

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.23.05

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОГО ПНЕВМАТИЧЕСКОГО МОЛОТА НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЕГО ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ С ГРУНТОМ

В. В. Червов, И. В. Тищенко, А. В. Червов, Ю. В. Ваняг

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

Рассмотрен опыт создания высокочастотного пневмомолота, работающего на повышенном давлении сжатого воздуха. Описано устройство комбинированного генератора ударных импульсов, состоящего из двух пневмомолотов, и определены условия его стабильной работы. Для обеспечения синхронной работы пневмомолотов в составе комбинированного генератора реализовано техническое решение плавного регулирования частоты ударов для одного из пневмомолотов. В результате проведенных исследований взаимодействия с грунтом нескольких опытных образцов с двумя ударными массами получено устройство, полностью синхронизированное по фазовому сдвигу и частоте ударов.

Пневмомолот, ударные массы, упругий клапан, давление воздуха, частота ударов, энергия удара, расход воздуха, грунт

DOI: 10.15372/FTPRPI20210110

Повышение технологической скорости горных работ и, как результат, сокращение сроков их выполнения невозможны без совершенствования конструкции и принципов работы пневматических устройств ударного действия, использующихся при бестраншейной прокладке коммуникаций [1]. В 80-х гг. XX в. развитие технологий прокалывания грунта способствовало созданию мощных пневмопробойников для забивания в грунт труб (СО-166, М-200, М-400). Основным недостатком данных машин — большой расход сжатого воздуха.

В ИГД СО РАН в 1993 г. изобретена новая система воздухораспределения для пневмоударного устройства на основе применения скользящего упругого кольцевого клапана с механическим замыканием камеры обратного хода, что позволило создать более десятка пневмомолотов нового поколения “Тайфун” с массой ударной части 0.3–1000 кг для забивания в грунт стальных труб [2]. Удельный расход сжатого воздуха снизился в 2 раза, энергия единичного удара увеличилась в 1.5 раза при одинаковых с пневмопробойником габаритах. Простота конструкции, технологичность изготовления, надежный запуск в работу, отсутствие обмерзания, ремонтпригодность — дополнительные преимущества новых машин. Важно, что они работа-

ют при постоянной энергии с настраиваемой частотой удара, т. е. обладают переменной структурой ударной мощности. Это позволило использовать передвижной компрессор производительностью не более 10 м³/мин без потери единичной энергии удара.

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВИБРОУДАРНОГО ПОГРУЖЕНИЯ В ГРУНТ СТАЛЬНЫХ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В настоящее время по-прежнему актуальны строительные технологии, основанные на забивании в грунтовый массив стальных прокатных элементов (труб, швеллеров, двутавров). Не уменьшаются объемы работ по укреплению стенок котлованов, откосов насыпей; изготовлению трубчатых набивных железобетонных свай и опорных стен в грунте; сооружению фундаментов домов, опор мостовых переходов, эстакад и путепроводов. В основе технологий производства данного вида работ — забивание вертикальных трубчатых элементов в грунт с помощью разнообразных ударных устройств и виброударных погружателей. Не менее важны технологии бестраншейной прокладки подземных коммуникаций различного назначения, сохраняющие местный ландшафт и инженерные коммуникации в нетронутом виде [3].

При высокой частоте нанесения ударов по погружаемому элементу со сравнительно малой энергией удара можно сократить время погружения шпунта в дно котлована [4]. В [5, 6] установлено, что вибрационное действие приводит к уменьшению сил сопротивления перемещения грунтовых слоев, а с достижением резонансной частоты колебаний грунты теряют свою несущую способность, напоминая вязкую жидкость. В зоне разрушения возникает эффект аномально низкого трения. Результаты исследований влияния частотной составляющей импульсного воздействия на перемещающийся элемент, в том числе в пластичной среде, подтверждают перспективность создания высокочастотного устройства ударного действия, обладающего пороговым значением энергии единичного удара для преодоления сил трения при перемещении забоя [7].

Разработка высокочастотной машины начиналась с макетного варианта короткоходового пневмомолота с массой ударника 80 кг, рассчитанного на высокое давление сжатого воздуха 1.2 МПа. Энергия удара составила 0.8 кДж, частота ударов — 12.4 Гц [2]. На следующем этапе создан опытно-конструкторский образец пневмомолота с энергией удара 1400 Дж и массой ударной части 150 кг (частота нанесения ударов 9 Гц). При испытаниях достигнута высокая скорость погружения двутавра № 45 (40 м/ч). Наличие компрессоров только стандартного давления 0.6 МПа у большинства потенциальных заказчиков обусловили отсутствие заказов на оборудование, работающее на высоком давлении сжатого воздуха. Дальнейшее повышение производительности технологического процесса обеспечивается не только высоким давлением энергоносителя, но и за счет оптимизации параметров взаимодействия системы, состоящей из пневмоударного устройства, забиваемого стержневого элемента и грунтового массива. Для этого необходимо изучить совокупность амплитудных и фазовых характеристик, определяющих параметры выходного импульса. Рассмотренные факторы указывают на новые направления исследования и создания современных импульсных технологий и машин.

ГЕНЕРАТОР УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ, СОСТОЯЩИЙ ИЗ ДВУХ УСТРОЙСТВ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

Проходка скважин большого диаметра, забивание в грунт труб большого диаметра и длины, а также интенсификация технологических процессов невозможны без повышения энергии и частоты ударов машин. Для этого необходимо увеличение их массогабаритных характеристик. При изготовлении деталей больших машин используются большие станки и другое технологическое оборудование. Альтернативой в данной ситуации является одновременное использование двух и более машин для выполнения новой технологической задачи.

Объединение радиально расположенных между собой трех пневмоударников в одно устройство для бурения скважин большого диаметра предложено в 1972 г. [8]. Расширитель скважин успешно испытан и применен на горных предприятиях. Он представлял собой жесткую конструкцию, объединяющую корпуса пневмоударников. Ударники и инструменты между собой не имели жесткой связи и независимо друг от друга воздействовали на породный массив.

Радиальное объединение в одну общую жесткую конструкцию корпусов даже двух пневмопробойников или пневмомолотов ведет к смещению от оси инструмента ударов, приводящих к изменению направления из-за возникновения боковых импульсов. Объединение машин возможно при условии одновременного нанесения ударов двумя ударными массами. В этом случае инструмент (расширитель скважин или забиваемая труба) и наковальня получают ударные импульсы сразу от двух ударных масс.

Если корпуса двух машин жестко объединить в одну соосную конструкцию, то при одновременном включении в работу их ударники будут перемещаться независимо друг от друга не только с разными частотами удара, но и с разными фазами удара. Они будут наносить удары и по своему корпусу, и по корпусу другой машины как по присоединенной массе, поглощающей ударный импульс. В [9] предложена конструкция экспериментального устройства, объединяющая два последовательно установленных на одной оси пневмомолота в один комбинированный генератор ударных импульсов. Их корпуса не имеют жесткой связи между собой.

В результате проведения экспериментальных исследований лабораторного образца генератора ударных импульсов, состоящего из двух устройств ударного действия, установлено, что увеличение спектра импульсного воздействия по энергии и частоте ударов делает погружение трубы в грунт более интенсивным (рис. 1).

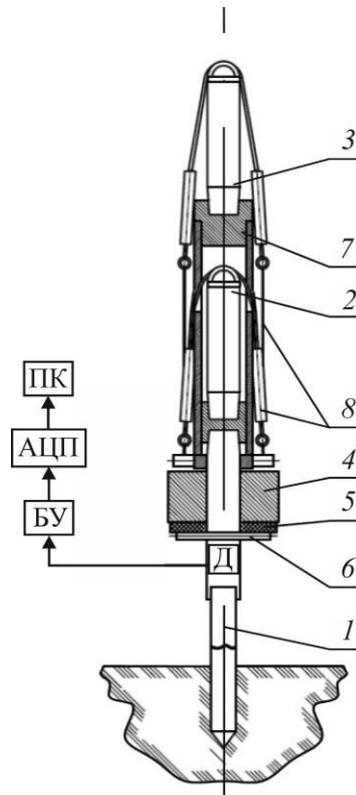


Рис. 1. Генератор ударных импульсов, выполненный на основе двух пневматических молотов: 1 — труба с наконечником; 2, 3 — мини-пневмомолоты; 4 — массивная втулка; 5 — демпфер; 6 — палец; 7 — трубчатое соединительное устройство; 8 — талреп со стропой; БУ — блок усилителей; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ПК — записывающее устройство; Д — датчик

Расширение спектра импульсного воздействия путем присоединения к погружаемому элементу двух пневмомолотов с энергией удара выше минимального для погружения значения 17 и 9 Дж, установленных друг над другом, дает в некоторых случаях почти двукратное увеличение скорости погружения по сравнению с простым суммированием скоростей от каждого по отдельности пневмомолота (рис. 2).

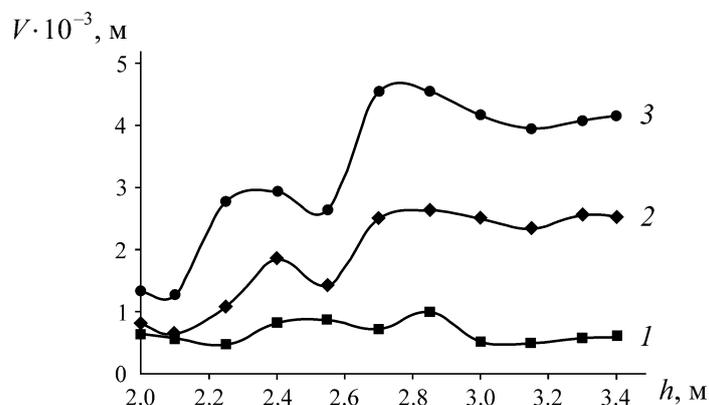


Рис. 2. Скорость погружения трубчатого элемента V в зависимости от глубины забоя h при одновременной работе двух пневмомолотов (3) и отдельно каждого пневмомолота с ударниками массой 1 (1) и 2 кг (2)

Случайное совпадение двух ударов (рис. 3) одновременно приводит к возникновению больших усилий и напряжений как в конструкции трубчатого соединительного устройства 7 (рис. 1), так и в погружаемой трубе.

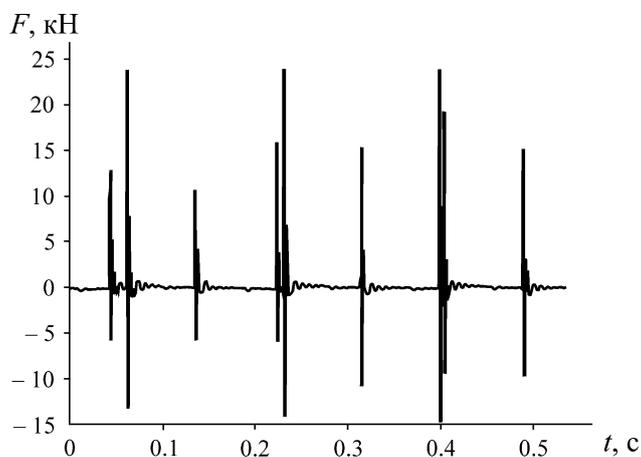


Рис. 3. Осевая продольная сила, возникающая в трубчатом элементе диаметром 33 мм при несинхронизированных ударах двух пневмомолотов

Для надежного функционирования комбинированного генератора согласованы режимы работы двух пневмомолотов путем синхронизации их частотных характеристик. Для этой цели последовательно решены следующие основные задачи:

- 1) определены условия стабильной работы упругого кольцевого клапана для обеспечения постоянной частоты ударов пневмомолота;
- 2) разработан пневмомолот с плавным изменением частоты ударов в процессе его непрерывной работы;

3) конструктивно объединены в одно устройство два расположенных на одной оси пневмомолота, один из которых имеет плавную регулировку частоты ударов;

4) создан высокочастотный импульсный модуль с единой системой воздухораспределения и механической синхронизацией двух ударных масс, расположенных в одном корпусе.

УСЛОВИЯ СТАБИЛЬНОЙ РАБОТЫ УПРУГОГО КОЛЬЦЕВОГО КЛАПАНА

Работа упругого кольцевого клапана включает контактную и радиальную упругую деформацию материала (резины) под действием давления воздуха в камере обратного хода. При движении ударника назад кольцевой упругий клапан растягивается, прижимается своей периферийной поверхностью к полированной внутренней поверхности наковальни и скользит по ней. В результате деформации и трения упругого клапана выделяется тепло, вызывающее нагрев и снижение жесткости материала. Интенсивный нагрев резины до температуры меньшей, чем температура вулканизации (143 °С), может привести к быстрым структурным изменениям в материале, повысить твердость и снизить допустимую деформацию (15 %), способствовать быстрому появлению поверхностных трещин и разрушению упругого клапана.

Экспериментально установлено, что при частоте ударов не более 11 Гц на поверхности кольцевого упругого клапана из резины температура не превышает 26 °С. Это объясняется интенсивной охлаждающей способностью воздуха при выхлопе в атмосферу. В условиях отрицательных температур пневмомолоту необходимо работать с повышенной частотой ударов. Такая эксплуатация оборудования предотвратит его обледенение и повысит надежность работы.

Точный выбор размеров внутренней поверхности наковальни и кольцевого клапана пневмомолота обеспечит функционирование системы воздухораспределения [10]. С учетом опыта многолетней эксплуатации большого числа машин оценено влияние стабильности механического замыкания упругого клапана на работоспособность пневмомолота. Определено фактическое значение радиального смятия упругого кольца (1.6–3.6%), которому соответствует осевое смятие (11–20%). После соприкосновения с конической поверхностью большая деформация наружной части упругого кольцевого клапана в положении ударника “на наковальне” компенсирует большие зазоры ударника в корпусе. Стабильность работы пневмомолота ударного действия при продолжительной эксплуатации, невозможность заклинивания вследствие обледенения или попадания в зазоры твердых фрагментов, пониженная твердость термообработки посадочных поверхностей после улучшения стали — результат применения больших зазоров между двумя основными деталями.

ПНЕВМОМОЛОТ С ПЛАВНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТЫ УДАРОВ

В пневмомолоте с переменной структурой ударной мощности при постоянном уровне энергии удара и ходе ударной массы настройка частоты реализуется путем регулирования продолжительности его обратного хода, что достигается изменением сечения канала в ударнике. Верхняя и нижняя границы частотного диапазона пневмомолота и соответствующие им значения пропускного сечения дроссельного канала определяются экспериментально. Опытный образец пневмомолота с массой ударника 4 кг и гибким внутренним воздуховодом обеспечил плавное изменение частоты ударов в диапазоне 6–17 Гц (рис. 4).

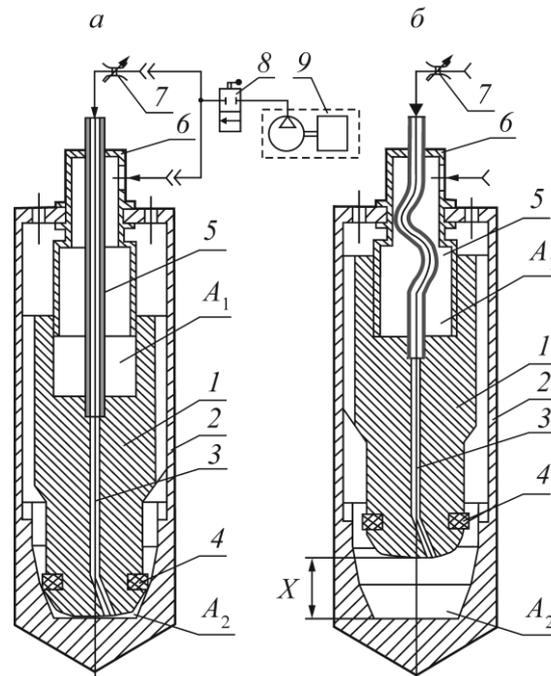


Рис. 4. Принципиальная схема пневмомолота в момент удара (а) и при крайнем заднем (б) положениях ударника: 1 — ударная масса; 2 — корпус; 3 — канал; 4 — кольцевой упругий клапан; 5 — внутренний воздухопровод; 6 — патрубок; 7 — вентиль; 8 — шаровый кран; 9 — компрессор; A_1 , A_2 — камеры прямого и обратного хода

Наполнение обеих камер осуществлялось по двум параллельным воздуховодам: гибкому переменного сечения, связанному с каналом в ударнике для камеры холостого хода, и внешнему трубопроводу, сообщенному с магистралью сжатого воздуха. Установлено, что новый способ обеспечивает трехкратное бесступенчатое изменение частоты приложения импульсной нагрузки на рабочий инструмент. Необходимая корректировка частоты приложения импульсной нагрузки в процессе погружения трубы в грунт достигается за счет регулирования продолжительности обратного хода ударника без разборки пневмомолота.

СИНХРОНИЗАЦИЯ РАБОТЫ ДВУХ ПНЕВМОМОЛОТОВ В КОМБИНИРОВАННОМ УСТРОЙСТВЕ

Лабораторные испытания экспериментального устройства с возможностью настройки частоты ударов одного из пневматических молотов выполнены путем забивания вертикальной трубы в грунт. Амплитуда осевого ударного воздействия на стальную трубу диаметром 48 мм измерялась тензометром, наклеенным на вставной элемент, который калибровался при усилии до 50 кН на гидравлическом стенде. Лабораторный образец комбинированного устройства собран по схеме генератора ударных импульсов (рис. 1). Он объединил два пневмомолота с равными по массе (4 кг) ударниками, установленными на одной оси с забиваемой в грунт трубой с помощью специального трубчатого соединительного устройства [9]. Продолжительность рабочего цикла первого пневмомолота T_1 постоянна и равна 0.1 с, что соответствует частоте ударов 10 Гц. Второй пневмомолот за счет настройки продолжительности рабочего цикла по команде оператора мог изменять частоту ударов непосредственно в процессе забивания трубы. Вследствие этого появилась возможность подстраивать величину фазы δ между амплитудами импульсов до полного совпадения моментов импульсного воздействия (рис. 5).

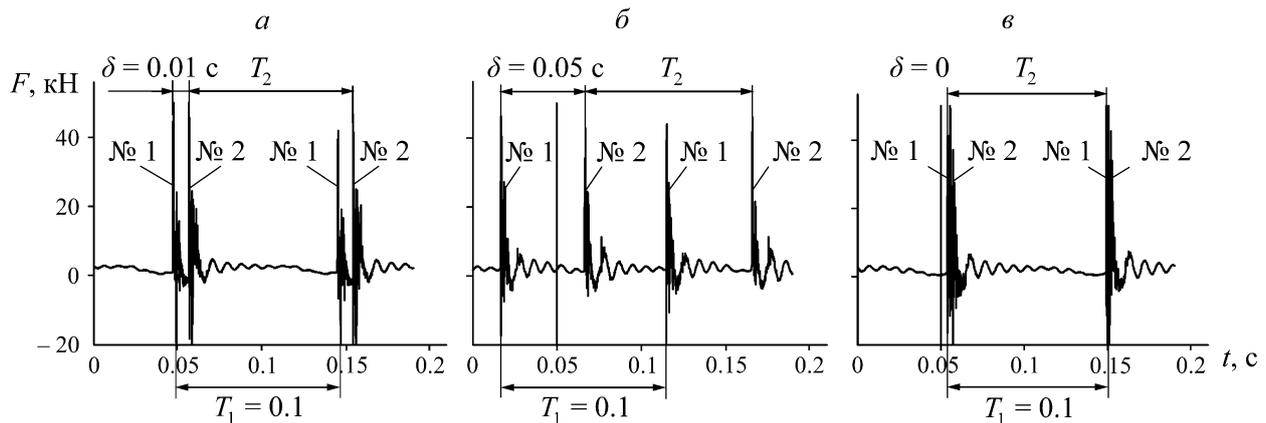


Рис. 5. Продольные импульсы силового воздействия, полученные при испытании экспериментального комбинированного устройства с плавной настройкой частоты второго пневмомолота: *а* — $\delta = 0.01$ с; *б* — $\delta = 0.05$ с; *в* — $\delta = 0$ (одновременное импульсное воздействие)

Полученные свойства пневмомолота с непрерывным изменением частоты ударов дают новые возможности для совершенствования импульсной системы, состоящей из пневмомолота, погружаемого элемента и грунта. Достигнута более высокая скорость погружения в грунт конструктивных строительных элементов. Обеспечена синхронизация движения двух ударников в источнике ударных импульсов, состоящем из двух пневмомолотов, и полное совпадение ударов. Для наблюдения оператором за силовыми импульсами, генерируемыми в трубе, и коррекции фазового смещения импульсов требуется электронная измерительная система.

ПНЕВМОМОЛОТ С МЕХАНИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ ДВУХ УДАРНЫХ МАСС В ОДНОМ КОРПУСЕ

Обеспечить стабильное и полное совпадение ударов в комбинированном модуле из двух пневмомолотов — сложная техническая задача ввиду отсутствия прямой обратной связи между двумя ударниками, расположенными в разных корпусах. Предположим, что стабильная синхронизация будет достигнута в устройстве с надежной системой воздухораспределения и двумя ударниками, поочередно совершающими удары с постоянным фазовым сдвигом и через одинаковые временные промежутки, равные периоду рабочего цикла. Такое устройство должно иметь общий корпус и систему постоянной обратной связи между ударниками (рис. 6).

Наиболее подходящей для этих целей является клапанная схема воздухораспределения, реализованная в пневмомолотах с переменной структурой ударной мощности [2]. Ее преимущества подтверждены на практике при создании устройств ударного действия в широком спектре массогабаритных показателей, начиная от лабораторных моделей с массой ударников 0.5–8.0 кг и заканчивая промышленными образцами с энергией единичного удара 0.4–8.5 кДж. Для всех машин этого типоразмерного ряда характерна высокая экономичность, один из самых низких среди подобных импульсных устройств удельный расход энергоносителя на единицу энергии удара $(0.22 \div 0.37) \cdot 10^{-4}$ м³/Дж.

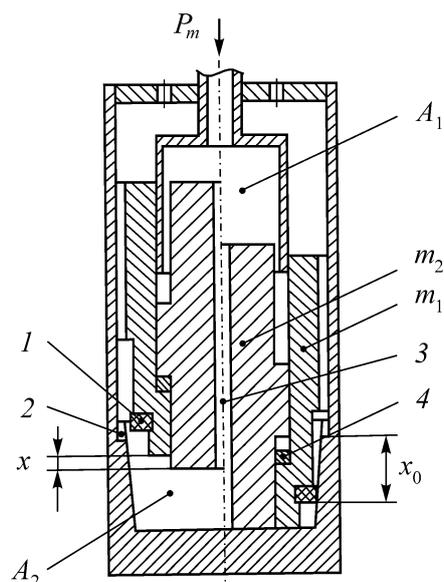


Рис. 6. Принципиальная схема пневмоударного устройства с разделенным ударником: A_1 , A_2 — камера рабочего и холостого хода; m_1 , m_2 — масса внешней и внутренней частей ударника; x_0 — рабочий ход ударника; x — смещение внутренней части ударника; 1 — упругий кольцевой клапан; 2 — ограничитель обратного хода; 3, 4 — сквозное и регулировочное кольцо

Принципиальная схема пневмомолота с разделенным на две части ударником, имеющим ходовую посадку по ступенчатой цилиндрической поверхности, показана на рис. 6. Она включает камеры A_1 , A_2 , а также ударные массы m_1 , m_2 . Под действием давления P_m массы m_1 и m_2 одновременно перемещаются до упора. Расстояние от места контакта упругого кольцевого клапана 1 с внутренней конической поверхностью до ограничителя обратного хода 2 определяет рабочий ход ударника. По сквозному отверстию 3 сжатый воздух поступает в камеру холостого хода. Размер выступа передней торцевой поверхности x регулируется толщиной кольца 4 и определяет фазовое смещение между моментами поочередных ударов частей ударника [11–13]. Для правильной работы устройства необходимо, чтобы движение его ударных масс m_1 и m_2 происходило без отрыва в месте образования ступеней, в котором установлено регулировочное кольцо 4. Только после удара внешней части m_2 происходит их временный отрыв друг от друга.

Результаты испытаний пневмомолота с разделенным ударником подтвердили возможность внесения структурных изменений в характер периодического импульсного воздействия [11]. Для получения фактических количественных показателей необходимо проведение экспериментальных исследований по определению влияния настраиваемых параметров пневмомолота с разделенным ударником на скорость продвижения инструмента или трубы в грунтах.

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ СКОРОСТИ ПОГРУЖЕНИЯ ТРУБЫ В ГРУНТ

В лабораторных условиях изготовлен вертикальный грунтовый канал, наполненный влажной супесью (15%). После погружения на планируемую глубину 2.5 м труба извлекалась с помощью грузоподъемного механизма, полученная скважина заполнялась супесью с периодическим уплотнением через каждые 0.2 м. Следующее погружение трубы проводилось на расстоянии не менее 0.3 м от предыдущей скважины. Схема эксперимента показана на рис. 7, об-

ший вид — рис. 8. В качестве генератора ударных импульсов использован пневмомолот 2 с разделенным ударником, смонтированный на задний торец трубы 1 через резьбовой переходник 6, имеющий конус для соединения с конической поверхностью пневмомолота. Для надежного крепления пневмомолота к трубе применено стяжное устройство 3 с талрепами. Гравитационный пригруз 7 массой 62 кг компенсировал силу отдачи пневмомолота.

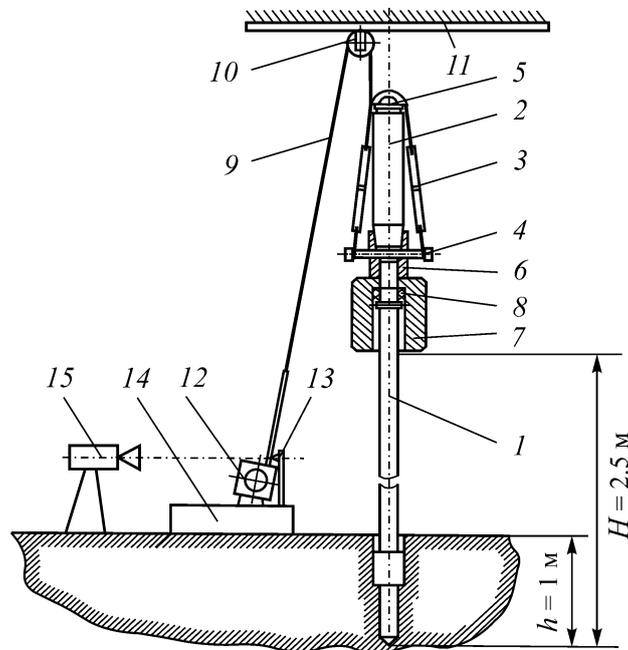


Рис. 7. Схема эксперимента: 1 — труба; 2 — пневмомолот; 3 — стяжное устройство; 4 — палец; 5 — прижим; 6 — переходник; 7 — пригруз; 8 — резиновое кольцо; 9 — шнур; 10 — блок; 11 — рама; 12 — рулетка; 13 — стрелка; 14 — опора; 15 — видеокамера

Конструкция крепления обводного блока 10 на жесткой раме 11 обеспечила вертикальное положение шнура 9, закрепленного за прижим 5 пневмомолота 2, при каждом погружении трубы 1. Движение измерительной ленты рулетки 12 относительно стрелки 13 в непрерывном режиме фиксировалось видеокамерой 15 марки SONY HDR-TD20E.

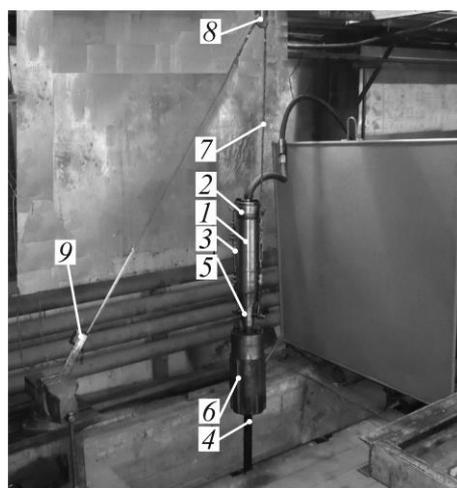


Рис. 8. Общий вид эксперимента по определению скорости погружения трубы в грунтовый канал: 1 — пневмомолот; 2 — прижим; 3 — стяжное устройство; 4 — труба; 5 — переходник; 6 — пригруз; 7 — шнур; 8 — блок; 9 — рулетка

Пневмомолот настроен на четыре варианта смещения вперед внутренней центральной части ударника m_2 (рис. 6, $x=0, 1, 2$ и 4 мм). Диаграммы импульсов продольной силы, возникающей в забиваемой трубе, для этих вариантов приведены на рис. 9.

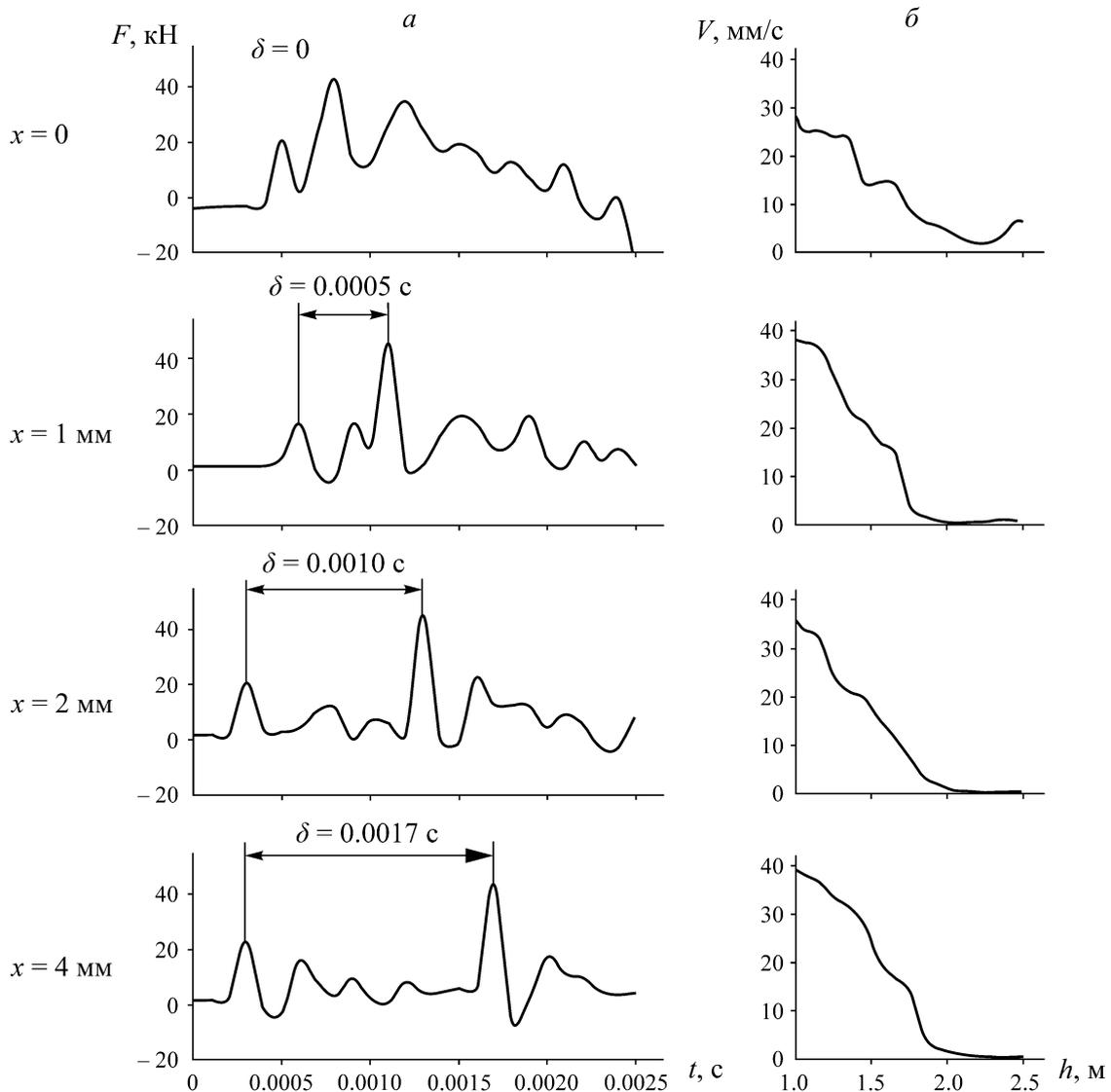


Рис. 9. Диаграммы импульсов продольной силы в трубе F (а) и графики скорости погружения трубы в грунт V (б): x — смещение внутренней (центральной) части ударника относительно внешней (периферийной); t — время; δ — фазовое смещение двух ударов

Труба с закрепленным пневмомолотом и пригрузом устанавливалась на грунт вертикально в предварительно изготовленную скважину меньшего диаметра, чем наружный диаметр трубы. Для уменьшения силы отдачи в пневмомолот сначала подавался сжатый воздух при сниженном до $0.3-0.4$ МПа давлении. По мере заглубления трубы и ее сцепления с грунтом давление воздуха постепенно увеличивалось и достигало стандартного значения 0.6 МПа при глубине погружения $0.7-0.8$ м. Начиная с глубины 1.0 до 2.5 м неподвижно установленной видеокамерой в непрерывном режиме фиксировалось движение измерительной ленты рулетки. Обработка видеоматериала осуществлялась с помощью программы PlayMemories Home (Sony). Результаты представлены на рис. 10.

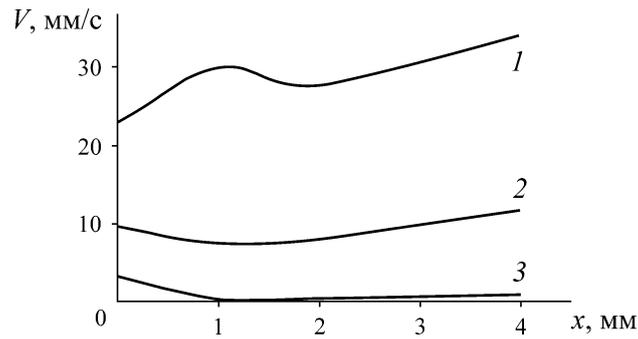


Рис. 10. Средняя скорость погружения трубы в зависимости от смещения центральной части ударника на трех участках глубины погружения: 1 — 1.0–1.5; 2 — 1.5–2.0; 3 — 2.0–2.5 м

На глубине погружения трубы с 1.0 до 1.5 м (участок погружения 1, рис. 10) наблюдается рост скорости до 33 мм/с при увеличении смещения центральной части ударника. Это объясняется малыми силами сопротивления грунта внедрению трубы как от удара сначала центральной части ударника, так и его периферийной части. С увеличением глубины погружения от 1.5 до 2.0 м наблюдается уменьшение скорости при одновременном увеличении смещения центральной части ударника от 0 до 1 мм. Затем происходит стабилизация и незначительное увеличение скорости (участок погружения 2). На глубине погружения с 2.0 до 2.5 м силы сопротивления грунта внедрению трубы возрастают настолько, что при любом из рассмотренных смещений центральной части ударника, вызывающих поочередные удары обеих частей, наблюдается технологический отказ от погружения (участок погружения 3). И только одномоментный удар при нулевом смещении двух частей, аналогичный удару неразделенного ударника, обеспечивает процесс погружения трубы в грунт со скоростью 3.3 мм/с.

ВЫВОДЫ

Создан прототип пневмомолота с двумя ударными массами, движение которых синхронизировано в одном корпусе. Конструкция обеспечивает настройку частоты и фазы двух ударов в широком диапазоне.

Одномоментное нанесение ударными массами двух ударов способствует наибольшей производительности процесса погружения трубы в грунт при высоком уровне энергонасыщенности ударного воздействия, что подтверждает актуальность проводимых исследований и создания устройств, в которых объединены и синхронизированы по меньшей мере два пневмомолота.

Увеличение фазового смещения двух ударов не менее чем на 0.5–1.0 мс сопровождается положительным эффектом и ростом скорости погружения до 120 м/ч за счет повышения частоты воздействия на забой в слабоуплотненных грунтах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурков К. С., Климашко В. В., Костылев А. Д., Плавских В. Д., Русин Е. П., Смоляницкий Б. Н., Тупицын К. К., Чепурной Н. П. Пневмопробойники. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 1990. — 217 с.
2. Смоляницкий Б. Н., Тищенко И. В., Червов В. В. Перспективы совершенствования пневмомолотов для специальных строительных работ // ФТПРПИ. — 2009. — № 4. — С. 65–75.

3. Хестле Х. Справочник строителя. Строительная техника, конструкции и технологии. — М.: Техносфера, 2007. — 520 с.
4. Верстов В. В., Гайдо А. Н. Исследование сравнительной эффективности заглубления стального шпунта в плотный грунт // Механизация стр-ва. — 2013. — № 2. — С. 44–49.
5. Цыгович Н. А. Механика грунтов. — М.: Высш. шк., 1979. — 272 с.
6. Бауман В. А., Быховский И. И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. — М.: Высш. шк., 1977. — 255 с.
7. Востриков В. И., Опарин В. Н., Червов В. В. О некоторых особенностях движения твердых тел при комбинированных виброволновом и статическом воздействиях // ФТПРПИ. — 2000. — № 6. — С. 5–11.
8. А. с. 610991 СССР. Расширитель скважин / Н. А. Беляев, Н. Н. Есин // Оpubл. в БИ. — 1972. — № 22. — 2 с.
9. Пат. 2535316 РФ. Устройство для забивания стержневого элемента в грунт / В. В. Червов, И. В. Тищенко, А. И. Горелов // Оpubл. в БИ. — 2014. — № 34. — 9 с.
10. Ануриев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя. Т. 1. — М.: Машиностроение-1, 2006. — 928 с.
11. Тищенко И. В., Червов В. В. Основы создания пневмомолота с разделенным ударником для погружения стержней в грунтовый массив // ФТПРПИ. — 2018. — № 6. — С. 75–86.
12. Ajibose O. K., Wierdgroch M., Karolyi G. Y., Pavlovskaja E. E., and Akisanya A. R. Dynamics of the drifting impact oscillator with new model of the progression phase, J. App. Mech., 2012, Vol. 79, 061007. — 9 p.
13. Pavlovskaja E. E., Hendry C. D., and Wiercigroch M. Modelling of high frequency vibro-impact drilling, Int. J. Mech. Sci., 2015, Vol. 91. — P. 110–119.

Поступила в редакцию 21/ХП 2020

После доработки 13/І 2021

Принята к публикации 15/І 2021