

Л. В. Гордилов^{1,2}✉

Имитационная модель процесса отбойки породного слоя инструментом гидроударного устройства

¹ Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² Сибирский государственный университет водного транспорта,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: gor@misd.ru

Аннотация. Разработана имитационная модель процесса отбойки породного слоя инструментом гидравлического ударного устройства (ГУ). Модель ГУ позволяет устанавливать без ограничений его энергетические характеристики: энергию и частоту ударов. Процесс внедрения инструмента в породный массив после удара бойка и сообщения ему начальной скорости моделировали элементом с сухим трением, вследствие которого происходило его торможение и остановка. Процесс образования трещины и скола породы происходил после нескольких ударов и внедрения инструмента на заданную глубину. Вследствие этого после очередного удара происходило продвижение ГУ на глубину, в разы превышающую глубину после одного удара. В качестве примера приводятся теоретические осциллограммы координат корпуса, бойка и инструмента для разных параметров ГУ.

Ключевые слова: гидроударное устройство, корпус, боек, инструмент, породный слой, энергия и частота ударов

L. V. Gorodilov^{1,2}✉

Simulation model of the rock layer breaking with a hydraulic impact device tool

¹Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation

²Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: gor@misd.ru

Abstract. A simulation model of the rock layer stripping process using a hydraulic impact device (HD) has been developed. The HD model allows you to set its energy characteristics without restrictions: energy and frequency of impacts. The process of embedding the tool into the rock mass after the impact of the striker and informing it of the initial velocity was modeled by an element with dry friction, as a result of which it was tormented and stopped. The process of crack formation and rock chipping occurred after several impacts and the insertion of the tool to a predetermined depth. As a result, after the next impact, the HD advanced to a depth several times greater than the depth after one impact. As an example, the theoretical oscillograms of the coordinates of the body, striker and tool for different parameters of the hydraulic impact device are given.

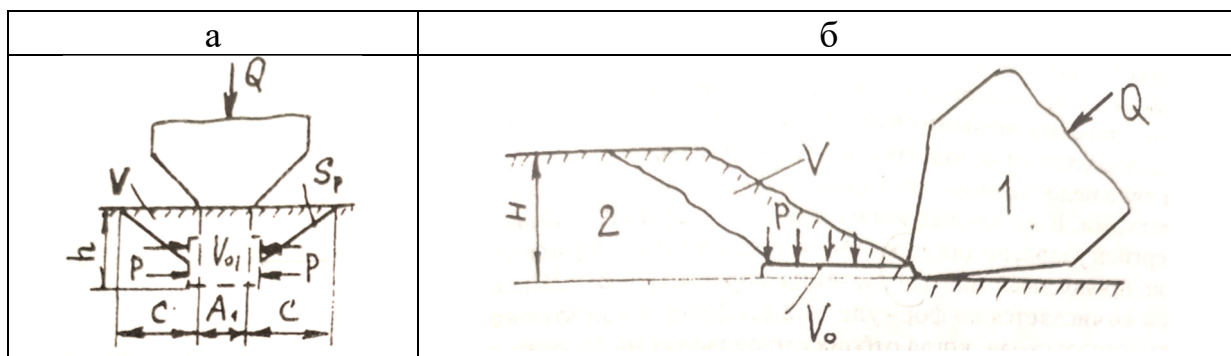
Keywords: hydrohammer, case, piston, tool, rock layer, energy and frequency of impacts

Введение

При работе навесного гидромолота или системы гидромолотов активного ковша экскаватора предполагается, что разрушение породы происходит по-

слоино [1]. При этом в случае реализации эффективной схемы отбойки происходит скол больших кусков породы после одного или нескольких актов ударного взаимодействия инструмента с породным массивом. Количество ударов до скола зависит как от физико-механических свойств породного массива и геометрии внедрения инструмента, так и от параметров гидроударного устройства (ГУ), действующей на него со стороны базовой машины внешней силы. Система, реализующая ударное воздействие на породный массив, включает следующую цепочку: базовая машина с маслостанцией – навесное оборудование с гидроцилиндрами – корпус ГУ – боек ГУ – инструмент ГУ – породный массив. Энергоноситель – жидкость – приводит в движение навесное оборудование с гидроцилиндрами и подает корпус с инструментом к забою, после поджатия инструмента к поверхности породы происходит подача жидкости к гидросистеме ГУ и начинается его циклическая работа с ударами бойка по инструменту и внедрению инструмента в породу. При работе корпус ударного устройства поджимается к инструменту внешней силой (гидроцилиндром), боек после каждого цикла производит удар по инструменту, инструмент разрушает породу и сдвигается в направлении массива, корпус должен тоже во время очередного цикла ГУ переместиться в направлении массива за инструментом, догнать его и прижать к массиву.

На рис. 1 представлены возможные схемы отбойки породы клиновидным ударным инструментом – долотом: «выкола» и «скола» [2]. При «выколе» долото направлено перпендикулярно поверхности и процесс разрушения породы происходит в наиболее неблагоприятных условиях: объем породы V_{01} под инструментом сжимается в направлении силы Q и расширяется в перпендикулярном направлении, при этом производится отбойка объема V (рис. 1а). При отбойке «сколом» инструмент устанавливается на новую поверхность, под некоторым углом к ней, при этом расстояние между старой и новой поверхностями составляет величину H . В массиве при ударе создается ядро уплотнения V_0 , внедрение долота в породу происходит под углом к поверхности, что создает благоприятные условия для трещинообразования и отбойки породы.



Q – энергия удара, V_{01} и V_0 – ядро уплотнения породы под инструментом, V – объем отбитой породы

Рис. 1 – Схемы отбойки породы ударом на «выкол» (а) и скол (б)

Рассматривая ударное разрушение и отбойку породного слоя массива как серию ударов, в [2] замечают, что «при одной и той же энергии удара Q отбойка может производиться как сколом, так и выколом в зависимости от расстояния H до второй поверхности (рис. 1б): максимальная эффективность скола достигается при оптимальной толщине стружки (слоя), а эффективность выкола от расстояния до свободной поверхности не зависит, поскольку граничные условия отбойки в этом случае сохраняются постоянными, поскольку отбойка ведется на одну и ту же поверхность. При уменьшении по сравнению с оптимальной эффективность отбойки уменьшается, при увеличении толщины стружки больше, чем оптимальная, эффективность отбойки также снижается и при некоторой толщине стружки (слоя) режим отбойки сколом переходит на выкол». Очевидно, что толщина отбиваемого слоя и режим разрушения зависит от угла, под которым инструмент внедряется в породу.

Таким образом процесс ударной отбойки зависит от параметров применяемого оборудования, свойств породного массива и условий взаимодействия ударной системы (боек-инструмент) оборудования с породным массивом. Для эффективного и оптимального применения ударного разрушения в каждом конкретном необходимо правильно подбирать параметры навесного оборудования базовой машины, параметры гидроударного устройства, параметры ударной системы в зависимости от свойств породного массива. Следует учитывать, что не всегда возможно и целесообразно выбирать параметры оборудования таким образом, чтобы откол происходил оптимальным образом: один удар под уступ и скол слоя породы.

В связи с этим представляется целесообразным изучение процесса послойной ударной отбойки, разработки имитационной модели, включающей базовую машину с навесным оборудованием, гидроударное устройство и систему «корпус ГУ – боек – инструмент – породный массив». Целью настоящей работы является начальный этап разработки такой имитационной модели.

Имитационная модель процесса ударной отбойки породного слоя гидроударным устройством

На рис. 2 представлена упрощенная расчетная схема процесса отбойки породного слоя, включающая базовую машину, гидроударное устройство (корпус и инструмент) и разрабатываемый забой. Рабочее оборудование (стрела, рукоять, цилиндры) исключены из рассмотрения и заменены силой F .

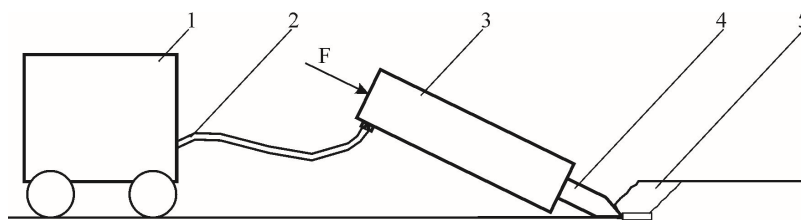


Рис. 2 – Расчетная схема процесса отбойки породного слоя гидроударным устройством. 1 – базовая машина с маслостанцией, 2 – рукава высокого давления, 3 – гидроударное устройство, 4 – инструмент, 5 - отбиваемая порода

На рис.3 представлена имитационная модель, построенная по представленной расчетной схеме, в которой выделены три устройства: маслостанция 1, гидросистема ГУ 2 и ударная система ГУ 3, элементы которых моделируются сосредоточенными параметрами.

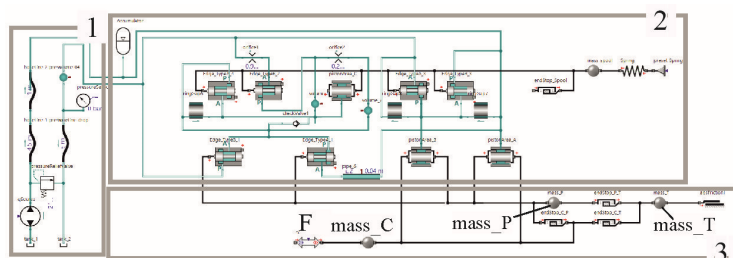


Рис. 3. Имитационная модель процесса отбойки породного слоя гидроударным устройством. 1 – маслостанцией, 2 – гидросистема ГУ, 3 – ударная система ГУ

Модель гидросистемы ГУ 2 описана в [3], она включает силовой цилиндр двухстороннего действия и золотниковый распределитель одностороннего действия с дроссельное управление, что позволяет изменять энергию удара E_I практически независимо от частоты, частоту ударов f при этом можно изменять величиной подаваемого к ГУ расхода.

Ударная система ГУ включает три массы: корпус $mass_C$, боек $mass_P$ и инструмент $mass_T$; $mass_C$ и $mass_P$ двигаются под действием сил, создаваемых жидкостью в гидроцилиндрах $pistonArea_A$ и $pistonArea_B$. На их движение накладываются ограничения, которые моделируются элементами $endStop_C_P$, $endStop_C_T$, $endStop_P_T$ и задают свободный ход масс относительно друг друга. Взаимодействие элементов между собой описывается уравнениями теории прямого центрального удара двух тел, скорость элементов после взаимодействия определяется коэффициента восстановления R .

Математическое описание разрушения породы при ее ударном взаимодействии с инструментом является сложной задачей, которая в принципе не решена до настоящего времени. Существуют некоторые гипотезы и теории, с помощью которых можно смоделировать этот процесс. Одна из них – энергетическая, в ней предполагается что количественные показатели разрушения (глубина и объем образуемой при ударе воронки) для каждой конкретной породы почти линейным образом зависят от энергии, сообщаемой инструменту. В этом случае динамику инструмента можно описать введением в его модель силы трения $F_{тр}$.

Так в опытах, проводившихся нами на блоке из мрамора [4] при схеме отбойки породы «выколом» установлено, что в достаточно широком диапазоне геометрических и динамических параметров бойка и клиновидного инструмента зависимость глубины внедрения инструмента h от энергии удара E_I определяется формулой

$$h \approx 2 \cdot 10^{-5} \cdot E_I, \text{ м.} \quad (1)$$

Таким образом, при действующей на инструмент силе трения, равной $5 \cdot 10^4$ Н и заданной скорости, он внедряется в породу при схеме отбойке «выколом» на глубину, определяемую формулой (1).

Второй этап отбойки заключается в определении условий, при которых происходит образование и отбойка крупных кусков – скол [2]. Этот этап требует дополнительного анализа и выходит за рамки текущего исследования. Поэтому мы здесь примем допущение, что откол происходит при внедрении инструмента в массив на величину, равную высоте уступа Н (рис. 1б), при этом происходит скол породы и новая поверхность смещается также на величину Н. В имитационной модели это вводится как отсутствие силы трения, тормозящей движение инструмента, на участках длиной Н после внедрения инструмента под действием силы трения также на участке длиной Н. Оговоримся, что предлагаемая схема в нашем случае не подтверждена количественно какими-либо экспериментальными или теоретическими исследованиями, но она физически кажется не противоречивой и во всяком случае может использоваться на начальном этапе тестирования имитационной модели.

Примеры расчета, их обсуждение

В расчетах принимали характеристики породы, соответствующие мрамору [4], силу трения на инструменте при внедрении «выколом» определяли из формулы (1). Глубину обрабатываемого уступа Н принимали равной 0.05 м.

Для иллюстрации работы имитационной модели были произведены расчеты рабочих циклов гидроударных устройств с параметрами, представленных в таблице. Расход, подаваемый к ударным устройствам не изменялся и был равен 20 л/мин. Площади бойка со сторон рабочих камер устройств подбирали таким образом, чтобы давления в них в течение работы было примерно одинаковым.

Таблица

Параметры гидроударного устройства

№№	Сила F, действующая на корпус, Н	Масса бойка mass_P, кг	Масса корпуса mass_C, кг	Масса инструмента mass_T, кг	Объем аккумулятора, л
1	5000	5	25	5	0.075
2	6000	10	50	10	0.150

На рис. 4, 5 представлены результаты расчетов: теоретические осциллограммы характеристик рабочих циклов: координат х механических элементов mass_T; mass_C и mass_P, давлений pGas в аккумуляторе Accumulator, скорости v бойка и инструмента.

Как следует из полученных результатов, в рамках принятой модели отбойки, увеличение массы бойка и пропорционально масс корпуса и инструмента, объема аккумулятора и силы, действующей на корпус, примерно на 20% повы-

шает эффективность (величину отбитого слоя) процесса. При этом снижается предупредная скорость и частота ударов.

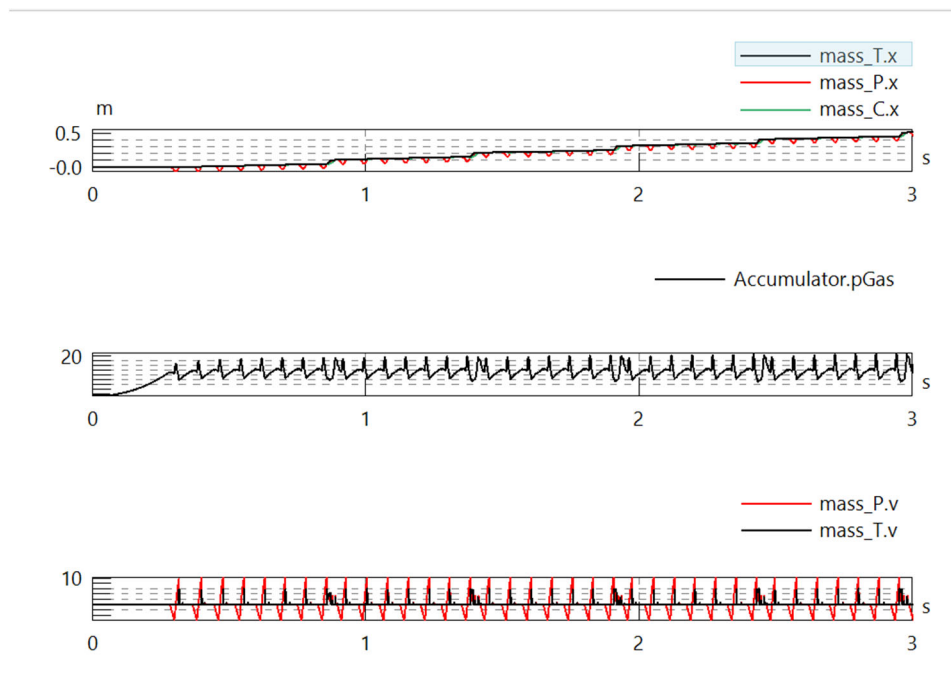


Рис. 4. - Теоретические осциллограммы характеристик рабочих циклов устройства 1: координат x элементов $mass_T$; $mass_C$ и $mass_P$, давлений p_{Gas} в аккумуляторе Accumulator, скорости v бойка и инструмента

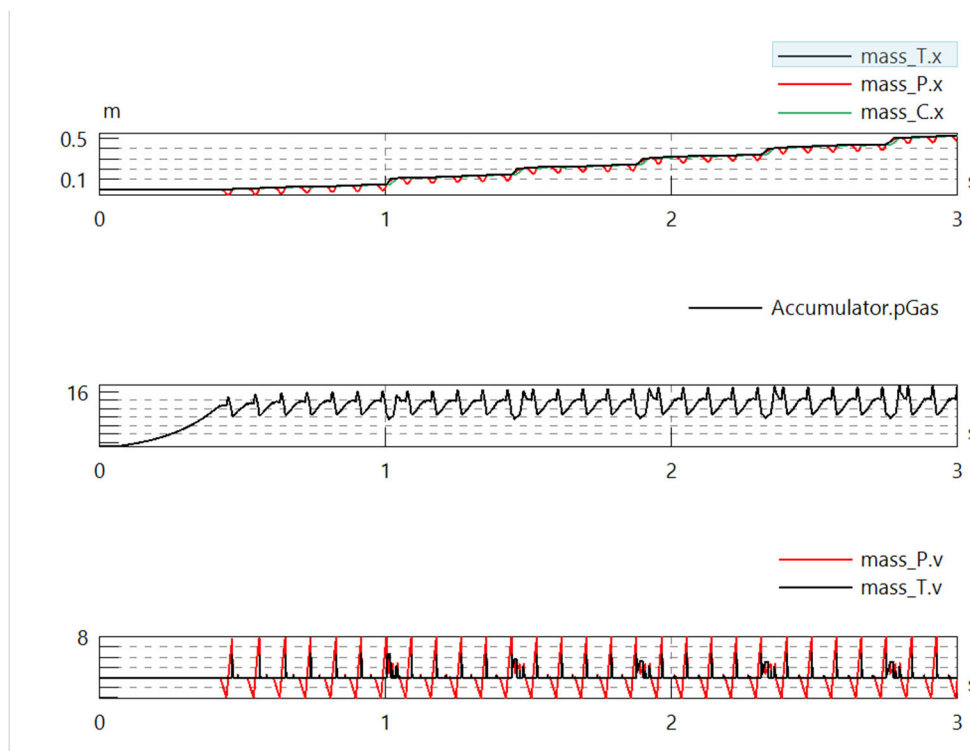


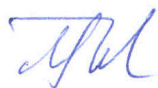
Рис. 5. - Теоретические осциллограммы характеристик рабочих циклов устройства 2

Заключение

Разработанная имитационная модель позволяет исследовать процесса отбойки породного слоя гидроударным устройством, изменять как параметры устройства и базовой машины, так и свойства породного массива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маттис, А. Р. Экскаваторы с ковшом активного действия : опыт создания, перспективы применения. – Новосибирск : Наука, Сиб. издат. фирма РАН, 1996. – 174 с.
2. Протасов, Ю. И. Разрушение горных пород. - Изд. 4-е, стер. - Москва: Горная кн. : Изд-во Московского гос. горного ун-та, 2009. - 453 с.
3. Gorodilov, L. V., Korovin, A. N., Kudryavtsev, V. G., Pershin, A. I. Structural Layout and Parameters of Hydroimpactors for End Effectors of Mining Machines // Journal of Mining Science, 2023, Vol. 59, No 1, pp. 82–90.
4. Городилов Л. В., Ефимов В. П., Кудрявцев В. Г.. Экспериментальное исследование разрушения мраморного блока при взаимодействии с ударной системой «боек-инструмент» // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. № 3, Т. 2, 2016, с. 44-50



© Л. В. Городилов, 2025