

УДК 622.232.72:622.26(088.8)

**С. А. Селивра**, канд. техн. наук, проф., **Т. А. Устименко**, канд. техн. наук, доцент  
Донецкий национальный технический университет, ДНР  
Тел.: +38 (066) 8526647; E-mail: [taus@rambler.ru](mailto:taus@rambler.ru)

## УДАРНО-СТРУЙНЫЙ СПОСОБ РАЗРУШЕНИЯ МАССИВА И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ

*Рассматриваются предпосылки эффективности комбинированного разрушения твердого массива с помощью механического удара и импульсной струи. Проведен анализ использования комбинированного метода, приведена структурная схема разрабатываемого устройства. На ее основе создана математическая модель, выбраны основные параметры конструкции. Приведена принципиальная схема, описан принцип действия для конструкторской реализации данного устройства.*

**Ключевые слова:** комбинированное разрушение, удар, импульсная струя, ударно-струйный механизм

**S. A. Selivra, T. A. Ustylenko**

### SHOCK-JET WAY OF DESTRUCTION OF A SOLID MASS AND ITS IMPLEMENTATION

*The preconditions for the efficiency of combined destruction of a solid mass by mechanical impact and a pulsed jet are considered. The analysis combined method using is carried out, the structural scheme of the developed device is given. On its basis, a mathematical model has been created, the main design parameters have been selected. A schematic diagram is presented, the principle of action for the design implementation of this device is described.*

**Keywords:** combined destruction, impact, pulsed jet, shock-jet mechanism

### 1. Введение

Разрушение массивов угля, горных пород, негабаритных кусков породы, асфальтовых покрытий, скальных пород, мерзлого грунта и выполнение других подобных операций является актуальным в угольной промышленности, строительстве, добычной промышленности, металлургии и других отраслях народного хозяйства. Поиск эффективных способов разрушения остается актуальной задачей уже долгое время. Традиционно используемые буровзрывной и механический (реализуемый резанием или ударом) способы разрушения широко используются на практике. Известны также гидравлические способы разрушения, использующие стационарные струи высокого давления и импульсные струи. Ведется научная разработка химических и электрофизических способов разрушения. Каждый из перечисленных способов имеет свои достоинства и недостатки. Для сравнительного анализа приведем основные данные по каждому из перечисленных комбинированных способов. Ниже в табл.1 приведен сравнительный анализ основных известных способов разрушения, указаны их достоинства и недостатки.

Идея объединения нескольких способов разрушения в одном устройстве уже нашла свое применение в некоторых видах комбинированных механизмов. Известны режущо-ударные комбинированные механизмы разрушения[1], которые объединяют преимущества двух способов и улучшают показатели производительности до 2-х раз.

Таблица 1. Основные способы разрушения массива

№	Способ разрушения	Достоинства	Недостатки
1.	Буровзрывной	Наименьшая удельная энергоёмкость, высокая производительность, способ универсален, не имеет ограничений по крепости пород	Сложность организации работ, сейсмичность. высокая стоимость, повышенная опасность, ухудшение экологической обстановки, необходимость дополнительного дробление негабаритов
2.	Механический (резание и ударное разрушение)	Резание ограничивается прочностью 40 МПа,  Ударное разрушение применяется для любых пород, наиболее приемлемо для хрупких пород, мгновенная передача энергии удара разрушаемому объекту	Повышенная энерговооруженность машин,  высокая масса ударных машин, шум, вибрация, возникающая при работе,  возможные утечки рабочей жидкости, загрязнение атмосферы парами масла при выхлопе
3.	Гидравлический, стационарной струей среднего давления	Искробезопасный способ разрушения массива	Необходимо погашение отраженной струи,  необходимо обеспечить отвод отработанной жидкости из забоя
4.	Гидравлический, импульсной струей высокого давления	Разрушение импульсной струей высокой энергии  Отсутствие отраженной струи Нет необходимости транспортировать отработанную жидкость	Наличие вибрации и шума, сложность конструкции генератора импульсных струй
5.	Другие (электрофизические, химические)	Перспективы немеханического разрушения	Ограниченная область применения

По данным [3] применение гидромеханического способа, заключающегося в одновременном воздействии на разрушаемый массив высокоскоростных струй воды и механического инструмента (резцов или дисковых шарошек), обеспечивает повышение производительности на 30 - 70% при пылеподавлении до 99%, расширение области применения на более крепкие и абразивные породы без увеличения массы комбайна.

На наш взгляд объединение механизма ударного действия с импульсным гидромонитором, генерирующим импульсную струю высокого давления позволит улучшить

экологические показатели работы установки, повысить производительность машины и не будет требовать средств осушения. Ударное разрушение применимо для пород любой крепости, и практически вся создаваемая энергия удара воздействует на забой, нарушая его структуру, способствует образованию трещин и сколов. Разрушение импульсными струями позволяет создавать перенос высокой энергии воздействия на забой при более низких энергетических показателях стационарного подводимого потока. Импульсная струя не обладает эффектом отражения, позволяет подавлять пыль в забое, и, в то же время, не нуждается в специальном отводе отработанной жидкости. Вопросы эффективности использования импульсных струй и создание высокопроизводительных импульсных гидромониторов отражены в [2]. Некоторые идеи объединения двух эффективных способов разрушения были предложены в Донецком НТУ [3,4,5]. Целью данной статьи является изучение рабочего процесса ударно-струйного механизма с помощью математического моделирования и выбор его конструктивных и рабочих параметров.

## 2. Математическая модель идеализированного ударно-струйного механизма

На рис. 1 приведена структурная схема механизма ударно-струйного разрушения.

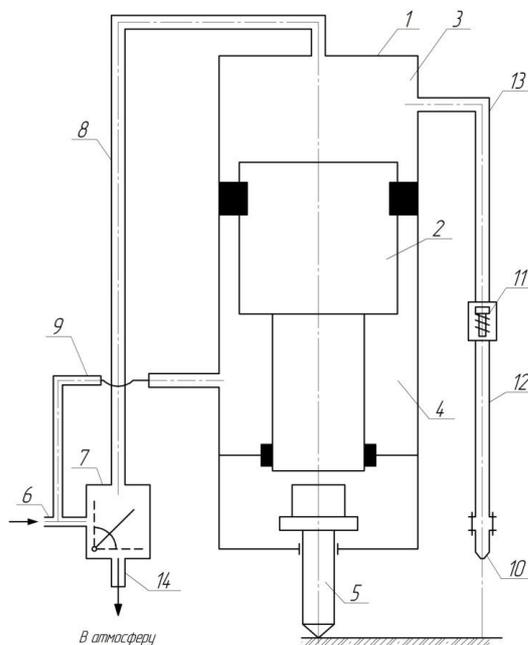


Рисунок 1. Принципиальная схема ударно-струйного механизма

Обозначения: 1 – корпус, 2-боек, 3 – камера прямого хода, 4 – камера обратного хода, 5 – рабочий инструмент, 6 – напорный трубопровод, 7 – распределительный узел, 8 – трубопровод задержки, 9 – переводная трубка, 10 – насадок, 11 – обратный клапан, 12, 13 – трубопроводы, 14 – патрубок сливной магистрали

Принцип работы ударно-струйного гидравлического устройства следующий.

В исходном положении распределительный узел 7 перекрывает доступ воды из напорной камеры в трубопровод 8. В таком положении трубопровод 8 элемента задержки связан со сбросным патрубком 14. По переводной трубке 9 вода из трубопровода 6 поступает в камеру обратного хода 4 и поршень-боек 2 перемещается вверх, совершая обратный ход, вытесняя воду из камеры прямого хода 3 по трубопроводу в в

атмосферу через распределительный узел 7 и патрубок 14. Переместившись в крайнее верхнее положение, поршень-боек 2 останавливается, и устройство готово к работе.

При включении распределительного узла 7 вода из трубопровода 6 начинает поступать в трубопровод 8 и далее в камеру прямого хода 3. Под действием давления воды со стороны камеры прямого хода поршень-боек 2 начинает перемещаться вниз, вытесняя воду из камеры обратного хода по переводной трубке 9 в трубопровод 6. В конце прямого хода поршень-боек 2 наносит удар по инструменту 5, что приводит к резкому его торможению и остановке. При движении поршня-бойка 2 вниз вода в трубопроводе 8 разгоняется до скорости, определяющейся произведением скорости движения поршня-бойка 2 на отношение площадей поршневой поверхности поршня-бойка 2 к сечению трубопровода 8. Таким образом, при правильном выборе этого отношения скорость движения воды в трубопроводе 8 может значительно превысить предупредную скорость.

Для создания конструкции ударно-струйного механизма, способного работать в автоколебательном режиме, необходимо разработать математическую модель, на основе которой произвести выбор основных параметров и выполнить дальнейшее проектирование. На рис.2 показана идеализированная схема ударно-струйного механизма, которая легла в основу разрабатываемой математической модели.

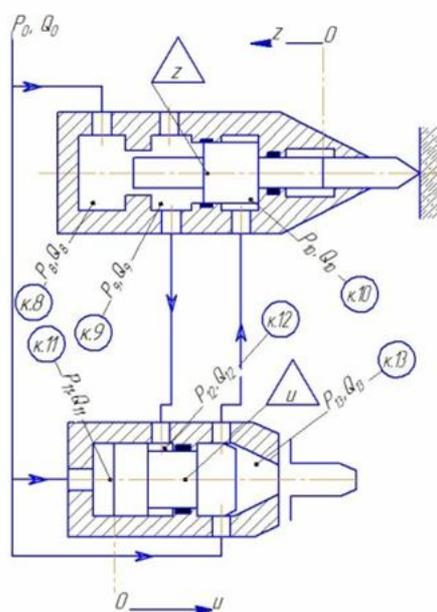


Рисунок 2. Идеализированная схема для построения математической модели.

На рисунке 2 показаны основные рабочие камеры, давление в которых на рабочие поверхности поршня ударника и поршня струйного монитора вызывает перемещение подвижных частей и механизм находится в автоколебательном режиме.

Основой математической модели являются обыкновенные дифференциальные уравнения движения поршней ударника и импульсного монитора:

$$m_z \ddot{z} = S_{10} P_{10} - S_9 P_9 - S_8 P_8$$

$$m_u \ddot{u} = S_{12} P_{12} - S_{13} P_{13} - S_{11} P_{11}$$

Где  $m_z, m_u$  - массы поршня бойка и поршня-клапана импульсного монитора,  $z, u$  - координаты их положения,  $S_8, S_9, S_{10}, S_{11}, S_{12}, S_{13}$  - рабочие поверхности порш-

ней в соответствующих камерах, показанных на рисунке 2,  $P_8, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{13}$  - давления жидкости в указанных камерах.

Выполнив гидравлические и алгебраические преобразования, обозначив давления через соотношения потерь относительно подводимого, и приняв следующие величины

$$A_u = \frac{1}{m_u} (-\rho g a_{12} S_{12}^2 - \rho g a_{13} S_{13}^2 - \rho g a_{11} S_{11}^2);$$

$$B_u =$$

$$C_u = \frac{P_0}{m_u} (S_{12} + S_{13}).$$

Здесь  $\rho$  - плотность воды,  $g$  - ускорение свободного падения,  $a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}$  - гидравлические сопротивления подводящих каналов к соответствующим камерам.

Получаем стандартную систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\ddot{z} = Az \cdot \dot{z}^2 + Bz \cdot \dot{u}^2 + Cz$$

$$\ddot{u} = Au \cdot \dot{u}^2 + Bu \cdot \dot{z}^2 + Cu$$

В результате расчетов, проведенных по разработанной математической модели, получены конструктивные и рабочие параметры, необходимые для проектирования детальной принципиальной схемы ударно-струйного механизма.

### 3. Основные параметры ударно-струйного механизма

По результатам математического моделирования идеализированной схемы получены следующие параметры :

Масса поршня-бойка 23,6 кг;

Рабочее давление 25МПа;

Максимальный ход поршня-бойка 0,022м.

Приведем все полученные конструктивные и рабочие параметры в таблице 2.

Таблица 2. Основные параметры

Параметр	Значение
Масса поршня - бойка	23,6кг
Масса поршня импульсатора	30кг
Ход поршня - бойка	0,022м
Рабочее давление	25МПа
Площадь камеры прямого хода гидроударника	0,0036м <sup>2</sup>
Площадь следящей камеры гидроударника	0,0013м <sup>2</sup>
Площадь камеры обратного хода гидроударника	0,004м <sup>2</sup>
Площадь камеры прямого хода импульсного гидромонитора	0,013м <sup>2</sup>
Площадь камеры обратного хода импульсного гидромонитора	0,0006м <sup>2</sup>
Площадь рабочей камеры импульсного	0,0036м <sup>2</sup>

гидромонитора	
Технические показатели	
Показатель	Значение
Скорость поршня - бойка	15м/с
Кинетическая энергия поршня - бойка	4кДж
Объем воды в выстреле импульсатора	0,000129м <sup>3</sup>
Максимальная частота импульсов	11Гц

**4. Анализ принципиальной схемы, положенной в основу реализации автоколебательного режима ударно-струйного механизма**

На основе полученных данных в качестве базовой системы для дальнейших исследований принята принципиальная схема, наиболее полно отвечающая требованиям комбинированного разрушения, изображенная на рис.3

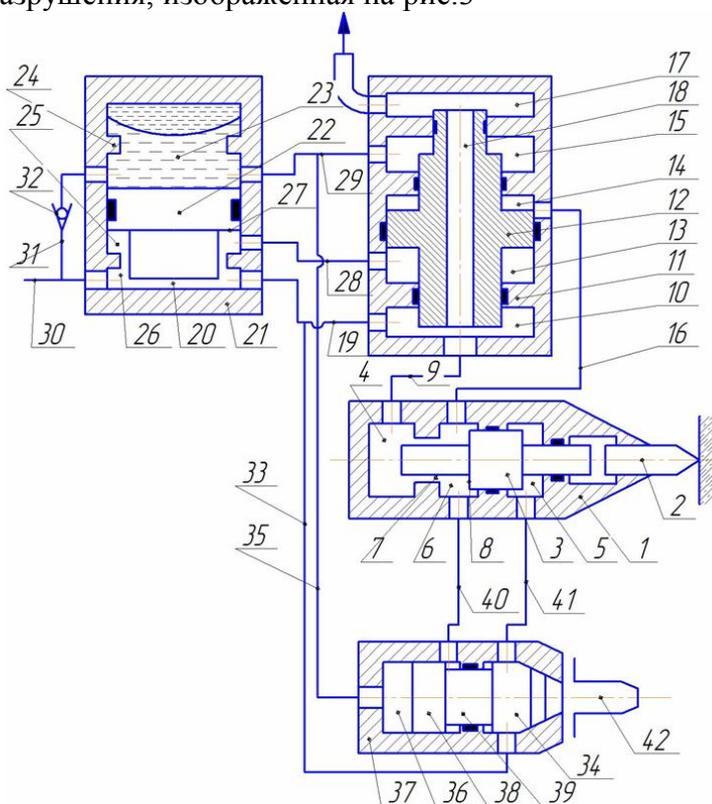


Рисунок 3. Принципиальная схема ударно-струйного механизма

Обозначения: 1- корпус, 2- инструмент, 3 – боек, 4- камера прямого хода, 5 – камера обратного хода, 6-следящая камера, 7 – соединительный канал, 8 – поршневая рабочая площадь бойка 3, 9 – соединительный канал, 10 – напорная камера распределительного устройства , 11 – корпус распределительного устройства, 12 – запорный канал, 13,14 – поршневые камеры, 15 – камера управления, 16 – соединительный канал, 17 – сбросная камера, 18 – сбросной канал, 19 – соединительный канал, 20 – камера подведения гидропневмоаккумулятора (ГПА), 21 – корпус ГПА, 22- поршень ГПА, 23 – поршневая камера, 24 – ограничитель, 25 – дополнительная камера, 26 – соединительный канал, 27 – рабочая поверхность поршня ГПА, 28, 29 – соединительные каналы, 30 - напорный трубопровод, 31, 32, 33 – соединительные каналы, 34 - поршень струйного монитора, 35 – соединительный канал, 36 – камера прямого хода гидромонитора, 37 –

корпус монитора, 38 – запорный клапан, 39 – камера обратного хода гидромонитора, 40,41 – соединительные каналы, 42 – рабочий насадок

Ударно-струйный механизм работает следующим образом. При подаче жидкости по трубопроводу 30 в камеру подвода 20 гидропневмоаккумулятора, она по каналам 31 и 32 поступает в поршневую камеру 23, по магистрали 19 в напорную камеру 33 и в рабочую камеру 34 гидромонитора. Под действием давления жидкости поршень 22 перемещается в корпусе вверх, сжимая газ в воздушной полости поршневой камеры, ограниченной эластичной диафрагмой. Жидкость с гидравлической полости поршневой камеры 23 по каналу 29 поступает в камеру управления 15, перемещая запорный канал 12 в нижнее положение, при котором доступ жидкости в камеру прямого хода 4 из напорной камеры 10 закрыт. Жидкость из камеры подведения 20 по каналу 33 поступает также в рабочую камеру гидромонитора 34, где через канал 41 поступает в камеру обратного хода 5. Под давлением жидкости боек 3 осуществляет обратный ход и занимает крайнее левое положение. При движении бойка в следящей камере 6 поддерживается высокое давление за счет дросселирования жидкости в канале 7 поршневой поверхностью бойка 8. Это высокое давление с помощью канала 16 передается в подпоршневую камеру 14. Жидкость из камеры прямого хода 4 по каналу 9 и сбросному каналу 18 запорного канала 12 поступает в сбросную камеру 17 и далее в атмосферу. При движении поршня 22 под действием давления жидкости со стороны камеры подведения 20 через канал 26 поступает в дополнительную камеру 25. Поскольку площадь поршневой поверхности 27 поршня 22 больше площади сечения канала 26, то давление в дополнительной камере 25 меньше давления потока жидкости. Это давление по каналу 28 передается в камеру управления 13. Таким образом запорный клапан 12 удерживается в нижнем положении за счет большего давления жидкости в камере управления 15. В конце обратного хода боек 3 остановится и давление в следящей камере 6 и, следовательно, в камере управления 14 становятся равными. В этом случае запорный клапан 12 удерживается под действием давления со стороны камеры управления 15, поскольку в ней давление значительно больше, чем в камере управления 13. После того, как поршень 22 достигнет ограничителя 24 и остановится, давление в дополнительной камере 25 станет равным подводимому, соответственно, возрастает давление и в подпоршневой камере управления 13. За счет разницы площадей запорного клапана 12 возникает равнодействующая сила, направленная вверх. Запорный клапан 12 перемещается в корпусе 11 и закрывает доступ жидкости из канала 18 в сбросную камеру 17. При этом жидкость из напорной камеры 10 начинает поступать по каналу 9 в камеру прямого хода 4. Боек 3 начинает двигаться в корпусе 1, осуществляя прямой ход. При этом давление в следящей камере 6 ниже, чем в камере 4, за счет дросселирования жидкости через канал 7. Поршень 22 под действием сжатого газа в воздушной полости поршневой камеры 23 перемещается вниз, поддерживая постоянное давление в магистрали 19 и камере прямого хода 4, а также рабочей камере гидромонитора 34. При этом за счет дросселирования жидкости через канал 26 давление в дополнительной камере 25 и, следовательно, камере управления 13 поддерживается высокое, благодаря чему запорный клапан 12 удерживается в верхнем положении. При движении бойка 3 жидкость из камеры обратного хода 5 вытесняется в рабочую камеру монитора 34, через канал 33, магистраль 19 и канал 9 в камеру прямого хода 4. В конце прямого хода боек 3 наносит удар по инструменту 2 и останавливается. Давление в следящей камере 6 и камере управления 14 становится равным подводимому. В результате этого запорный клапан 12 под действием сил со стороны камеры управления 15 перемещается вниз, закрывая

доступ жидкости в канал 9, и открывая сброс из камеры прямого хода 4 через сбросной канал 18 и сбросную камеру 17 в атмосферу. За счет того, что площадь сечения поршневого запорного клапана 38 со стороны рабочей камеры монитора 34 больше, чем со стороны камеры прямого хода монитора 36, поршневой запорный клапан 38 смещается, тем самым осуществляется импульсное истечение воды через насадок 42. Как только давление в рабочей камере 34 становится ниже, чем в камере прямого хода гидромонитора 36, истечение струи воды через насадок 42 прекращается и далее цикл повторяется [5]. Устройство введено в автоколебательный режим работы.

### 5. Выводы

Проанализированы основные типы комбинированных способов разрушения массива, установлены их достоинства и недостатки. Выделен один из наиболее перспективных – ударно-гидравлический с импульсной струей высокой энергии.

Рассмотрена идеализированная принципиальная схема, разработана ее математическая модель, выбраны основные конструктивные и рабочие параметры.

Дальнейшее математическое моделирование представленной детальной принципиальной схемы и описанного рабочего процесса позволит изучить область допустимых параметров, определить энергетические показатели и выполнить работы по оптимизации конструкции.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лабутин, В. И. Перспективы применения комбинированного способа разрушения горных пород / В. И. Лабутин, В. С. Марков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №12. – С. 325-333
2. Бойко, Н. Г. Определение рациональной частоты струи гидроимпульсной установки для проведения добычных работ / Н. Г. Бойко, В. С. Коломиец, О. А. Геммерлинг / Научные труды ДонНТУ, серия Горноэлектромеханическая, 2010. – Вып. 18(172). – С. 124-130
3. Мерзляков, В. Г. Опыт применения гидравлических струй высокого давления при создании эффективных средств разрушения горных пород / В. Г. Мерзляков, В. Е. Бафталовский, В. Н. Байдинов // Маркшейдерский вестник. – М., 2010. – №1 (январь-февраль) – С. 33-39.
4. А. с. 1286762 СССР, МКИ Е 21 С 3/20. Ударно-струйное гидравлическое устройство / Г. М. Тимошенко, С. А. Селивра, П. Ф. Зима, В. Г. Тимошенко, А. Ф. Яценко, В. И. Сикорский (СССР). – № 3868919/22–03; заявл. 14.03.85; опубл. 30.03.87, Бюллетень № 4. – 3 с.
5. А. с. 1452968 СССР, МКИЕ 21 С 2/20. Устройство ударного действия для механогидравлического разрушения горных пород / Г. М. Тимошенко, С. А. Селивра, А. Ф. Яценко, В. В. Гулин (СССР). – № 4187225/23–03; заявл. 28.01.87; опубл. 23.01.89, Бюллетень № 3. – 2 с.

Поступила в редколлегию 03.04.2017 г.