

УДК 622.23.05: 622.235; 621.867.522.2; 547.21: 541.67: 537.226:4

## ЧЕТЫРЕХПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТВЕРДОЙ ПОРОДЫ И СВОДООБРАЗОВАНИЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА ПРИ ДРОБЛЕНИИ УДАРНО-СКАЛЫВАЮЩИМ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ

© 2011 Л.С. Ушаков<sup>1</sup>, В.Г. Малинин<sup>1</sup>, В.А. Гордон<sup>1</sup>,  
А.В. Ковтунов<sup>2</sup>, О.П. Мулюкин<sup>2</sup>, А.В. Варламов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Орловский государственный технический университет

<sup>2</sup> Самарский государственный университет путей сообщения

Поступила в редакцию 17.07.2010

В рамках выполнения календарного плана работ договора №1-06 “О научно-техническом и педагогическом сотрудничестве ОрелГТУ и СамГУПС на 2006-2010 г.г.” представителями научных школ университетов проведена систематизация в единый блок результатов совместно выполненных модельных исследований в области динамики ударно-скалывающих исполнительных механизмов, используемых как для дробления твердых пород, так и устранения сводообразований в бункерах хранения и выпуска сыпучих материалов в емкости мобильных транспортных средств.

Ключевые слова: гидроударник; динамическая прочность; модельные исследования; жесткость; трение; демпфирование; схватывание; сыпучий материал; сводообразование.

К настоящему времени в научной школе ОрелГТУ успешно функционирует математический аппарат исследования динамики гидравлических машин ударного действия, предназначенных для дробления твердых пород и сводообразований сыпучих материалов (СМ) в бункерах их хранения и выпуска в емкости мобильных транспортных средств.

Общеизвестен факт, что применение в машинах гидравлического привода обеспечило разработку и создание компактных и мощных импульсных устройств в качестве исполнительных органов горных, металлургических, дорожных, коммунальных машин и другого технологического оборудования.

Такие устройства в настоящее время выполняются в виде гидроударников, гидромолотов, гидропневматических механизмов, — гидравли-

ческих устройств ударного действия, предназначенных для преобразования энергии потока рабочей среды в механический импульс. Современные гидроударники, в своем большинстве, содержат поршень-бойок, который под действием давления жидкости, подаваемой от внешней насосной установки, движется с ускорением в направлении рабочего инструмента, и наносит удар по его торцу. В момент удара энергия, накопленная поршнем-бойком в процессе разгона, формирует в инструменте импульс, который передается обрабатываемой минеральной среде. Для управления потоком рабочей среды, как правило, используется золотниковый распределитель, который работает синхронно с поршнем-бойком. Стабилизация выходных параметров (энергии и частоты ударов) и давления потока жидкости достигается использованием в гидроударнике гидропневмоаккумуляторов [1: рис. 3.1].

Эффективность силового воздействия породо-разрушающего инструмента на массив горной породы зависит от ряда факторов, в том числе способа передачи энергии удара и особенностей изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива. Изучение механизма формирования нестационарного поля напряжений в нагружаемом материале представляется важным для выбора силовых и энергетических параметров ударно-скалывающего исполнительного органа.

Как известно, при ударном приложении нагрузки в массиве происходит возбуждение волн напряжений, причем скорость смещения частицы за фронтом волны определяет динамическую составляющую напряжения [2]:

*Ушаков Леонид Семенович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой “Подъемно-транспортные, строительные и дорожные машины”.*

*E-mail: oushakov@mail.ru.*

*Малинин Владислав Георгиевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой “Динамика машин”. E-mail: malinin@mail.ru.*

*Гордон Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой “Высшая математика”. E-mail: Gordon@mail.ru.*

*Ковтунов Александр Владимирович, кандидат технических наук, профессор, ректор СамГУПС.*

*E-mail: rektorat@samiit.ru.*

*Мулюкин Олег Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой “Инженерная графика”. E-mail: om46@mail.ru.*

*Варламов Александр Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры “Железнодорожные станции и узлы”. E-mail: kafGSU@yandex.ru.*

$$\sigma = \rho \cdot c \cdot v, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – плотность среды;  $c$  – скорость фронта волны (фазовая скорость);  $v$  – скорость смещения частиц (массовая скорость).

Таким образом, измеряя скорость смещения частиц в определенной зоне массива, можно определить величину напряжений, создаваемых в породе, посредством чего устанавливать связь между параметрами волнового поля напряжений и ударной нагрузкой, вызвавшей его образование. Процесс разрушения горных пород ударной нагрузкой характеризуется влиянием на него большого числа факторов [3]. Отколу куска породы предшествует внедрение ударного инструмента в массив, сопровождающееся формированием его напряженного состояния. Напряженное состояние является функцией усилия, действующего на инструмент, геометрии забоя и его размеров, механических свойств породы и элементов ударной системы, геометрии и размеров инструмента. Вблизи режущей кромки инструмента в массиве реализуется состояние сжатия, вследствие чего образуется “ядро уплотнения”. За уплотненной зоной формируется зона растягивающих напряжений, при достаточных величинах которых появляется трещина, вызывающая перераспределение напряжений и растущая до критических размеров в процессе дальнейшего внедрения инструмента. При достижении критических размеров под действием нестационарного поля напряжений трещина растет в неустойчивом режиме до выхода на свободную поверхность, тем завершается единичный акт разрушения. Натурные исследования разрушения горных пород ударным исполнительным органом являются весьма трудоемким и дорогостоящим процессом, поэтому предпочтительными становятся модельные исследования, базирующиеся на методах теории подобия и моделирования. Извест-

ные исследования разрушения горных пород ударным инструментом [1] позволили выделить следующие схемы разрушения, как наиболее часто встречающиеся в практике горного производства (рис. 1). Схема “А” – разрушение с двумя выровненными или обнаженными плоскостями; “Б” – предусматривает повторное нагружение и разрушение породы, ведется в блокированных условиях; схема “В” (на рис. 1 не показана) – разрушение осуществляется в лоб забоя. Схемы рассмотрены в порядке ухудшения условий работы инструмента, т.е. с увеличением степени его блокированности.

Для первых двух схем разрушения характерным геометрическим параметром является толщина стружки  $h$  – расстояние от края образца до линии контакта его с инструментом, иначе говоря, расстояние до дополнительной плоскости обнажения.

В отличие от схем разрушения с двумя обнаженными поверхностями и повторного нагружения, для которых развитие процесса разрушения и его входные показатели в значительной степени определяются наличием дополнительных поверхностей обнажения, разрушение при воздействии ударного инструмента на полупространство характеризуется рядом отличительных особенностей. Поэтому модель процесса разрушения полупространства, не имеющего дополнительных поверхностей обнажения, должна обязательно учитывать структурно-механические особенности породного массива, в первую очередь, сплошность и неоднородность. Поэтому в [1] в качестве характерного геометрического параметра для разрушения полупространства принят размер элемента структурной неоднородности массива  $\lambda$ . Динамические характеристики горных пород – отношение акустических жесткостей материала промежуточного звена ( $\rho_2$  и  $c_2$ ) и породы ( $\rho_3$  и  $c_3$ ), напряжение  $\sigma_2$  в промежуточном звене, возникающее в результате удара по нему бойка, а также соотношение масс бойка  $m_1$  и промежуточного звена  $m_2$  – являются определяющими для исследуемой системы. Отделение некоторого куска породы от массива происходит в том случае, когда напряжение  $\sigma_3$  в массиве достигло некоторых критических значений. Следовательно, критическое значение напряжения  $\sigma_3$ , а также объем  $V_p$  отдельного куска, характеризующего размер области массива, в котором создано критическое напряжение, являются выходными параметрами исследуемой системы, т.е. показателями процесса разрушения. Так как известные экспериментальные методы измерения напряжений в массиве достаточно сложны, в качестве выходного параметра нами была принята величина объема разруше-

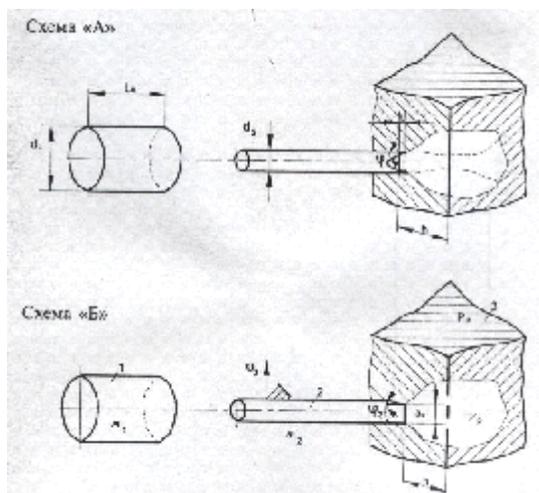


Рис. 1. Механическая модель ударной системы

ния породы  $V_p$ , являющаяся функцией всех остальных параметров процесса.

$$V_p = f[P_{кд}; a_2; h(\text{или } \lambda), \varphi_2; m_1, m_2; \rho_3 c_3 / \rho_2 c_2; \gamma_2; \gamma_3; E_2], (2)$$

где  $P_{кд}$  – показатель контактной динамической прочности пород;  $a_2$  – геометрический параметр массива породы;  $\varphi_2$  – угол заострения лезвия инструмента;  $\gamma_2$  и  $\gamma_3$  – объемный вес материала инструмента и породы, соответственно;  $E_2$  – модуль упругости стали.

В [1] при составлении уравнения процесса разрушения в безразмерной критериальной форме, пригодной для любых аналогичных ударных систем, а также с целью сокращения переменных в уравнении (2) использованы теоремы подобия и моделирования [4]:

- первая теорема о том, что подобные процессы должны иметь некоторые одинаковые сочетания параметров; использована в [1] при схематизации процесса разрушения установлением всех влияющих на него факторов и показателей, одинаковых для модели и природы с учетом масштабного фактора;

- вторая теорема, известная под названием р-теоремы, предопределяет, что “всякое уравнение, связывающее собой N физических величин, среди которых K величин обладают независимыми размерностями, может быть преобразовано в уравнение, связывающее (N-K) безразмерных комплексов и симплексов, составленных из этих величин. Причем безразмерные величины, найденные в соответствии с П-теоремой, являются критериями подобия между моделью и натурой.

С учетом вышеизложенного в [1] представлен алгоритм получения критериальных уравнений в виде исходных условий для проведения модельных исследований:

1. В уравнении (2) имеется 12 физических величин, характеризующих процесс разрушения, из которых в системе ЛТМ (длина – масса – время) можно выбрать три величины с независимой размерностью. В качестве таких величин приняты контактная динамическая твердость  $P_{кд}$ , толщина стружки  $h$  (при разрушении полупространства ширина лезвия  $a_2$ ), масса инструмента  $m_2$ . Их размерности в системе единиц ЛТМ будут следующими:

$$[P_{кд}] = [M][L]^{-1}[T]^{-2};$$

$$[h] \text{ или } [a_2] = [M]^0 [L][T]^0 = [L]; (3)$$

$$[m_2] = [M][L]^0 [T]^0 = [M].$$

Проверка независимости размерностей, принятых за основные величины, требует, чтобы определитель матрицы размерностей не был равен нулю.

$$D_{1-3} = \begin{vmatrix} 1 & -1 & -2 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} = 2 \neq 0. (4)$$

Следовательно, размерности величин  $P_{кд}$ ,  $h(a_2)$  и  $m_2$  являются независимыми.

2. В соответствии с р-теоремой (теория подобия и анализа размерности) уравнение процесса разрушения будет включать в себя 9 критериев подобия:

$$\pi_1 = f(\pi_2; \pi_3; \pi_4; \pi_5; \pi_6; \pi_7; \pi_8; \pi_9). (5)$$

Определение критериев подобия осуществляется в соответствии с выражением

$$\pi_1 = \frac{K_i}{[P_{кд}]^{\alpha_i} [h(\text{или } a_2)]^{\beta_i} [m_2]^{\gamma_i}}, (6)$$

где  $K_i$  – величины, входящие в уравнение (2);  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  – величины, показывающие какой показатель степени имеет та или иная размерность, входящая в критерий подобия.

3. Вывод критериальных уравнений процессов разрушения горных пород ударным инструментом проводится:

а) на базе использования предпосылки, что, не изменяя общего числа входящих в уравнение (2) величин, возможна замена любого критерия подобия его обратной величиной или критерием, составленным из заменяемого и любых остальных критериев:

Схемы “А” и “Б” – разрушение уступа массива с двумя свободными поверхностями и разрушение при повторном нагружении

$$\frac{V_p}{h^2 a_2} = f\left(\frac{\sigma_2}{P_{кд}}, \frac{a_2}{h}, \varphi_2, \frac{m_1}{m_2}, \frac{\rho_3 c_3}{\rho_2 c_2}, \gamma_2, \gamma_3, \frac{E_2}{P_{кд}}\right). (7)$$

Схема “В” – разрушение массива при воздействии инструмента на неограниченное полупространство

$$\frac{V_p}{a_2^3} = f\left(\frac{\sigma_2}{P_{кд}}, \frac{a_2}{h}, \varphi_2, \frac{m_1}{m_2}, \frac{\rho_3 c_3}{\rho_2 c_2}, \gamma_2, \gamma_3, \frac{E_2}{P_{кд}}\right). (8)$$

б) окончательные критериальные уравнения разрушения горных пород при пренебрежении влиянием, оказываемым на процесс разрушения массой забоя, что позволяет исключить из уравнений (7) и (8) критерии подобия, учитывающие этот фактор, и с учетом, что исследованию подвергаются образцы одного и того же вида породы с использованием промежуточных звеньев, изготовленных из одного материала (стали), что

обусловило  $\frac{\rho_3 c_3}{\rho_2 c_2} = const, \quad \gamma_2 = const,$

$\gamma_3 = const, \frac{E_2}{P_{кд}} = const$ );

– для схем “А” и “Б”

$$\frac{V_p}{h^2 a_2} = f\left(\frac{\sigma_2}{P_{кд}}, \frac{a_2}{h}, \varphi_2, \frac{m_1}{m_2}\right); \quad (9)$$

– для схемы “В”

$$\frac{V_p}{a_2^3} = f\left(\frac{\sigma_2}{P_{кд}}, \frac{a_2}{\lambda}, \varphi_2, \frac{m_1}{m_2}\right). \quad (10)$$

Общеизвестно, что энергия удара оценивается кинетической энергией бойка в момент его соударения с рабочим инструментом, которая определяется по формуле:

$$A_{уд.} = \frac{m_б \cdot V^2}{2},$$

где  $m_б$  – масса бойка;  $V$  – скорость бойка в момент удара.

Мощность гидроударника определяется по формуле:

$$N_{уд.} = A_{уд.} \cdot n,$$

где  $n$  – частота ударов в секунду.

Следует отметить, что в [1] отмечается, что до настоящего времени разработчиками гидроударников не найдено однозначного подхода к определению частоты и энергии удара, что предопределяет необходимость проведения комплексных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по обоснованию рациональных параметров разрушения минеральных сред с различными физико-механическими и химическими свойствами.

С определенными предпосылками (наличие в твердой породе макро- и микротрещин, пустот и рыхлот, а также инородных посторонних вклю-

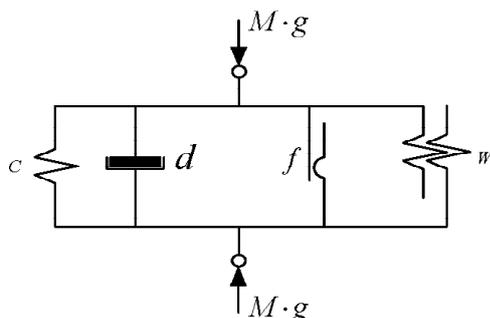


Рис. 2. Четырехпараметрическая гравитационная модель сыпучего материала замкнутого объема

чений) можно полагать, что процессы разрушения как твердых пород, так и сводообразований сыпучих материалов описываются в рамках единой динамической системы, базирующейся на четырехпараметрической гравитационной модели сыпучего материала замкнутого объема, разработанной научной школой СамГУПС (рис. 2).

Данная модель включает четыре взаимосвязанных параметра (в параллельном или последовательном соединении, – по аналогии с моделями Кельвина или Зенера), характеризующих свойства отдельных частиц (слоев) контактируемых массивов сыпучего материала: жесткость  $c$ , коэффициент демпфирования  $d$ , коэффициент трения  $f$  и коэффициент схватывания  $w$ , величины которых обусловлены характером изменения гравитационной силы  $Mg$  и условиями эксплуатации [5, 6]. Применительно к модели на рис. 2 упрощенное уравнение расхода СМ из бункера при допущении постоянства гравитационной силы  $M \cdot g$ , где  $M$  – масса СМ в полностью загруженном бункере,  $g$  – ускорение свободного падения (случай непрерывного пополнения бункера сыпучим материалом при периодических его отборах в раздаточную емкость, – бункер “неограниченного объема”), – может быть записано в виде [6, 7]:

$$M \cdot g + F_c + F_d - F_f - F_w = 0, \quad (11)$$

где  $F_c, F_d, F_f, F_w$  – соответственно, обобщенные силы упругости, демпфирования, трения и схватывания отдельных соприкасающихся частиц или слоев истекающего СМ.

Знак “минус” у параметров  $F_f$  и  $F_w$  обусловлен негативным влиянием роста их величин на возможность возникновения сводообразования (СО) сыпучего материала.

Представим (11) в виде:

$$F_w = M \cdot g + N, \quad (12)$$

введя обозначение  $N = F_c + F_d - F_f$ .

Из (12) вытекают следующие граничные условия:

а) гравитационный процесс истечения СМ непрерывен:

$$F_w < (M \cdot g + N), \quad (13)$$

б) гравитационное истечение СМ прекращается ввиду возникновения СО:

$$F_w \geq (M \cdot g + N).$$

Не останавливаясь на количественных характеристиках отдельных составляющих комплексного слагаемого  $N$  (подробно охарактеризованных в [8]), представим развернутую характеристику параметра  $F_w = f(p_k)$ ,  $p_k$  – текущее контактное давление в СМ, изменяемое с течением времени,  $H/m^2$ .

Для характеристики величины силы схватывания  $F_w$  проведем анализ изменения параметра

ров сыпучего материала в бункерном устройстве, воспользовавшись уравнением Сванте Аррениуса, характеризующим изменение контактного давления между отдельными частицами (слоями и массивами) СМ в зависимости от времени эксплуатации  $\tau$  [9]:

$$\left. \begin{aligned} p_k &= p_{k_0} \cdot e^{w\tau} \\ w &= A \cdot e^{-\frac{U_a}{kT}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где  $p_{k_0}$  – исходное контактное давление в СМ на момент заполнения бункерного устройства,  $H/m^2$ ;  $w$  – коэффициент схватывания (константа скорости слипания или старения, характеризующая уменьшением упругих свойств отдельных частиц или слоев СМ);  $A = 1,1 \dots 1,2$  – коэффициент усадки СМ, определяемый его физико-механическими свойствами;  $U_a$  – энергия активации слипания частиц и слоев СМ,  $ккал/моль$ ;  $k$  – обобщенный коэффициент, зависящий от физико-химических и механических свойств СМ ( $5,09 Дж/К$ );  $T$  – температура  $K$  окружающей

среды;  $\tau = \frac{t_{эксн.}}{t_0}$ , здесь  $t_0$  – регламентируемое

ГОСТ, ОСТ или другим нормативным документом время нахождения СМ в бункере до начала выпуска;  $t_{эксн.}$  – фактическое время нахождения СМ в бункере до начала выпуска.

Введем ряд пояснений по расчету составляющих выражения (14).

Кинетика слипания и соответствующие эффекты усадки в значительной мере определяются скоростями удаления из отдельных объемов (массивов) сыпучего материала газовой фазы. На первой стадии (активная усадка) при вязком течении число пор резко уменьшается с выходом их из центра в периферийные участки СМ. Скорость уплотнения СМ определяется размерами частиц, поверхностным натяжением и вязкостью жидкой (желеобразной) фазы. На второй и третьей стадиях основной механизм слипания (спекания) определяется диффузией газовой фазы в пределах кристаллита и реакциями на границах твердой, жидкой и газовой фаз [10].

При этом следует учитывать, что гранулированные и мелкодисперсные сыпучие материалы с течением времени теряют упругие свойства, что обуславливает интенсификацию возникающих в них адгезионно-схватывающих связей.

Также очевидно, что качественное решение выражения (13) требует проведения дополнительных исследований по определению энергии  $U_a$  для различных видов СМ (в частности, по данным [9] для гранул на базе полимерных материалов значение этой энергии составляет

$0,5 \dots 5 ккал/моль$ , для гранул на базе синтетических каучуков порядка  $14 \dots 20 ккал/моль$ ).

Ориентировочный расчет исходного контактного давления  $p_{k_0}$  (см. рис. 3) ведется с учетом пренебрежения составляющими членами  $F_c, F_d, F_f$  выражения (11), много меньшими гравитационной силы  $M \cdot g$ , и принятия приведенной площади  $S_{np}$  в виде параболической поверхности [7].

С учетом принятых допущений исходное значение параметра  $p_{k_0}$  определяется из соотношения:

$$p_{k_0} = \frac{M \cdot g}{S_{np}}, [H/m^2], \quad (15)$$

где  $M \cdot g$  – гравитационная нагрузка на СМ до начала его истечения из бункера.

Пренебрежение значением комплексного слагаемого  $N$  в выражении (12) позволяет по найденной из зависимости (15) величине текущего значения  $p_{k_0}$  в конкретный момент времени перейти к ориентировочной оценке обобщенной силы схватывания  $F_w$  по упрощенной зависимости:

$$F_w = p_k \cdot S_{св} = p_{k_0} \cdot e^{w\tau} \cdot S_{св}, \quad (16)$$

где  $S_{св}$  – площадь поверхности свода,  $m^2$  (см. рис. 3).

К настоящему времени все взаимосвязи параметра  $w$  с физико-механическими свойствами СМ и внешними механическими и климатическими эксплуатационными нагрузками не выявлены, причем из ориентировочных расчетов следует, что для крупногабаритных цилиндрических бункеров с конусообразным выпускным каналом для СМ на базе гранул из полимерных материалов значение параметра  $w$  колеблется в пределах  $0,12 - 0,25$  для  $M=10 \dots 15 т$ ;  $T=213 \dots 333K$ ;  $S_{св} = 30 м^2$ ;  $H=10 м$ ;  $D=5 м$  при нахождении СМ в бункере от 5 до 10 суток. Материал – гранулированный полистирол с плотностью  $\rho = 2,4 г/см^3$ .

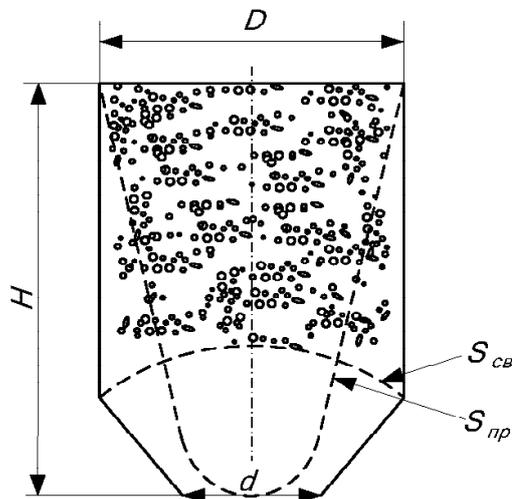


Рис. 3. К расчету параметров  $S_{np}$  и  $S_{св}$

Ряд рекомендаций по расчету случая истечения СМ из бункера при переменной гравитационной силе с отсутствием пополнения бункера сыпучим материалом при периодических его выпусках (вплоть до полного опорожнения бункера) представлен в [11].

### ВЫВОДЫ

Систематизированные результаты модельных исследований, выполненных научными школами ОрелГТУ и СамГУПС, позволяют сделать следующие выводы:

1. Охарактеризованы особенности разработанного в ОрелГТУ математического аппарата исследования динамики гидравлических машин ударного действия, предназначенных для дробления твердых тел и сводообразований сыпучих материалов; обоснована необходимость проведения комплексных научных исследований по рациональному выбору параметров разрушения минеральных сред с различными физико-механическими и химическими свойствами.

2. Показано, что с определенными предпосылками можно полагать, что процессы разрушения как твердых пород, так и сводообразований сыпучих материалов описываются в рамках единой динамической системы, базирующейся на четырехпараметрической гравитационной модели сыпучего материала замкнутого объема.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гидравлические машины ударного действия: Монография / Л.С. Ушаков, Ю.Е. Котылев, В.А. Кравченко. М.: Машиностроение, 2000. 416с.
2. Тимошенко С.П., Гульдер Д.Ж. Теория упругости: Монография. М.: Наука, 1975. 576 с.
3. Барон Л.И. Проблемы оценки сопротивления горных пород разрушению механическими способами // Сб.: Сопротивляемость горных пород разрушению при добычании. М.: Изд-во АН СССР, 1962. С. 6-22.
4. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике: Монография. М.: Наука, 1977. 440с.
5. Варламов А.В. Исходные предпосылки к составлению динамической модели "сводообразование сыпучего материала бункерного устройства - сводообрушитель" // Вестник Самарского государственного университета. 2009. Вып. 5 (17). Т. 1.
6. Чегодаев Д.Е., Мулюкин О.П. Гидропневмотопливные агрегаты и их надежность : Монография. Куйбышев: Куйбышевское. кн. изд-во, 1990. 104 с.
7. Варламов А.В. Конструкция и динамика механизмов предотвращения и устранения сводообразований в бункерах хранения и выпуска сыпучих материалов: Монография. Самара : СамНЦ РАН, СамГУПС, 2010. 231с.
8. Чегодаев Д.Е., Мулюкин О.П. Элементы клапанных устройств авиационных агрегатов и их надежность: Учебное пособие. М. : МАИ, 1994. 208 с.
9. Кондаков Л.А. Уплотнения гидравлических систем : Монография. М. : Машиностроение, 1972. 240 с.
10. Панич А.Е., Левина Т.Г. Физика сегнетоэлектрической керамики : Учебное пособие по курсу "Физика и технология пьезокерамических материалов". Ростов-на-Дону : РГУ, 2002. 45 с.
11. Варламов А.В. Исследование динамических процессов истечения сыпучих материалов из бункерных устройств на базе их реологических моделей // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. 2009. Вып. 6 (18). Т. 2.

## FOUR-PARAMETRICAL DYNAMIC MODEL OF FIRM BREED AND ARCHING THE LOOSE MATERIAL, SUBJECTED TO CRUSHING BY THE WITH GREAT DISPATCH-CHOPPING OFF EXECUTIVE MECHANISM

© 2011 L.S. Ushakov<sup>1</sup>, V.G. Malinin<sup>1</sup>, V.A. Gordon<sup>1</sup>, A.V. Kovtunov<sup>2</sup>, O.P. Muljukin<sup>2</sup>, A.V. Varlamov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Oryol State Technical University

<sup>2</sup>Samara State University of Means of Communication

Within the limits of performance of a job schedule of the contract №1-06 "About scientific and technical and pedagogical cooperation of OrelGTU and SamGUPS for 2006-2010" representatives of schools of thought of universities spend ordering to the uniform block of results of in common executed modelling researches in the field of dynamics of the with great dispatch-chopping off executive mechanisms used as for crushing of firm breeds, and elimination arching in bunkers of storage and release of loose materials in capacities of mobile vehicles. Keywords: the hydrodrummer, dynamic durability, modelling researches, rigidity, a friction, damping, gripe, a loose material, arching.

Leonid Ushakov, Doctor of Technics, Professor, Head at the Hoisting-and-Transport, Building and Road Machines Department. E-mail: oushakov@mail.ru.

Vladislav Malinin, Doctor of Technics, Professor, Head at the Dynamics Of Machines Department. E-mail: malinin@mail.ru.

Vladimir Gordon, Doctor of Technics, Professor, Head at the Higher mathematics Department. E-mail: Gordon@mail.ru. Alexander Kovtunov, Candidate of Technics, Professor, Rector. E-mail: rektorat@samiit.ru.

Oleg Muljukin, Doctor of Technics, Professor, Head at the Engineering drawing Department. E-mail: om46@mail.ru.

Alexander Varlamov, Candidate of Technics, Associate Professor at the Railway Stations and Junctions Department. E-mail: kafGSU@yandex.ru.