

## ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.23.05

### ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ ПНЕВМОМОЛОТА С ПЛАВНОЙ РЕГУЛИРОВКОЙ ЧАСТОТЫ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

**И. В. Тищенко, В. В. Червов, Б. Н. Смоляницкий**

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: ighor.tishchienko.70@mail.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Рассмотрена проблема создания пневматического молота с плавным изменением частоты при постоянном значении энергии удара. Предложены и исследованы варианты исполнения его воздухораспределительной системы, основанные на применении упругого клапана с механическим замыканием. Приведены результаты исследования экспериментальных образцов пневмомолота с внешними распределительными элементами, задающими частоту ударов. Установлены диапазоны регулирования их частотных характеристик.

*Пневмомолот, упругий клапан, дренажный канал, частота ударов, энергия ударного импульса, плавная регулировка*

Ударные способы погружения различных стержневых элементов и конструкций в грунтовой массив, проходки в нем подземных каналов и выработок бестраншейными методами в силу своей универсальности получили широкое распространение в современной практике строительного производства. Они используются на всех этапах, включая усиление оснований под существующими и вновь возводимыми объектами; сооружение набивных свай под фундаменты зданий, опор мостов, эстакад, линий электропередач; укрепление грунтовых выработок и насыпей; возведение ограждающих и защитных экранов; прокладку подземных коммуникаций [1–5]. Насыщенная инфраструктура современных мегаполисов, транспортных узлов, систем жизнеобеспечения требует от проектировщиков и строителей решения все более сложных и масштабных задач, возникающих при их возведении и реконструкции. Такая тенденция обусловлена необходимостью освоения новых отдаленных территорий, образованием обширных городских агломераций, сооружением объектов в зонах со сложным рельефом, повышенной сейсмоактивностью и неблагоприятными климатическими условиями, ужесточением экологических норм и правил, направленных на максимальную сохранность окружающей среды и существующего природного ландшафта.

Среди многообразия используемых технических средств важное место занимают устройства ударного действия, работающие на энергии сжатого воздуха [6–8]. Благодаря простоте конструкции, относительно низким эксплуатационным затратам, возможности применения в стесненных условиях, на сложных рельефах, обводненных и пойменных участках, пневматические импульсные машины остаются конкурентноспособными и востребованными. Этому в значитель-

ной мере способствовало появление нового поколения машин семейства “Тайфун”, созданных в ИГД СО РАН и качественно отличающихся от своих аналогов высокой экономичностью [9]. В результате разработки оригинальной схемы воздухораспределения [10] в них достигнуты более высокие энергетические показатели, уменьшен удельный расход сжатого воздуха, гарантирован надежный запуск и устойчивая работа независимо от протяженности воздухоподводящей магистрали. Для обеспечения потребностей строительной отрасли освоен типоразмерный ряд таких устройств с ударными частями  $m_y = 40 - 1000$  кг и энергией  $E = 0.4 - 8.5$  кДж, работающих от типовых компрессорных станций производительностью не более  $10 - 12$  м<sup>3</sup>/мин при рабочем давлении сжатого воздуха 0.6 МПа. В направлении увеличения массогабаритных и расходных показателей расширена и линейка оборудования фирмы “Тракто-Техник” (Германия), где у наиболее мощного молота “Аполло” общая масса достигает 11500 кг, а требуемый расход энергоносителя — не менее  $100$  м<sup>3</sup>/мин [11].

Обзор современных технологий строительного производства и постоянная работа с потребителями машин данного класса показывают, что такой экстенсивный подход к достижению требуемых энергетических показателей уже не может в полной мере отвечать все возрастающим требованиям и запросам. В условиях жесткой конкуренции необходим поиск новых направлений повышения технического уровня оборудования. ИГД СО РАН активно ведет такие исследования, связанные как с увеличением производительности импульсного воздействия генератора на погружаемый элемент [12, 13], так и решением вопроса более эффективного использования энергоносителя [14]. В ходе поисковых работ показана перспективность и возможность увеличения частотной компоненты ударной мощности устройства с упругим клапаном в камере обратного хода за счет сокращения амплитуды перемещения ударника и одновременного пропорционального роста магистрального давления сжатого воздуха [15, 16]. На основе полученных результатов создан опытный образец высокочастотного пневмомолота с массой ударника  $m_y = 150$  кг, который при давлении сжатого воздуха 1.2 МПа имеет следующие выходные параметры:  $E = 1.4$  кДж,  $f = 7 - 9$  Гц [17]. При этом расход энергоносителя на единицу ударной мощности (удельный расход) в зависимости от режима его настройки составляет  $q = (0.2 - 0.24) \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/Дж, что соответствует нижней границе аналогичного показателя у типовых пневмомолотов “Тайфун” ( $q = (0.22 - 0.37) \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/Дж) [14] и существенно меньше, чем у пневмопробойников и более ранних импульсных устройств с циклом расширения ( $q = (0.3 - 0.65) \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/Дж) [8].

Широкая номенклатура внедряемых в грунт конструктивных элементов, большое разнообразие типов и физико-механических свойств породной среды, многочисленные технологические особенности и ограничения не позволяют создать единый ударный механизм, одинаково эффективный во всех условиях эксплуатации. В этой связи целесообразно оперативное изменение того или иного выходного параметра пневмомолота. Исходя из конкретных производственных задач и особенностей каждой строительной площадки, можно будет оптимально использовать потенциал пневмоударной машины и сократить типоразмерный ряд оборудования. В пневмомолотах “Тайфун” с клапаным воздухораспределением заложена возможность дискретного варьирования сечением дроссельного канала, питающего камеру обратного хода ударника, путем установки одного из сменных жиклеров [18]. Это позволяет в пределах, определяемых конструктивными параметрами, ступенчато изменять частотную составляющую ударной мощности при постоянном значении ее энергетической компоненты, влияя таким образом на потребление воздуха пневмомолотом и адаптируя его к параметрам используемой компрессорной станции. Операция по замене жиклера требует остановки и частичной разборки устройства, вследствие чего выполняется, как правило, однократно перед началом работ.

Вместе с тем, как показывают экспериментальные исследования, имеется ряд задач, для решения которых необходимо выполнять плавную регулировку частоты ударов непосредственно во время работы пневмоударного устройства. Это дает возможность оперативно реагировать на изменение внешних условий за счет подбора оптимальной по производительности частоты ударов пневмомолота. Кроме того, в устройстве ударного действия, разрабатываемом в ИГД СО РАН и состоящем из двух источников импульсной нагрузки [19, 20], достаточно просто решается проблема согласования режимов работы за счет синхронизации частотных интервалов. Для регулирования частоты ударов воздухораспределительная система должна быть дополнена внешним задающим пневмоаппаратом, воздействующим на рабочий цикл пневмомолота как по команде оператора, так и автоматически при наличии управляющего сигнала и линии обратной связи.

Первый вариант решения поставленной задачи представлен на рис. 1. Устройство ударного действия состоит из подвижной массы 3, периодически соударяющейся с внутренней торцевой поверхностью наковальни 1, соединенной с цилиндрическим корпусом 4, оснащенным задней гайкой с патрубком 5. Выхлоп отработанного сжатого воздуха происходит при срабатывании кольцевого упругого клапана 2. Соединение камер прямого  $A_1$  и обратного  $A_2$  хода ударника 3 осуществляется каналом 8, сечение которого задается установкой одного из сменных жиклеров 7 диаметром  $d_1$ . Все элементы выполнены и скомпонованы по единой конструктивной схеме с типовыми устройствами серии “Тайфун”. Основное отличие заключается в организации дополнительной параллельной линии подпитки 9, сообщающей полость  $A_2$  непосредственно с компрессором 11, минуя основную воздухоподводящую магистраль, соединенную с патрубком машины через пусковой кран 6. Регулирование степени открытия управляемого дросселя 10 позволяет изменять интенсивность наполнения камеры обратного хода ударника, влияя тем самым на время его перемещения в крайнее заднее положение, что отражается на продолжительности всего рабочего цикла и частоте ударов пневмомолота.

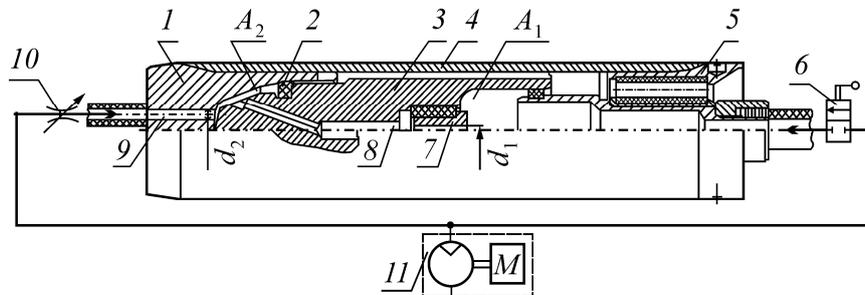


Рис. 1. Функциональная схема пневмомолота: 1 — наковальня; 2 — упругий клапан; 3 — ударник; 4 — корпус; 5 — задняя гайка с патрубком; 6 — пусковой кран; 7 — жиклер; 8 — дроссельный канал; 9 — канал подпитки; 10 — регулятор; 11 — энергоустановка

Для проверки обоснованности такого подхода создана экспериментальная модель пневматического импульсного устройства с ударной массой  $m_y = 4$  кг. Тестирование ее выходных параметров проводилось на лабораторном измерительном стенде (рис. 2). Регистрация изменения давлений в рабочих камерах устройства 2, закрепленного в зажимном механизме 5, осуществлялась с помощью измерительной цепи, состоящей из датчиков  $D_1$ ,  $D_2$ , блока усилителей (БУ) электрического сигнала, цифрового преобразователя АЦП, переносного компьютера ПК. Эксперименты включали пять серий опытов, отличающихся диаметром  $d_1 = 0, 2, 3, 4, 5$  мм одного из сменных жиклеров 4, последовательно устанавливаемых в дроссельный канал ударника.

В ходе каждой из них также пошагово изменялось сечение пропускного отверстия дополнительной линии подпитки  $l$ , определяемое размером  $d_2 = 0, 2, 3, 4, 5$  мм. Запись и обработка импульсных индикаторных диаграмм выполнялась с помощью пакета стандартных программ Power Graph Professional и Excel. В результате установлен характер процесса наполнения и опорожнения управляемой передней камеры, определен уровень падения давления в воздухоподводящем патрубке при прямом ходе ударника, влияющий на энергетические показатели модели пневмомолота, зафиксирована продолжительность рабочего цикла и частотная составляющая ударной мощности в каждом из 24 исследованных режимов работы.

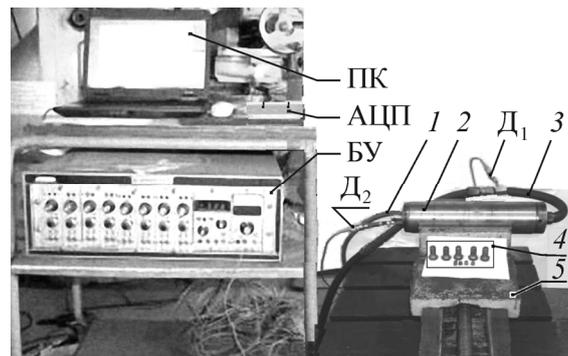


Рис. 2. Измерительный стенд: 1 — линия подпитки; 2 — генератор; 3 — основная магистраль; 4 — набор жиклеров; 5 — зажимной механизм;  $D_1, D_2$  — датчики давления

Полученная частотная характеристика исследуемого ударного устройства приведена на рис. 3. Она представляет собой набор выполаживающихся кривых, начальные значения которых определяются диаметром основного жиклера  $d_1$  и изменяются в пределах от  $f = 4.3$  Гц ( $d_1 = 0$  и  $d_1 = 2$  мм) до  $f = 18$  Гц ( $d_1 = 5$  мм). Однако в нижней границе этого диапазона зафиксирован сбой в рабочем цикле вследствие недопустимого уменьшения скорости наполнения камеры  $A_2$  (рис. 1), сопровождаемого ограничением заброса подвижной массы при ее перемещении в заднее положение. Контактная поверхность упругого клапана в этом случае не достигает выпускных пазов в наковальне и в результате недовыхлопа отработанного сжатого воздуха нарушается нормальный режим работы модели. Поэтому для практических целей нижнее значение частотного диапазона принято равным  $f = 9.6$  Гц, что соответствует жиклеру с отверстием  $d_1 = 3$  мм (кривая 3, рис. 3).

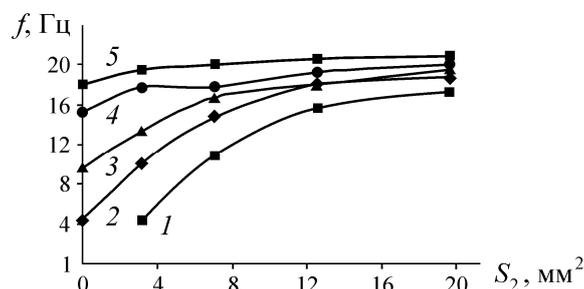


Рис. 3. Регулировочная характеристика генератора при диаметрах основного жиклера: 1 —  $d_1 = 0$ ; 2 —  $d_1 = 2$  мм; 3 —  $d_1 = 3$  мм; 4 —  $d_1 = 4$  мм; 5 —  $d_1 = 5$  мм

Как видно из графиков, использование дополнительной линии подпитки с регулируемым пропускным сечением  $S_2$  наиболее эффективно при полном закрытии дренажного канала ударника (кривая 1) и при его минимальном открытии (кривая 2), когда функция  $f(S_2)$  изменяется четырехкратно и более в пределах  $f = 4.3 - 17.2$  Гц ( $d_1 = 0$ ) и  $f = 4.3 - 18.6$  Гц ( $d_1 = 2$  мм). В даль-

нейшем влияние данного фактора на изменение количества ударных импульсов за единицу времени постепенно снижается, достигая своего минимума при  $d_1 = 5$  мм (кривая 5), когда при полном использовании диапазона настройки регулятора линии подпитки прирост частоты ударов составляет лишь 16 % от  $f = 18$  до 20.8 Гц. Таким образом, дискретным подбором пропускного отверстия центрального канала ударника и плавным изменением сечения внешнего регулировочного элемента, установленного на параллельной магистрали питания передней камеры, достигнут приемлемый для практического использования, более чем двукратный, рабочий интервал значений частотной характеристики, составляющий  $f = 9.6 - 20.8$  Гц.

Несмотря на полученные удовлетворительные результаты, такой путь модернизации пневматических импульсных устройств нельзя считать оптимальным в силу их конструктивных и технологических особенностей. Он не позволяет полностью исключить необходимость их частичной разборки для смены жиклера, а наличие переднего воздухоподводящего рукава, присоединяемого непосредственно к штуцеру в наковальне, может затруднить установку на нее переходных насадок, необходимых для передачи ударного воздействия на конструктивный элемент.

С целью снижения влияния указанных недостатков предложено новое оригинальное исполнение системы воздухораспределения генератора [21]. Его основная идея заключается в отдельной подаче сжатого воздуха в камеры машины, обозначенные на рис. 4 как полости  $A_1$  и  $A_2$ . Функционирование устройства осуществляется за счет возвратно-поступательного движения ударника  $1$  внутри цилиндрического корпуса  $2$  на величину рабочего хода  $X$ , что обеспечивается работой кольцевого упругого клапана  $4$ . Конструкция патрубка  $6$  разделяет объем поступающего энергоносителя по двум независимым параллельным потокам. Выполненный в теле ударника центральный канал  $3$  объединен с гибким воздухопроводом  $5$ , эластичность которого допускает подвижность соединенной с ним ударной массы на протяжении всего пути ее перемещения. Такое решение позволяет вынести блок установки сменных жиклеров за конструктивные пределы пневмомолота и использовать вместо него управляемый дроссельный регулятор  $7$ , устранив тем самым дискретный режим изменения пропускного сечения и обеспечив плавную регулировку частоты импульсного воздействия непосредственно во время работы оборудования.

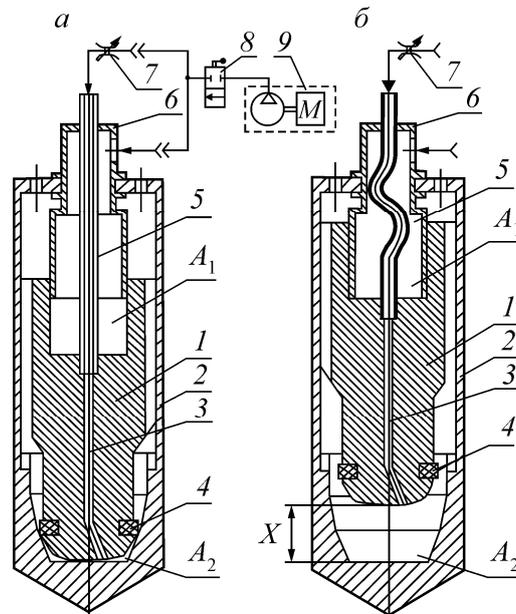


Рис. 4. Функциональная схема пневмомолота при переднем (а) и заднем (б) положениях ударной части: 1 — ударник; 2 — корпус; 3 — дроссельный канал; 4 — упругий клапан; 5 — гибкий воздухопровод; 6 — патрубок; 7 — регулятор; 8 — пусковой кран; 9 — энергоустановка;  $A_1, A_2$  — камеры прямого и обратного хода

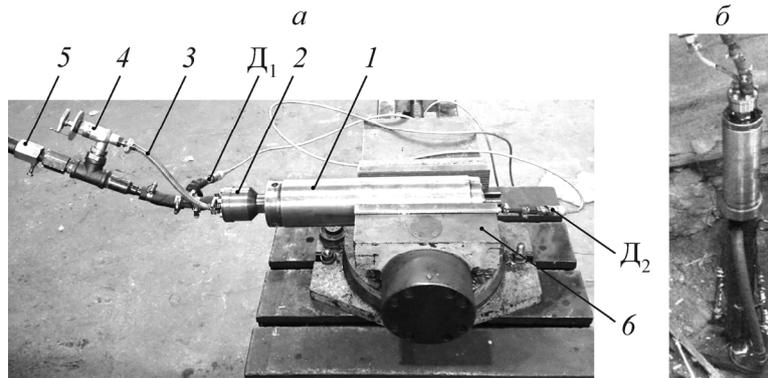


Рис. 5. Экспериментальная модель пневмомолота с плавной регулировкой частоты ударов на измерительном стенде (а) и погружаемом элементе в грунтовом канале (б): 1 — генератор; 2 — распределительный блок; 3 — линия питания камеры обратного хода; 4 — регулировочный кран; 5 — основная магистраль; 6 — зажимный механизм;  $D_1$ ,  $D_2$  — датчики давления

Особенности рабочего цикла пневмомолота исследованы на лабораторном измерительном стенде (рис. 5а). При этом экспериментальный образец 1, закрепляемый на неподвижной станине зажимным механизмом 6, выполнен в тех же габаритных размерах и с такой же массой ударника ( $m_v = 4$  кг), что и устройство, приведенное на рис. 2. Основным внешним отличием являлось размещение на патрубке заднего распределительного блока 2 (рис. 5а) для отдельного подвода воздушных магистралей 3 и 5 с управляемым дроссельным элементом 4, что обеспечивало независимое питание рабочих камер и плавное регулирование частоты ударов без остановки работы машины. Показания датчиков давления  $D_1$  и  $D_2$  записывались и обрабатывались тем же комплектом регистрирующей аппаратуры, представленным ранее на рис. 2.

На рис. 6 приведены импульсные индикаторные диаграммы рабочего цикла, ограничивающие зону устойчивого режима функционирования модели. Первая получена при минимально возможной площади сечения впускного отверстия регулирующего пневмоаппарата  $S_1 = 3.1$  мм<sup>2</sup>, вторая — при максимальной, когда лимитирующим фактором становится площадь поперечного сечения самого гибкого воздуховода, равная  $S_1 = 28.3$  мм<sup>2</sup>. Плавное изменение количества генерируемых ударных импульсов за единицу времени обеспечивается на протяжении всего исследованного частотного интервала  $f = 6 - 17.2$  Гц.

Сравнение полученных данных с аналогичными результатами при первом варианте исполнения устройства с передней дополнительной подпиткой камеры обратного хода (рис. 1), когда  $f = 9.6 - 20.8$  Гц, показывает одинаковое смещение как минимума, так и максимума частотного диапазона в нижнюю сторону на 3.6 Гц. Такая тенденция объясняется наличием гибкого воздуховода, деформирующегося при движении ударника и оказывающего тем самым дополнительное сопротивление, увеличивающее продолжительность рабочего цикла машины.

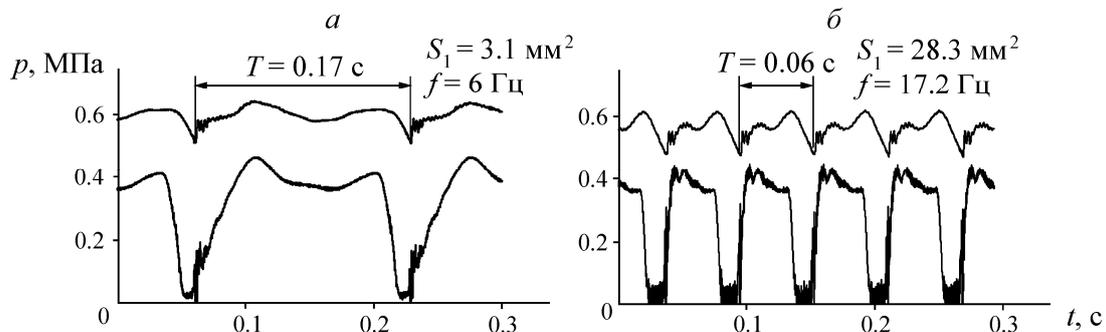


Рис. 6. Индикаторные диаграммы при минимальном (а) и максимальном (б) открытии линии наполнения камеры обратного хода

Практическая проверка возможностей экспериментальной модели устройства с плавным изменением частоты ударов осуществлялась в вертикальном грунтовом канале (рис. 5б). В качестве погружаемого стержня использовалась металлическая труба с наружным диаметром 50 мм. Уровень импульсного воздействия фиксировался тензометрическим датчиком, показания которого предварительно калибровались в соответствии с единицами измерения механической силы. Представленная модель являлась составной частью комбинированного ударного модуля, состоящего из двух источников импульсной нагрузки (№ 1 и № 2), установленных соосно с телом внедрения посредством переходной соединительной капсулы и имеющих одинаковые ударные массы  $m_v = 4$  кг [20]. Период рабочего цикла одного из них был постоянным, равным  $T_1 = 0.1$  с, что соответствовало частоте  $f = 10$  Гц. Вторая ударная машина, имея систему плавной внешней регулировки, могла оперативно по команде оператора изменять ритм своей работы без остановки процесса погружения. В результате появлялась возможность корректировать разность фазы  $\delta$  между амплитудами силовых импульсов и задавать различные временные сочетания комбинированного воздействия вплоть до полного совпадения ударов (рис. 7а–в). Такие свойства генератора открывают новые перспективы в оптимизации параметров системы “пневмомолот – погружаемый элемент – грунтовый массив” с целью повышения эффективности ударного воздействия на погружаемые в грунт конструктивные элементы.

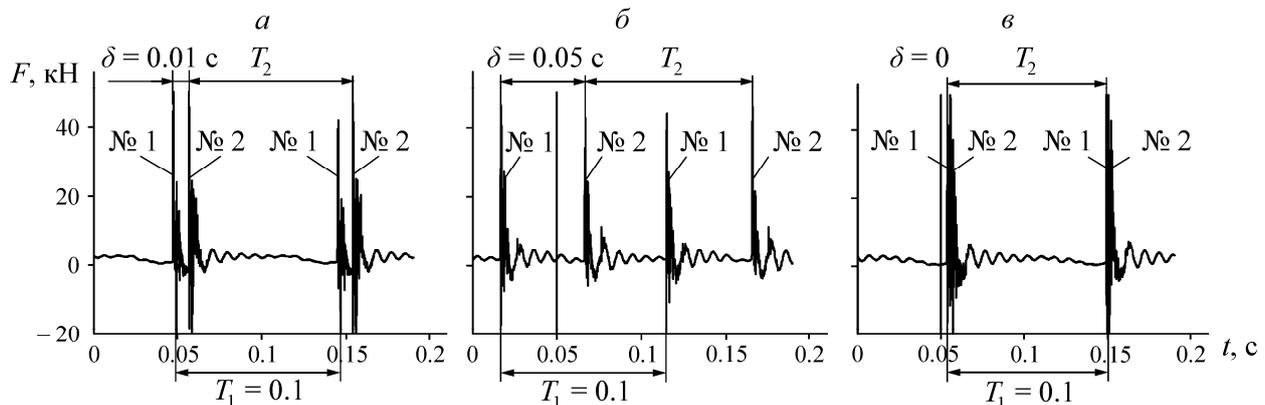


Рис. 7. Диаграммы силовых импульсов комбинированного модуля с подстройкой частоты: а —  $\delta = 0.01$  с; б —  $\delta = 0.05$  с; в —  $\delta = 0$  (совпадение ударов)

## ВЫВОДЫ

Повышение эффективности применения пневмомолотов для забивания в грунт различных конструктивных элементов связано с обеспечением плавной настройки частоты ударов с целью подбора оптимального режима работы. Перспективность такого подхода подтверждается экспериментальным материалом, полученным на физических моделях пневмомолотов с массой ударника 4 кг.

Для пневмомолотов с упругим кольцевым воздухораспределительным элементом введение дополнительной линии подпитки камеры прямого хода ударника с регулируемым поступлением в нее сжатого воздуха позволяет в зависимости от диаметра воздухоподводящего канала получить диапазоны плавного изменения частоты  $f = 9.6 - 17.2$  Гц при  $d_1 = 2$  мм и  $f = 18 - 20.8$  Гц при  $d_1 = 5$  мм.

Для пневмомолотов этого типа предложена и исследована схема с независимым наполнением рабочих камер по двум параллельным трактам, один из которых связан непосредственно с центральным каналом ударника и выполнен в виде гибкого внутреннего воздуховода с переменным пропускным сечением. В результате достигнуто фактически трехкратное бесступенчатое изменение частотного показателя в пределах  $f = 6 - 17.2$  Гц.

Реализованная в экспериментальной модели пневмомолота возможность плавной настройки частоты ударов позволяет вносить необходимые коррективы в периодичность приложения импульсной нагрузки непосредственно в ходе процесса внедрения и не требует его остановки для изменения режима настройки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Справочник** по общестроительным работам. Основания и фундаменты / под ред. М. И. Смородинова. — М.: Стройиздат, 1974. — 372 с.
2. **Швец В. Б., Феклин В. И., Гинзбург Л. К.** Усиление и реконструкция фундаментов. — М.: Стройиздат, 1985. — 204 с.
3. **Абраменков Э. А., Грузин В. В.** Средства механизации для подготовки оснований и устройства фундаментов. — Новосибирск: НГАСУ, 1999. — 215 с.
4. **Бобриков В. Б.** Строительные работы и машины в мосто- и тоннелестроении. Ч. 2. Технология и механизация строительных процессов. — М.: УМЦ ЖДТ, 2008. — 694 с.
5. **Кершенбаум Н. Я., Минаев В. И.** Прокладка горизонтальных и вертикальных скважин ударным способом. — М.: Недра, 1984. — 245 с.
6. **Рыбаков А. П.** Основы бестраншейных технологий (теория и практика). — М.: ПрессБюро № 1, 2005. — 304 с.
7. **Костылев А. Д., Григоращенко В. А., Гилета В. П. и др.** Пневмопробойники в строительном производстве. — Новосибирск: Наука, 1987. — 142 с.
8. **Гурков К. С., Климашко В. В., Костылев А. Д. и др.** Пневмопробойники. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 1990. — 217 с.
9. **Смоляницкий Б. Н., Червов В. В., Трубицын В. В. и др.** Новые пневмоударные машины для специальных строительных работ // Механизация стр-ва. — 1997. — № 7. — С. 12–17.
10. **Пат. 2462575 РФ.** Устройство ударного действия / В. В. Червов, Б. Н. Смоляницкий, В. В. Трубицын, А. В. Червов, И. В. Тищенко // Оpubл. в БИ. — 2012. — № 27. — 16 с.
11. **Кюн Г., Шойбле Л., Шлик Х.** Закрытая прокладка непроходных трубопроводов. — М.: Стройиздат, 1993. — 168 с.
12. **Смоляницкий Б. Н., Тищенко И. В., Червов В. В., Гилета В. П., Ваняг Ю. В.** Резервы повышения производительности виброударного погружения в грунт стальных элементов в технологиях специальных строительных работ // ФТПРПИ. — 2008. — № 5. — С. 72–80.
13. **Червов В. В., Тищенко И. В., Смоляницкий Б. Н.** Влияние частоты виброударного воздействия и дополнительного статического усилия на скорость погружения стержня в грунт // ФТПРПИ. — 2011. — № 1. — С. 61–70.
14. **Червов В. В., Тищенко И. В., Червов А. В.** Влияние элементов системы воздухораспределения пневмомолота с упругим клапаном на потребление энергоносителя // ФТПРПИ. — 2009. — № 1. — С. 41–47.
15. **Смоляницкий Б. Н., Тищенко И. В., Червов В. В.** Перспективы совершенствования пневмомолотов для специальных строительных работ // ФТПРПИ. — 2009. — № 4. — С. 65–75.
16. **Тищенко И. В., Червов В. В.** Высоочастотный пневмомолот для специальных строительных работ // Строит. и дор. машины. — 2011. — № 7. — С. 8–13.
17. **Тищенко И. В.** Пневмомолот с повышенной частотой ударного воздействия // Вестн. КузГТУ. — 2014. — № 3. — С. 12–16.
18. **Червов В. В., Смоляницкий Б. Н., Тищенко И. В.** Определение диапазона изменения частоты ударов пневмомолота с кольцевым упругим клапаном в выхлопном тракте камеры обратного хода // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 75–79.
19. **Пат. 2535316 РФ.** Устройство забивания стержневого элемента в грунт / В. В. Червов, И. В. Тищенко, А. И. Горелов // Оpubл. в БИ. — 2014. — № 34. — 9 с.
20. **Тищенко И. В., Червов В. В., Горелов А. И.** Влияние дополнительного вибровозбудителя и комбинации виброударных устройств на скорость внедрения трубы в грунт при прокалывании // ФТПРПИ. — 2013. — № 3. — С. 107–118.
21. **Пат. 2535426 РФ.** Устройство ударного действия / В. В. Червов, А. И. Горелов // Оpubл. в БИ. — 2014. — № 34. — 9 с.