

УДК 622.232.32

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЙ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА

*Розглянуто основні принципи побудови системи автоматизованого проектування на базі структурного синтезу генераторів імпульсних струменів з набору різних конструктивних елементів з використанням їх математичних моделей. Правомірність такого підходу підтверджена порівняльним аналізом результатів імітаційного і натурного експериментів. Середнє розходження показників робочого процесу не перевищує 15 %, що є припустимим для подальших прикладних досліджень*

*Ключові слова: генератор, імпульсний струмінь, структурний синтез, елемент, математична модель, експеримент, адекватність, проектування*

*Рассмотрены принципы построения системы автоматизированного проектирования на базе структурного синтеза генераторов импульсных струй из набора различных конструктивных элементов с использованием их математических моделей. Правомерность такого подхода подтверждена сравнительным анализом результатов имитационного и натурного экспериментов. Средняя ошибка расхождения показателей рабочего процесса не превышает 15 %, что приемлемо для дальнейших прикладных исследований*

*Ключевые слова: генератор, импульсная струя, структурный синтез, элемент, математическая модель, эксперимент, адекватность, проектирование*

**В. В. Гулин**

Старший преподаватель\*

E-mail: vvg\_ua@mail.ru

**Т. А. Устименко**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: taus@rambler.ru

\*Кафедра энергомеханических систем

Донецкий национальный

технический университет

ул. Артема, 58, г. Донецк, Украина, 83000

## 1. Введение

Важной задачей современного машиностроения является поиск новых технологий и создание высокоэффективных машин в различных отраслях промышленности. Обеспечение выемки полезного ископаемого с ограниченным присутствием людей в забое, разрушение угля и пород, а также выполнение схожих операций по разрушению монолитов шлака, скального грунта, бетонных массивов является востребованной жизненной задачей. Одним из возможных подходов можно считать разработку исполнительных органов на основе генераторов импульсных струй воды высоких энергий.

Анализ и обобщение разрабатываемых в мировой практике установок, в состав которых входят генераторы импульсных струй, многообразие схемных и параметрических решений позволяет сделать вывод о целесообразности структурного синтеза подобных систем в виде системы автоматизированного проектирования.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Повышение безопасности работ при выемке тонких и весьма тонких крутых угольных пластов достигается при реализации технологии безлюдной выемки либо технологии с ограниченным присутствием рабочих в очистном забое [1].

Перспективным направлением в создании средств выемки для таких условий является применение вые-

мочных машин и агрегатов, использующих для разрушения массива струю воды [2].

Исследования в данной области проводятся уже длительное время, и их результатом стало выделение гидроотбойки угля в самостоятельную технологию [3], причем в различных странах мира [4], а также применение водяных струй для разрушения горных пород в горнорудной промышленности, монолитов шлаков в металлургии и теплоэнергетике, других массивов в различных отраслях [5].

Проблеме использования импульсных водяных струй для разрушения угля и горных пород посвящено большое количество исследований, которые направлены проводятся в Донецком национальном техническом университете. Благодаря им был создан перспективный способ [6] гидроимпульсного разрушения угля в условиях предприятий с традиционными технологиями [7] и накоплен значительный опыт в создании опытных образцов машин, предназначенных для использования в горной промышленности. Так, наиболее важными, на наш взгляд, являются разработки генераторов импульсных струй для нишевыемочной машины, машины по выемке весьма тонких пластов (такие пласты, как правило, не обрабатываются угольными комбайнами или обрабатываются отбойными молотками со значительными затратами ручного труда и опасностью для горнорабочих), машины для проходки скважин [8].

Предлагаемые на сегодняшний день для разрушения угля решения можно разделить на два направления.

Первое направление – создание средств выемки с использованием в максимальной степени апробиро-

ванных конструкций других, не связанных с гидродобычей, средств, либо разработка выемочных машин, объединяющих в исполнительном органе два способа воздействия на разрушаемый объект: механический и гидравлический. Взаимное дополнение друг друга позволяет получить повышение эффективности процесса разрушения [9]. Перспективным является использование комбинации водяной струи с энергией механического удара [10, 11]. Такие решения необходимы при разрушении относительно крепких пород.

Второе направление – создание средств выемки, использующих только энергию струи воды. Многочисленные исследования, выполненные как у нас в стране, так и за рубежом, позволили выявить основные механизмы взаимодействия водяной струи с массивом [12], найти оптимальные параметры [13] и схемы разрушения [14]. В большинстве случаев используются стационарные струи различного давления и мощности. Требуемые параметры струи определяются свойствами разрушаемого массива и принятой технологической схемой работ. Представителями этого направления в отработке крутых пластов являются подвесные гидромониторы со стационарной струей, тонкоструйные агрегаты, гидравлические скважинные агрегаты. Вместе с тем проявляется интерес и к пульсирующим или импульсным струям [15].

Из известных достоинств гидроотбойки, особенно значимых для рассматриваемых условий, можно отметить: во-первых, малые габариты и массу машин, простоту конструкции исполнительных органов, что позволяет обрабатывать весьма тонкие пласты; во-вторых, дистанционность выемки, которая позволяет организовать безлюдную выемку угля без крепления выработанного пространства в определенных горно-геологических условиях; в третьих, эргономические факторы: практически полное пылеподавление без дополнительных мер, повышение безопасности в результате уменьшения вероятности фрикционного искрообразования в забое; и, наконец, лучшая сортировка угля и отсутствие непосредственного взаимодействия выемочной машины с забоем, что позволяет резко уменьшить усилия в механизме перемещения.

Некоторые исследователи отмечают возможность использования импульсных струй для отработки выбросоопасных угольных пластов и пород с обеспечением безопасности технологического процесса [16].

Исследованиями разрушения угольного массива импульсной струей, проведенные в ДонНТУ [7], были уточнены и обоснованы выходные параметры генератора импульсов. Давление в импульсе, необходимое для эффективного разрушения массива, составляет  $(12...15) f_{Пр}$ , [МПа], где  $f_{Пр}$  – коэффициент крепости угля по шкале проф. М. М. Протодяконова. Рациональная длительность импульса – 10...20 мс, при диаметре насадка устройства 8...12 мм.

Струя с такими параметрами может быть сформирована несколькими способами, устройствами самых разнообразных типов и конструкций [8, 9].

По результатам сравнительного анализа различных устройств, способных формировать импульсы давления с заданными параметрами, предложен генератор на основе гидроимпульсатора – накопителя. При этом импульсная струя создается путем периодического накопления гидропневмоаккумулятором по-

тенциальной энергии малорасходного потока высокого давления с последующей разрядкой через рабочий насадок импульсным расходом, значительно превосходящим подводимый [8].

Такая выемочная машина обладает дополнительными преимуществами:

- высокая концентрация энергии (мощность потока до 500...700 кВт) и импульсный характер струи позволяют эффективно разрушать массив при сравнительно небольшой мощности, подводимой к устройству (порядка 50 кВт);
- эффективный механизм взаимодействия струи с разрушаемым массивом при выборе оптимального сочетания параметров, возможность отдельной выемки угольных пачек с дальнейшим саморазрушением пласта под действием собственного веса угля, горного давления и воздействия струи обеспечивает низкие общие энергозатраты на отбойку угля (0,5...1,5 кВт·ч/т);
- исполнительный орган позволяет оперативно изменять схему обработки забоя и параметры струи при изменяющихся характеристиках угольного пласта, а чрезвычайно малые габариты выемочной машины позволяют использовать ее в технологических схемах с минимальными обнажениями пород кровли.

### 3. Цель и задачи исследования

Анализ разработанных установок, в состав которых входят генераторы импульсных струй, многообразие схемных и параметрических решений позволяет выполнить обобщения, необходимые и целесообразные для структурного синтеза подобных систем. Поэтому ставится первая и основная задача структурного синтеза: подтвердить возможность создания САПР гидроимпульсных систем на базе генераторов импульсных струй.

Для достижения поставленной цели решаются следующие основные задачи:

- определение структуры гидроимпульсной системы, то есть ее основные звенья и их связи;
- создать «склад» или «хранилище элементов», из которых можно составлять структуру;
- математическое описание структурных элементов и их связей;
- проверка адекватности математических моделей экспериментальному материалу как обоснование дальнейших работ по проверке работоспособности синтезируемых схемных решений, их параметризации и оптимизации.

Все многообразие элементов, которые используются в генераторах импульсных струй, можно представить с помощью обобщенной структурной схемы, которая представлена на рис. 1.

В этой схеме источник гидравлических импульсов (распределитель) 1 осуществляет коммутацию потоков жидкости в различных режимах работы устройства. Гидравлический аккумулятор 2 накапливает и отдает энергию в определенные моменты цикла. Формирующий (передающе-ограничивающий элемент) 3 задает форму импульса и обеспечивает постоянство объема жидкости, подводимого к исполнительному

органу 4 в каждом выстреле. Кроме того, формирующий элемент 3 принимает участие в получении четкого входного сигнала для системы управления 6 на изменение состояния распределителя 3.

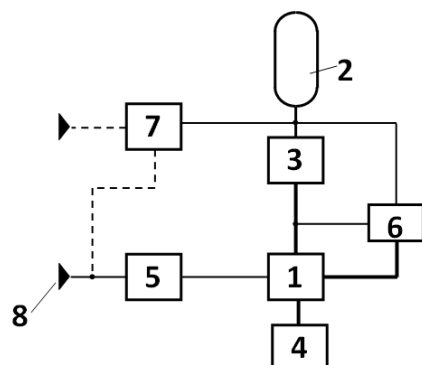


Рис. 1. Структурная схема генератора импульсных струй

Исполнительный орган 4 формирует струю и направляет ее в точку забоя или объекта, требуемую по схеме обработки.

Согласующий элемент 5 обеспечивает дискретное потребление воды генератором в процессе формирования импульсов с непрерывной подачей насосной установки, и, в частности: определяет рабочий режим питающего насоса, защищает подводящую магистраль от колебаний давления, обеспечивает создание сигнала для системы управления 6 распределителем 1.

Система управления 6 изменяет состояние распределителя 1 по заданной программе на основе сигналов о состоянии элементов и параметрах потока в узлах.

Устройство формирования режима 7 задает значения и осуществляет стабилизацию выходных параметров генератора (например, по амплитуде давления в импульсе), обеспечивает возможность их оперативного изменения.

Основным звеном системы является формирующий (передающее-ограничивающий элемент) 3, который существенным образом влияет на точность формирования заданных параметров импульсов и на производительность установки. Поэтому он может иметь ряд конструктивных решений и требует детального рассмотрения при структурном синтезе системы.

Типовая принципиальная схема генератора импульсных струй приведена на рис. 2.

Она состоит из основного гидропневмоаккумулятора (ГПА) 1, накопителя 2, исполнительного органа 3, управляющего клапана 4 и дополнительного ГПА 5. Поршень 6 основного ГПА 1 разделяет внутреннее пространство на две камеры: газовую 7 и жидкостную 8. Поршень 9 делит внутренний объем накопителя 2 на рабочую 10 и подпорную 11 камеры.

Исполнительный орган 3 состоит из плунжер-клапана 12 и ствола 13 с рабочим насадком 14. Плунжер-клапан 12 образует в сочетании с корпусом две камеры: заседельную 15 и управляющую 16. Внутри управляющего клапана 4 размещен поршень-клапан 18, образующий напорную 19, сбросную 20, закрыва-

ющую 21 и открывающую 22 камеры. В управляющем поршень-клапане 18 выполнен сквозной осевой канал 23. Герметизация камер управляющего клапана 4 осуществляется путем прижатия конических поверхностей наконечников к сбросному 24 или напорному 25 седлу. Кроме того, выполнением дополнительных полостей 26 и 27 обеспечивается раздельное, поочередное подсоединение управляющей камеры 16 к напорной 19 или сбросной 20 камере.

Рабочая жидкость, из подводящей магистрали 29 через дроссель 30 поступает в рабочую камеру 10 накопителя 2 и к исполнительному органу 3.

В местах сопряжения подвижных и неподвижных элементов устройства установлены уплотнения 34.

До запуска устройства в газовые камеры основного и балластного ГПА 1 нагнетается газ. Затем в жидкостную камеру 8 основного ГПА 1 и соединенные с ней подпорную камеру 11 накопителя 2, закрывающую камеру 21 управляющего клапана 4 нагнетается минеральное масло или водомасляная эмульсия. Поршень 9 накопителя 2 занимает крайнее нижнее положение (здесь и далее конечные положения и направления движения элементов устройства даны по чертежу), управляющий поршень-клапан 18 прижимается к сбросному седлу 24, соединяя управляющую камеру 16 с подводящей магистралью 29 через линию связи 33 и осевой канал 23.

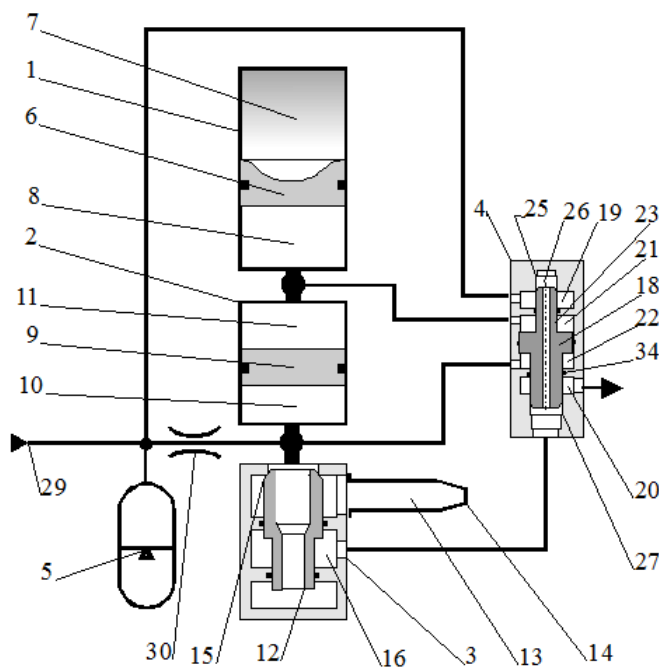


Рис. 2. Принципиальная гидравлическая схема генератора импульсных струй

При включении насоса рабочая жидкость по подводящей магистрали 29 поступает через управляющий клапан 4 в управляющую полость 16 плунжер-клапана 12. Вторая часть потока через дроссель 30 поступает в рабочую камеру 10 и через седло 17, ствол 13 и насадок 14 изливается в атмосферу. Устройство находится в пусковом режиме.

Данный режим очень непродолжителен. Так как давление в камерах плунжер-клапана 12 различно из-за падения давления на дросселе 30, плунжер-клапан 12 движется вверх до посадки на седло 17. После закрытия плунжер-клапана 12 давление в системе возрастает до давления предварительной заправки жидкости, и устройство переходит в режим накопления. Давление в рабочей камере 10 начинает несколько превышать давление заправки жидкости в подпорной камере 11 и поршень 9 накопителя 2 приходит в движение. При движении поршня 9 жидкость из подпорной камеры 11 вытесняется в жидкостную камеру 8 основного ГПА 1, поршень 6 которого также перемещается вверх, сжимая газ в газовой полости 7.

Режим накопления длится до достижения поршнем 9 верхнего положения и его остановки. При этом исчезает расход через дроссель 30, а поток, подводимый к устройству, принимается дополнительным ГПА 5. Давление в рабочей камере 10 увеличивается до величины подводимого и по линии связи 31 передается в открывающую камеру 22. Теперь усилие со стороны этой камеры превышает усилие со стороны закрывающей камеры 21 и управляющий поршень-клапан 18 начинает перемещаться вверх.

При перемещении наконечники поршня-клапана 18 последовательно изолируют управляющую камеру 16 от подвода и соединяют со сбросом. В конце хода поршень-клапан 18 садится на седло 25, надежно изолируя канал 23 и соединенные с ним полости от напорной камеры 19.

В результате сброса жидкости из управляющей камеры 16 плунжер-клапан 12 перемещается вниз, открывая доступ воде из рабочей камеры 10 накопителя 2 в камеру 15, ствол 13 и далее к рабочему насадку 14.

Поршень 9 накопителя 2 начинает двигаться вниз, вытесняя из рабочей камеры 10 жидкость через ствол 13 и рабочий насадок 14. Насадок 14 формирует струю, воздействующую на объект разрушения.

Устройство переведено в режим выстрела. Освобождающийся при движении поршня 9 в подпорной камере 11 объем заполняется жидкостью из полости 8 основного ГПА 1, который, обеспечивает в режиме выстрела повышенный, в сравнении с подводимым, расход через насадок 14.

К моменту окончания импульса, то есть к моменту прихода поршня 9 в нижнее положение, управляющий поршень-клапан 18 соединит управляющую камеру 16 с дополнительным ГПА 5. Она заполняется жидкостью из дополнительного ГПА 5. Плунжер-клапан 12 движется вверх и в конце хода прижимается к седлу 17, перекрывая доступ жидкости из рабочей камеры 10 в ствол 13.

Устройство вновь переведено в режим накопления. Поршень 9 начинает двигаться вверх. Цикл работы повторяется.

Аналогичный цикл работы можно осуществить, собрав подобную схему из конструктивно различных элементов. Разработан набор элементов, из которых можно синтезировать генератор импульсных струй в зависимости от требований, предъявляемых к машине. Ниже приведены принципиальные схемы струк-

турных звеньев, из которых может быть собрана схема. На рис. 3 приведены варианты формирующих (передающе-ограничивающих) звеньев с единичным коэффициентом мультипликации давления накопления.

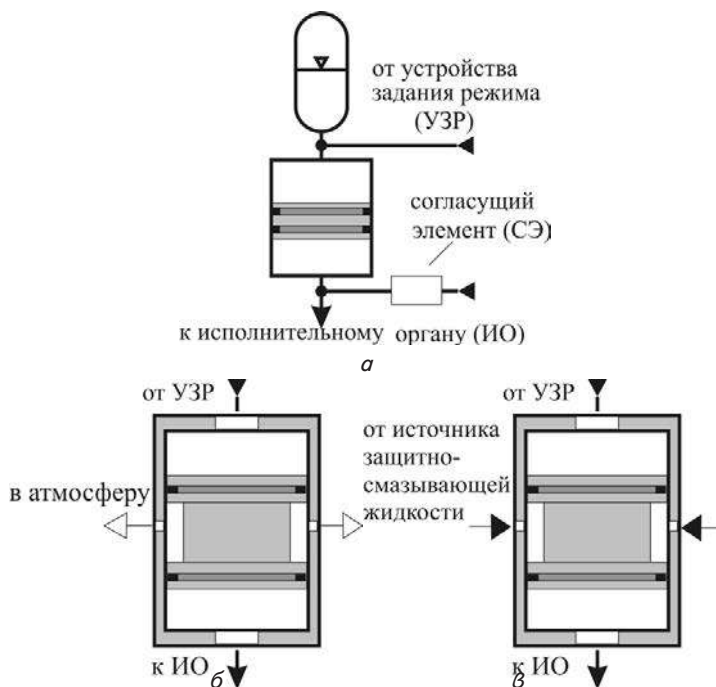


Рис. 3. Формирующие элементы с единичным коэффициентом мультипликации: а – без контроля исправности уплотнений; б – с контролем исправности уплотнений; в – с обеспечением защиты уплотнений

Устройства по схеме рис. 3 а-в наиболее просты по конструкции, обладают малыми массой и габаритными размерами, но обеспечивают формирование импульса только с давлением, практически равным подводимому и обязательно требуют наличия в схеме генератора специального устройства задания режима (УЗР).

При этом устройство по схеме рис. 3, а, обладая простотой реализации, не обеспечивает контроль исправности уплотнительных устройств и создает опасность изменения рабочего режима при их износе. Этот недостаток устранен в устройстве по рис. 3, б. А устройство по рис. 3, в обеспечивает контроль и защиту уплотнительных элементов подачи специальной жидкости.

На рис. 4 приведены схемы формирующих элементов обеспечивающих различные соотношения между давлением накопления и амплитуды импульса.

Это дает возможность в конкретных условиях наиболее полно использовать возможности питающей установки и соединительной линии при наличии жестких требований по габаритам установки.

Элементы, выполненные по схемам рис. 4, а, б не требуют специального устройства задания режима. Применение дифференциальных поршней позволяет иметь различные сочетания величин давления и объемов в рабочей камере и гидропневмоаккумуляторе (ГПА), что дает возможность оптимально согласовать параметры ГПА с требуемым давлением и объемом выстрела, добиваясь уменьшения размеров устройства.

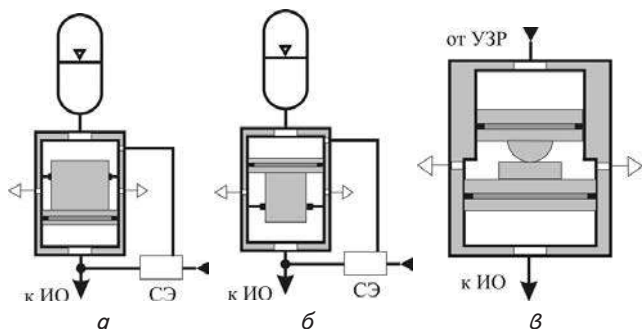


Рис. 4. Формирующие элементы с мультипликацией давления накопления: а – с повышенным давлением накопления; б – с пониженным давлением накопления; в – универсальный.

Универсальной реализацией устройств по схемам рис. 4 а, б, является конструктивное решение элементов с дифференциальным поршнем приведенное на рис. 4, в. Такое устройство может использоваться при различных вариантах подключения рабочих камер.

На рис. 5 приведены схемы формирующих устройств обеспечивающих формирование импульса с максимальным давлением выше подводимого.

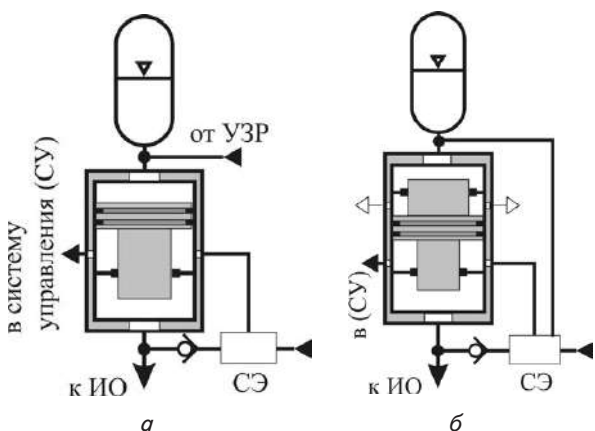


Рис. 5. Формирующие элементы с давлением в импульсе выше подводимого: а – без мультипликации давления накопления; б – с повышенным давлением накопления

Устройства, выполненные по схемам 5, а, б, рационально использовать в генераторах с ограниченной мощностью в импульсе при наличии высокоэффективного устройства задания режима.

На рис. 6 показано решение, позволяющее выполнить универсальный гидроударный модуль для разрушения угля и более крепких пород в условиях, например, подготовительного забоя.

Размещение генератора на специальном манипуляторе с возможностью дистанционного управления и оперативного (в течение нескольких минут) изменения режима работы с импульсной струи на механический удар, дает возможность создания эффективной машины для проведения выработок со смешанным забоем.

Структурные элементы системы, в том числе приведенные на рис. 3–6, имеют математическое описание одного из следующих типов:

– дифференциальные уравнения движения инерционных элементов (поршни, клапаны, плунжеры, элементы распределителей и т.п.):

$$m_i \ddot{\chi}_i = F_{ni} - F_{oi} - F_{три},$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -ого подвижного элемента;  $\chi(x, y, z)$  – координата положения соответствующего подвижного элемента системы;

– алгебраические соотношения, отражающие балансы расходов в узловых точках системы

$$\sum_{i=1}^k Q_{i,\gamma,вх} - \sum_{i=1}^n Q_{i,\gamma,исх} = 0,$$

где  $\sum_{i=1}^k Q_{i,\gamma,вх}$  – сумма всех поступающих в точку  $\gamma$ ,

$\sum_{i=1}^n Q_{i,\gamma,исх}$  – сумма всех истекающих из соответствующей точки  $\gamma$  расходов.

– соотношения между давлениями в рабочих камерах, рассчитываемые по известным формулам гидродинамики;

– функциональные зависимости переменных гидравлических сопротивлений, определяемые по выражению [17]

$$a_p(\chi) = \frac{\rho}{2\mu^2(\chi)\omega^2(\chi)},$$

где  $\rho$  – плотность воды;  $\mu(\chi)$  – переменный коэффициент расхода, зависящий от положения запорного элемента распределителя, по данным [18] может быть определен из выражения  $\mu(\chi) = 0,88 - 56\chi$  для конических клапанов в диапазоне изменения  $\chi$  от 0,1 до 15 мм, размерность  $[\chi]$  – м;  $\omega(\chi)$  – переменная площадь проходного сечения в проточной части распределителя, для конического клапана с углом конуса  $\alpha$

$$\omega(\chi) = \pi \cdot d_p^2 \cdot \chi \cdot \sin \alpha,$$

где  $d_p$  – диаметр канала седла распределителя;  $\chi$  – величина открытия (координата запорного элемента) распределителя;

– волновые уравнения, отображающие изменение давления и расхода при нестационарном движении жидкости в соединительных линиях:

$$\frac{\partial p(l_i; t)}{\partial l_i} = \frac{\rho}{S} \frac{\partial Q(l_i; t)}{\partial t} + J_i,$$

$$\frac{\partial p(l_i; t)}{\partial t} = -\frac{\rho c^2}{S} \frac{\partial Q(l_i; t)}{\partial l_i},$$

где  $i$  – номер рассматриваемой гидравлической линии (волновода);  $l_i$  – координата контрольного сечения  $i$ -го волновода;  $t$  – время;  $\rho$  – плотность рабочей жидкости;  $c$  – скорость распространения ударной волны;  $S_i$  – площадь поперечного сечения  $i$ -го волновода;  $p(l_i; t)$ ,  $Q(l_i; t)$  – соответственно, значения давления и расхода в контрольном сечении с координатой  $l_i$   $i$ -го волновода в момент времени  $t$ ;  $J_i$  – удельные гидравлические потери в  $i$ -ом волноводе, рассчитываемые по формуле:

$$J_i = \rho \frac{\lambda_i \cdot Q(l_i; t) \cdot |Q(l_i; t)|}{2S_i^2 \cdot d_i};$$

$d_i$  – внутренний диаметр  $i$ -го

волновода [19];  $\lambda_i$  – коэффициент гидравлического сопротивления для высоконапорных рукавов, определяемый по формуле [20]  $\lambda_i = \frac{0,01246}{d_i^{0,3}}$ .

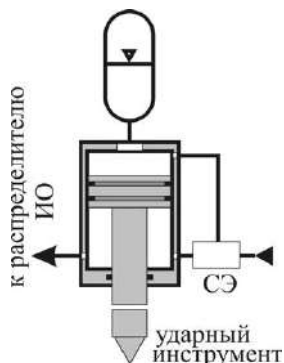


Рис. 6. Формирующий элемент комбинированного действия

На рис. 7 приведены основные звенья, соответствующие принципиальной схеме рис. 2, с обозначением осей координат основных подвижных элементов.

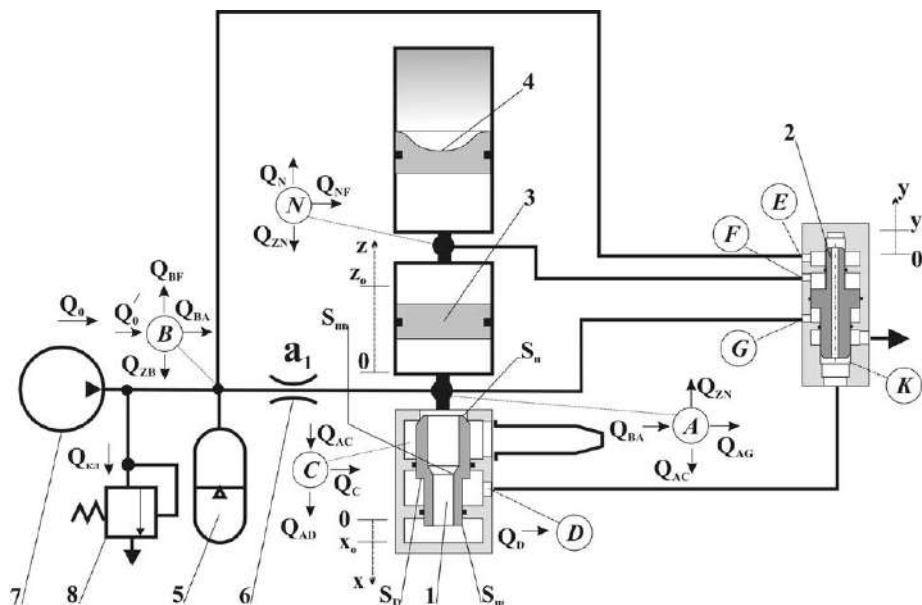


Рис. 7. Схема для построения математической модели

В соответствии с предложенной схемой математического описания, (рис. 7) модель представляется дифференциальными уравнения движения подвижных масс: поршня-клапана распределителя 1 (координата положения  $x$ ), поршня-клапана 2 (координата положения  $y$ ) и поршня аккумулятора-накопителя 3 (координата  $z$ ). На рис. 7 показаны балансы расходов в контрольных точках А, В, С, N. По составленной математической модели разработана имитационная, позволяющая рассчитать и визуализировать рабочий процесс генератора импульсных струй путем записи изменения давлений в характерных точках с течением времени рабочего цикла.

#### 4. Проверка адекватности математической модели

Стеновыми испытаниями подтверждена работоспособность схемы во всем диапазоне изменения заданных параметров, доказана возможность длительной эксплуатации генератора, содержащего ограниченный запас жидкости под давлением при существующей конструкции уплотнительных устройств и возможность оперативной регулировки давления в импульсе путем изменения давления закачки масла или воздуха в рабочем ГПА.

Для подтверждения правильности выводов, сделанных по результатам математического эксперимента, и доказательства правомочности использования модели в дальнейшем была выполнена проверка адекватности математической имитационной модели.

Основным критерием адекватности модели реальному устройству является точность предсказания выходных параметров: давления в импульсе и частоты следования импульсов. Проверка проводилась в два этапа. На первом выполнялось детальное сравнение осциллограмм рабочего процесса, полученных во время стеновых испытаний, и в результате моделирования рабочего процесса на компьютере при одинаковых наборах входных факторов. На втором сравнивались обобщенные показатели рабочего процесса, определяемые в пяти последовательных периодах.

Пример сопоставления осциллограмм рабочего процесса натурального образца и имитационной модели показаны на рис. 8.

Расчетные кривые во всех случаях содержат все особенности, зафиксированные осциллографированием рабочего процесса генератора. Точность предсказания искомой величины оценивалась среднеквадратическим отклонением экспериментальных и расчетных значений по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{z_{iэ} - z_{ip}}{z_b} \right)^2} \cdot 100 \%,$$

где  $z_{iэ}$  –  $i$ -ое контрольное значение величины, определенное в эксперименте;  $z_{ip}$  – контрольное значение, полученное расчетом;  $n$  – количество контрольных точек.

В качестве примера в табл. 1 приведены результаты сравнения значений давления в импульсе, полученных экспериментальным и расчетным путем.

Как видно из представленных данных (табл. 1) среднеквадратическое отклонение давления перед насадком –  $p_u$  составляет 9,2 % при максимальной ошибке предсказания не превышающей 15,4 %. По предсказанию давления в расчетных точках А и В (рис. 7) в различных режимах среднеквадратическое отклонение находится в пределах 4,6–10,2 %.

По полученным результатам можно сделать вывод о соответствии имитационной модели реальному устройству в части отражения всех особенностей протекания рабочего процесса.

пульсе  $p_u$  и КПД генератора  $\eta$  в пяти последовательных периодах при установившемся рабочем процессе. Сравнение соотношения дисперсий адекватности и воспроизводимости показало, что они однородны (проверка осуществлялась с помощью таблиц критерия Фишера для доверительной вероятности 0,95). На основании этого можно сделать вывод, что разработанная имитационная модель адекватна эксперименту с точностью, достаточной для прикладных исследований.

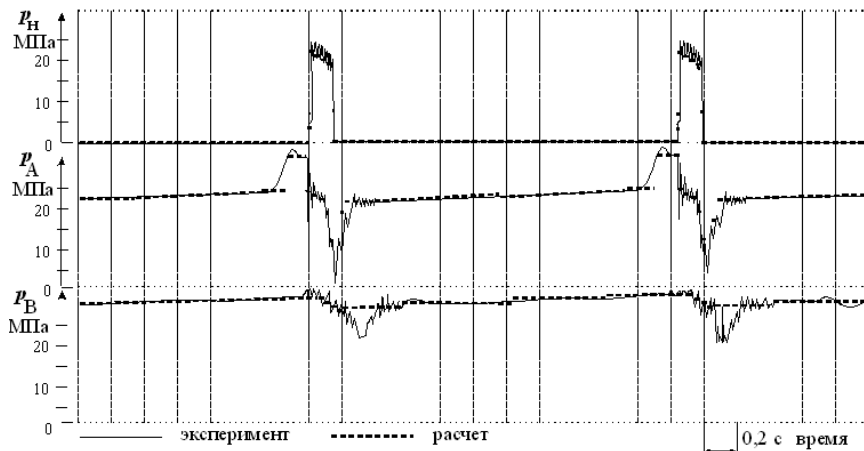


Рис.8. Сравнение осциллограмм натурального и имитационного экспериментов

### 6. Выводы

На основе систематизации и структуризации схем генераторов импульсов давления и соответствующих им математических моделей, выполнен первый этап разработки системы автоматизированного проектирования гидроимпульсных систем.

Составлен перечень основных элементов и их связей, разработаны соответствующие им математические модели, выполнена проверка их адекватности. Ошибка предсказания по имитационной модели находится в пределах от 10 % до 15,4 %, что является допустимым для инженерных исследований.

Дальнейшие исследования необходимо проводить в направлении, во-первых, дополнения банка элементов новыми образцами и разработанными для них математическими моделями, во-вторых, обобщения накопленного опыта разработки путем создания системы автоматизированного проектирования для конкретных условий на основе разработанных математических моделей с возможностью оптимизации параметров по различным показателям качества рабочего процесса. В-третьих, рационально продолжение экспериментальных исследований с целью снижения энергетических затрат. Решение задачи оптимального синтеза системы для конкретных условий эксплуатации с использованием адекватных математических моделей позволит автоматизировать процесс проектирования и выбора рациональных конструктивных и рабочих параметров генераторов импульсных струй различного назначения.

Таблица 1

Проверка адекватности модели по давлению  $p_u$  (режим выстрела)

№ точки	$p_{из}$ , МПа	$p_{пр}$ , МПа	$\Delta p_u$ , МПа	$\Delta  p_u  / p_{из}$
1	0,1	0,1	0,0	0,000
2	5,5	6,0	-0,5	0,091
3	24,0	21,0	3,0	0,125
4	22,0	21,0	1,0	0,045
5	23,0	20,0	3,0	0,130
6	21,0	20,0	1,0	0,048
7	21,0	20,0	1,0	0,048
8	20,0	19,0	1,0	0,050
9	20,0	19,0	1,0	0,050
10	6,5	7,5	-1,0	0,154

Примечание: максимальная ошибка – 15,4 %; среднеквадратичное отклонение  $S=9,2\%$

На втором этапе проверки адекватности по соответствующим пяти экспериментальным и расчетным осциллограммам были определены значения частоты следования импульсов  $f$ , среднего давления в им-

### Литература

- Трофимов, В. П. Безлюдная выемка угля [Текст] / В. П. Трофимов. – К.: Техніка, 1969. – 220 с.
- Коденцов, А. Я. Гидротехнология на шахтах [Текст] / А. Я. Коденцов. – М.: Недра, 1984. – 320 с.
- Мучник, В. С. Подземная гидравлическая добыча угля [Текст] / В. С. Мучник, М. Н. Маркус, Э. Б. Голланд. – М.:Недра, 1986. – 223 с.
- Экбер, Б. Я. Гидродобыча угля в США [Текст] / Б. Я. Экбер // Гидравлическая добыча угля. – М.:ЦНИИТЭИУгля, 1968. – № 1 (52).
- Экбер, Б. Я. анализ развития и технико-экономической эффективности гидравлической добычи угля [Текст] / Б. Я. Экбер, М. Н. Маркус. – М.: ЦНИИЭИУголь, 1982. – 57 с.
- Тимошенко, Г. М. Гидроимпульсная отбойка – перспективный способ выемки угля на шахтах с обычной технологией [Текст] / Г. М. Тимошенко, В. А. Бугрик // Уголь Украины. – 1989. – № 6. – С. 13–14.

7. Бугрик, В. А. Импульсное гидроразрушение горного массива [Текст] / В. А. Бугрик // Изв. вузов. Горный журнал. – 1991. – № 3. – С. 21–24.
8. Гидроимпульсное устройство. Патент Украины № 6173 [Текст] / Тимошенко Г. М., Гулин В. В., Тимошенко В. Г., Селивра С. А. / Приоритет от 20.02.91г. МКИ E21 C 45/00.
9. Яценко, А. Ф. Проходческий комбайн с ударно-струйным исполнительным органом [Текст] : респ. межвед. научн. техн. сб./ А. Ф. Яценко, С. А. Селивра, В. В. Гулин и др. // Разраб. месторождений полез. ископаемых. – 1987. – Вып.78. – С. 26–32.
10. Кичигин, А. Ф. Механическое разрушение горных пород комбинированным способом [Текст] / А. Ф. Кичигин, С. Н. Игнатов, А. Г. Лазуткин, И. А. Янцен. – М.: Недра, 1972. – 256 с.
11. Худин, Ю. Л. Разрушение горных пород комбинированными исполнительными органами [Текст] / Ю. Л. Худин, Л. Д. Маркман, Ж. П. Вареха, П. М. Цой. – М.: Недра, 1978. – 224 с.
12. Ракишев, Б. Р. К вопросу исследования разрушения горных пород гидроимпульсными струями высокой энергии [Текст] / Б. Р. Ракишев, Б. Ф. Шерстюк, Б. К. Стырон, Е. К. Ястребов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1985. – № 6. – С. 105–109.
13. Nebeker Eugene, V. Potincial an problems of rapidly pulsing water jets [Text] / V. Nebeker Eugene // 7th Int. Symp. Jet Gutting Technol., Ottawa. – Gran- field, 1984. – P. 51–68.
14. Fun-Den, Wang Field Applications of Pulse and Swing-Oscillating Jets for Coal Mine Entry Driving [Text] / Wang Fun-Den, Heng-da Mou, Zhe-sheng Bao, Daz hong cheng // 7 th Jnt. Symp. Jet Cutting Technol., Ottawa. – Granfield, 1984.
15. Labus, T. I. A comparision of pulsed jets versus mechanikal breakers [Text] / T. I. Labus // Gth Int. Symp. Jet Cutt. Technol., Guildford. – Granfield, 1982. – P. 229–240.
16. Дихтяр, А. А. Перспективы применения импульсных струй сверхвысокого давления для разрушения крепких выбросо-опасных пород. Выбросы угля, породы и газа [Текст] / А. А. Дихтяр, А. М. Криворучко, В. В. Гриценко, А. В. Алексюк. – К.: Наукова думка, 1976. – С. 147–152.
17. Башта, Т. М. Расчеты и конструкции самолетных гидравлических устройств [Текст] / Т. М. Башта. – М.:Оборонгиз, 1961. – 475 с.
18. Абрамов, Е. Н. Элементы гидропривода [Текст] / Е. Н. Абрамов, К. А. Колесниченко, В. Т. Маслов. – Киев: Техника, 1969. – 320 с.
19. Гийон, М. Исследование и расчет гидравлических систем [Текст] / М. Гийон. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.
20. Гейер, В. Г. Гидравлика и гидропривод [Текст] / В. Г. Гейер, В. С. Дулин, А. Н. Заря. – М.: Недра, 1991. – 331 с.