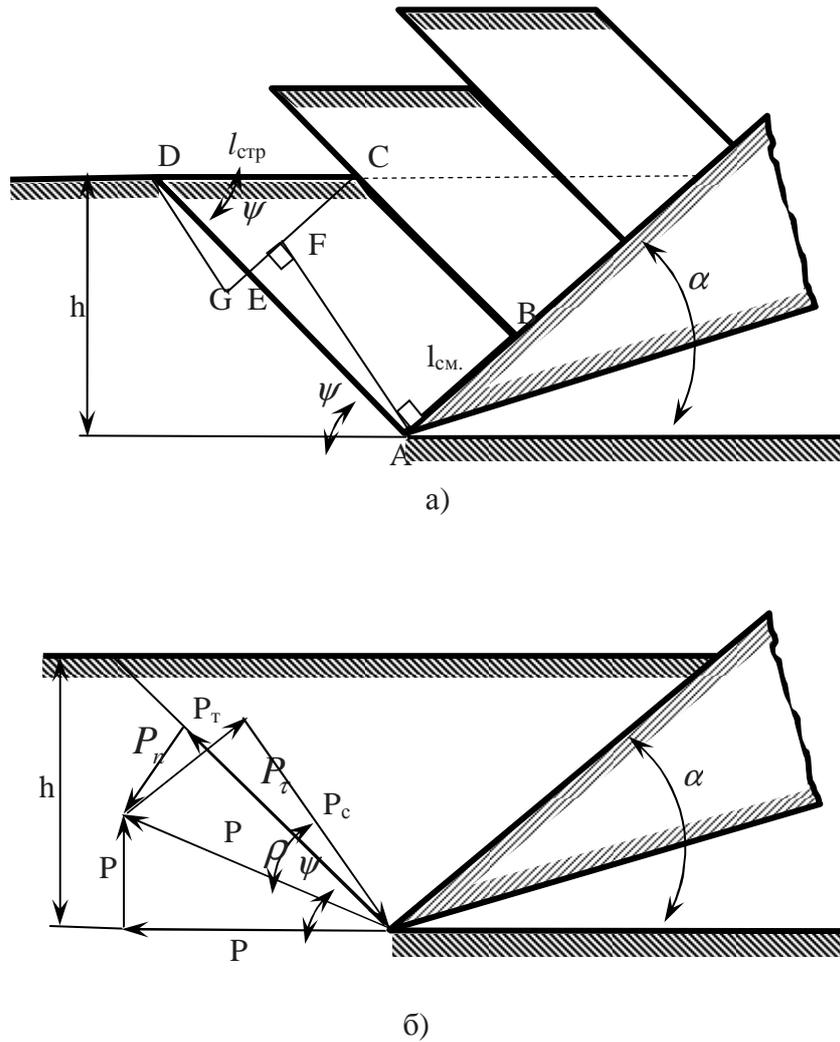


Рис. 1. Схема образования грунтовых элементов: а – момент образования очередного грунтового элемента; б – усилия, возникающие в грунтовом массиве.

Таким образом, выяснено, что основным параметром, влияющим на размер образуемого грунтового элемента, является площадь деформируемой части элемента, а именно, длина площадки смятия по передней грани ножа рабочего органа  $l_{см}$ . При этом, чем больше площадь деформированной части элемента, тем больше его объем.

Как уже отмечалось выше, первая стадия образования грунтового элемента сопровождается деформацией сжатия в срезаемом слое и заканчивается, когда площадь смятия возрастает до некоторого определенного значения, соответствующего механическим свойствам грунта и режимам его разработки. Момент скалывания грунтового элемента характеризуется следующими условиями:

$$P_{см} = \sigma_{см} F_{см} = \sigma_{см} b l_{см} \quad (6)$$

$$P_{ср} = \tau_{ср}^n F_{ср} = \tau_{ср}^n b l_{ср}, \quad (7)$$

где  $P_{см}$ ,  $P_{ср}$  – соответственно, сила, возникающая при образовании грунтового элемента по площадке смятия и среза, кН;  $\sigma_{см}$  – напряжение смятия, возникающее в зоне контакта передней грани ножа с грунтовым массивом в момент нарушения предельного напряженного состояния, мПа;  $\tau_{ср}^n$  – напряжение среза, соответствующее нарушению предельного напряженного состояния грунта по площадке сдвига грунтового элемента, мПа;  $b$  – ширина зоны резания, м;  $l_{см}$ ,  $l_{ср}$  – проекции плоскостей смятия и среза, м.

В первом приближении можно считать, что разработка грунта сопровождается образованием одинаковых грунтовых элементов, пред-

ставляющих собой среднестатистический размер грунтового элемента в реальных условиях, а сам элемент (рис. 1) имеет трапециевидальную форму.

В этом случае проекцию сил на ось, совпадающую с направлением движения рабочего органа, можно представить в виде:

$$\sigma_{cm} b l_{cm} \sin \alpha = \tau_{cp}^n b l_{cp} \cos \psi, \quad (8)$$

откуда

$$l_{cm} = l_{cp} \frac{\tau_{cp}^n \cos \psi}{\sigma_{cm} \sin \alpha} = \frac{\tau_{cp}^n \operatorname{ctg} \psi}{\sigma_{cm} \sin \alpha}. \quad (9)$$

Поскольку

$$\frac{l_{cmp}}{\sin(180 - \alpha - \psi)} = \frac{l_{cm}}{\sin \psi},$$

$$\psi = (90 - \frac{\alpha + \rho + \rho_0}{2}), \quad (10)$$

то

$$l_{cmp} = \frac{l_{cm} \sin(180 - \alpha - \psi)}{\sin \psi} = \frac{h \tau_{cp}^n \operatorname{ctg} [90 - (\frac{\alpha + \rho + \rho_0}{2})] \sin [90 - (\frac{\alpha - \rho - \rho_0}{2})]}{\sigma_{cm} \sin \alpha \sin [90 - (\frac{\alpha + \rho + \rho_0}{2})]}, \quad (11)$$

где  $\rho, \rho_0$  – соответственно, угол внутреннего и внешнего трения.

Важной характеристикой при исследовании динамики рыхлителя с аккумулятором энергии является частота вынужденных колебаний рабочего органа, для определения которой можно воспользоваться выражением (11). Тогда

$$p = \frac{2\pi V_n}{l_{cmp}} = \frac{2\pi V_n \sigma_{cm} \sin \alpha \cos(\frac{\alpha + \rho + \rho_0}{2})}{h \tau_{cp}^n \operatorname{ctg} [90 - (\frac{\alpha + \rho + \rho_0}{2})] \cos(\frac{\alpha - \rho - \rho_0}{2})}, \quad (12)$$

где  $V_n$  – скорость подачи рабочего органа, м/с.

Учитывая, что на размер скалываемого грунтового элемента оказывают влияние жесткость упругой связи и скорость подачи рабочего органа, выражение (12) примет следующий вид:

$$p = \frac{2\pi V_n}{l_{cmp}} = \frac{2\pi V_n \sigma_{cm} \sin \alpha \cos(\frac{\alpha + \rho + \rho_0}{2}) K_v K_c}{h \tau_{cp}^n \operatorname{ctg} [90 - (\frac{\alpha + \rho + \rho_0}{2})] \cos(\frac{\alpha - \rho - \rho_0}{2})}. \quad (13)$$

Значения коэффициентов  $K_v$  и  $K_c$ , входящих в выражение (13), определялись опытным путем.

### Литература

1. Геллер Ю.А. Анализ причин, влияющих на динамическое нагружение рыхлительного оборудования, и поиск резервов, обеспечивающих эффективное разрушение грунта // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. Вып.4 (28). С. 57-64.
2. Способ механической разработки грунтов: заявка 2008116379, Рос. Федерация. №200811637; заявл. 05.11. 2008. опубл. 27.10.2009, Бюл. № 30; приоритет 05.11.08. - 10с: ил.
3. Рыхлитель: а.с. 815169, СССР. № 2727234/29-03; заявл. 22.02.79; опубл. 23.03.81, Бюл. № 11.2с.
4. Рыхлитель: а.с. 939672, СССР. № 3222893/29-03; заявл.24.12.80; опубл. 30.06.82, Бюл. № 24.-3 с.
5. Рыхлитель для разработки мерзлых и прочных грунтов: а.с. 994650, СССР. № 2892665/29-03; заявл.07.03.80; опубл.07.02.83, Бюл. № 5.4с.
6. Рыхлитель: а.с. 1016445, СССР. №3399226/29-03; заявл.24.02.82; опубл. 07.05.83.- Бюл. № 17. 4с.
7. Рыхлитель: пат. 1176944, СССР. № 3709935/29-03; заявл. 02.01.84; опубл. 07.09.85. - Бюл. № 33.4 с.
8. Рыхлитель с пружинным аккумулятором энергии двухстороннего действия: заявка 2010146238, Рос. Федерация. №2010146238; заявл.12.11. 2010; приоритет от 12.11. 2010.
9. Кузнецов В.Д. Физика твердого тела. Томск: Красное Знамя, 1944. Т.3. 742 с.
10. Станевский В.П. О зависимости энергоемкости процесса разрушении грунта от скорости резания // Горные, строительные и дорожные машины. 1966. Вып.6. С.21-26.
11. Баловнев В.И. Интенсификация земляных работ в дорожном строительстве. В.И. Баловнев, Л.А. Хмара. М.: Транспорт, 1983. 183 с.

12. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. М.: Машиностроение, 1968. 375 с.

13. Цитович Н.А. Механика грунтов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. школа, 1963. 247 с.

14. Ветров Ю.А., Станевский В.П. Исследование фактора скорости резания грунтов // Горные, строительные и дорожные машины. 1969. № 8. С.21-26.

УДК 621.752

А.А. Ахмадеева, В.Е. Гозбенко\*

## РАЦИОНАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ ЧИСЛА СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГРУЗОВОГО ВАГОНА

*В статье рассмотрена математическая модель вагона с двойным рессорным подвешиванием, имеющим шесть степеней свободы. Показано, что данную систему с достаточной точностью можно заменить системой с двумя степенями свободы.*

**Ключевые слова:** модель вагона, степень свободы, свободные колебания.

При построении моделей динамических систем желательно разрабатывать достаточно простые модели, которые адекватно учитывали бы динамические свойства системы, подлежащей исследованию. Простота модели определяется в большей мере числом степеней свободы.

Рассмотрим модель грузового вагона. В состав модели входит кузов вагона, опирающийся на две вагонные тележки, оснащенные двумя колесными парами каждая [2, 3]. Для исследования собственных колебаний вагонов с двойным рессорным подвешиванием принимаем расчетную схему грузового вагона, используемого при построении модели (рис. 1).

При выводе уравнений колебаний модели вагонов с двойным рессорным подвешиванием используются следующие обозначения:

$m_K, m_{T1}, m_{T2}$  – масса кузова и тележек соответственно;  $I_K, I_{T1}, I_{T2}$  – момент инерции кузова и тележек при галопировании соответственно;  $c_{11}, c_{12}$  – вертикальная жесткость центрального подвешивания тележки;  $c_{21}, c_{22}, c_{31}, c_{32}$  – вертикальная жесткость буксового подвешивания колесной пары;  $\beta_{11}, \beta_{12}$  – сопротивление демпферов центрального подвешивания первой и второй тележки;  $\beta_{21}, \beta_{22}, \beta_{31}, \beta_{32}$  – сопротивление демпферов комплектов буксового подвешивания колесной пары;  $z_K, z_{T1}, z_{T2}$  – текущие вертикаль-

ные перемещения центра тяжести соответственно кузова, первой и второй тележек;  $\varphi_K, \varphi_{T1}, \varphi_{T2}$  – текущие угловые перемещения кузова, первой и второй тележек соответственно;  $L_1 + L_2$  – база кузова.

Введем следующие допущения. Положим, что кузов, рамы тележек и колесные пары грузового вагона – твердые тела. Систему рассматриваем как консервативную, т. е. не принимаем во внимание сопротивления колебаниям.

Вагон движется по прямому ровному пути так, что плоскости симметрии пути и вагона совпадают. Радиусы кругов катания колес, катящихся без проскальзываний, одинаковы. Исследуем движение такой механической системы в продольной вертикальной плоскости, проходящей через центр масс.

При принятых допущениях конфигурацию системы можно определить при помощи шести независимых между собой величин, например, трех вертикальных перемещений  $z_K, z_{T1},$  и  $z_{T2}$  кузова и обрессоренных частей тележек; тремя углами  $\varphi_K, \varphi_{T1}, \varphi_{T2}$  поворота кузова и обрессоренных частей тележек относительно их главных центральных осей инерции, перпендикулярных продольной плоскости, в которой исследуется движение.

Составив кинетическую и потенциальную энергию и используя уравнения Лагранжа II

\* - автор, с которым следует вести переписку.