

## ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 621.23.05

### ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯ И КОМБИНАЦИИ ВИБРОУДАРНЫХ УСТРОЙСТВ НА СКОРОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ ТРУБЫ В ГРУНТ ПРИ ПРОКАЛЫВАНИИ

**И. В. Тищенко, В. В. Червов, А. И. Горелов**

*Институт горного дела СО РАН,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Рассмотрена проблема повышения производительности виброударного погружения в грунт стальных трубчатых элементов. Приведены результаты экспериментального моделирования процесса с последовательным подключением к источнику импульсной нагрузки дополнительных вибровозбудителей с осевым и поперечным направлением колебаний. Показана возможность использования в качестве силового возбудителя комбинированного генератора из двух устройств ударного действия с расширенным спектром воздействия.

*Генератор ударного воздействия, импульсная установка, вибровозбудитель, продольные и поперечные колебания, амплитуда ударного импульса, частота ударов, скорость погружения*

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Специальные работы, связанные с погружением в упругопластичную грунтовую среду различных металлических профилей и конструкций ударными и вибрационными методами, являются важным неотъемлемым элементом современного строительного комплекса. За последние годы их объемы неуклонно растут, что обусловлено сложной и насыщенной инфраструктурой современных мегаполисов, а также ужесточением экологических требований по сохранению существующего природного ландшафта. В перечень таких работ входит прокладка трубожухов виброударным прокалыванием и продавливанием при бестраншейном способе сооружения подземных коммуникаций, забивка шпунта при укреплении откосов котлованов, насыпей, возведении подпорных стенок и экранов, вертикальное погружение трубчатых элементов с получением набивных свай под фундаменты зданий, опор мостов, эстакад, линий электропередач. Для их проведения в настоящее время используется широкая гамма устройств ударного действия и вибропогружателей, работающих на различных видах энергоносителя, в том числе и на сжатом воздухе [1].

Результаты выполненных ранее в ИГД СО РАН исследований свидетельствуют о том, что перспективным направлением интенсификации технологического процесса погружения является создание устройств с расширенным частотным диапазоном ударного воздействия при условии

обеспечения ими требуемого порогового значения энергии единичного удара, необходимого для преодоления сопротивления породного массива [2, 3]. При этом энергетическая составляющая генератора затрачивается на формирование силового импульсного воздействия, амплитуда которого зависит от геометрических размеров погружаемого элемента и сопротивляемости грунтовой среды, а также на упругую и пластическую деформацию грунта, которая напрямую связана с величиной полного перемещения забоя за один цикл его нагружения [4].

Исследования в области механики грунтов показывают, что вибрационное воздействие на породный массив вызывает уменьшение сопротивления грунтовых слоев сдвигу, а при определенной частоте колебаний коэффициент внутреннего трения способен снижаться настолько, что грунты приобретают свойства вязкой жидкости (вибровязкость) и резко теряют свою несущую способность [5, 6]. При известных условиях в зоне контакта возможно проявление эффекта “аномально низкого трения”, что существенно влияет на скорость движения твердого тела в среде [7].

Указанные факторы могут служить предпосылками для увеличения производительности виброударных технологий. Для дальнейшего обоснования критериев их эффективности и условий возможной практической реализации проведен цикл экспериментальных исследований. Их цель — проверка возможности повышения производительности виброударного погружения в упругопластическую грунтовую среду трубчатых стальных профилей путем последовательного присоединения к системе “грунт–забиваемый элемент–генератор импульсов” дополнительного источника вибрационной нагрузки с осевым и поперечным направлением колебаний, а также использования в качестве силового генерирующего модуля комбинированного возбудителя из двух устройств ударного действия с расширенным спектром воздействия как по энергетическим и частотным параметрам, так и по способу передачи полезной нагрузки на рабочий инструмент.

#### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Согласно поставленной задаче, эксперименты выполнялись в два этапа. На первом моделировался процесс продвижения стального элемента в грунте под действием основной ударной и дополнительной вибрационной нагрузки (рис. 1). На втором этапе исследовалось применение комбинированного генератора импульсов, состоящего из двух пневмомолотов с различными энергетическим и частотным параметрами (рис. 2).

В качестве тел, внедряемых в грунтовую среду, использовались стальные сборные трубные плети 1 (рис. 1, 2), состоящие из двух секций с наружным диаметром 50 мм — в первой серии опытов и 33 мм — во второй, свинчиваемых резьбовыми муфтами. Взаимодействующие с грунтом головные части труб длиной по 1.9 м оснащались коническими наконечниками с углом при вершине  $60^\circ$ . На противоположных концах последних секций устанавливались импульсные генераторы, представляющие собой сочетание ударного модуля 2 с осевым вибровозбудителем 3 (рис. 1а) или комбинацию из двух пневмомолотов 2, 3 в продольной компоновке (рис. 2а). Соединительными узлами в обоих случаях служили полые переходные капсулы 7 с необходимыми внутренними размерами, обеспечивающими размещение внутри них элементов силовых систем. Для фиксации пневмомолотов относительно забиваемых труб использовались конические насадки и стяжные устройства 8.

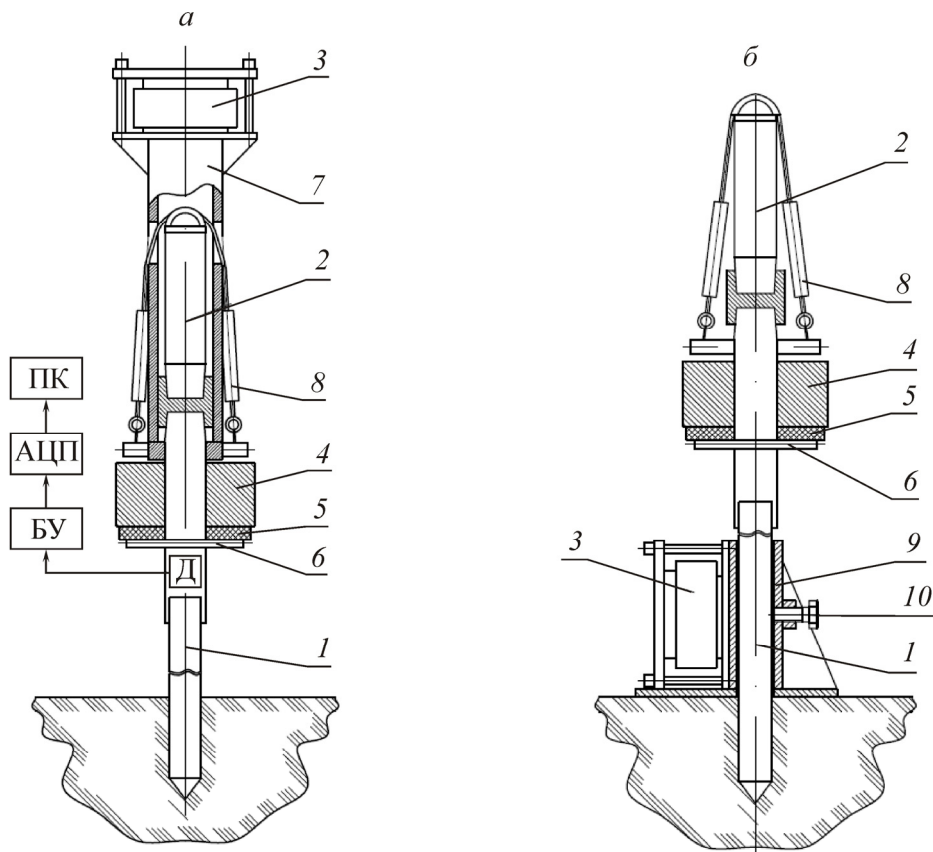


Рис. 1. Схема эксперимента с ударным устройством и дополнительным осевым (а) и поперечным (б) вибровозбудителем: 1 — труба; 2 — ударный модуль; 3 — вибровозбудитель; 4 — гравитационный пригруз; 5 — демпфер; 6 — шкворень; 7 — переходная капсула; 8 — стяжное устройство; 9 — зажимной механизм; 10 — регулировочный винт; Д — датчик силы; БУ — блок усилителей; АЦП — преобразователь сигнала; ПК — компьютер

В ходе экспериментов предусматривалось изменение направления воздействия дополнительных источников вибрационной и ударной нагрузки с продольного на поперечное. Для этого как вибратор (рис. 1б), так и пневмомолот (рис. 2б) устанавливались у входного устья образцовой скважины в перпендикулярном к оси трубы направлении и соединялись с ней при помощи зажимных механизмов 9, расположенных на основаниях со сквозными осевыми каналами. Необходимое прижатие зажимов к боковой поверхности трубчатого элемента подбиралось регулировочными винтами 10.

Дополнительное статическое усилие в осевом направлении создавалось набором пригрузов 4 общей массой от 25 до 100 кг. Передача нагрузки осуществлялась через промежуточный демпфирующий элемент 5 и шкворень 6, входящий в поперечное отверстие погружаемой трубы.

Измерительная часть стенов включала: тензометрические датчики Д в виде отрезков труб диаметром 50 и 33 мм и длиной 300 и 250 мм соответственно (рис. 1а, 2а) с наклеенными на их наружную поверхность тензорезисторами [8, 9], блок усилителей электрического сигнала БУ, цифровой преобразователь АЦП, соединенный с персональным компьютером ПК. Калибровка регистрирующего канала в единицах силы проводилась с помощью гидравлического пресса, оснащенного образцовым манометром класса 04. Установка датчика на трубную плетвь выполнялась при помощи резьбовых соединений.

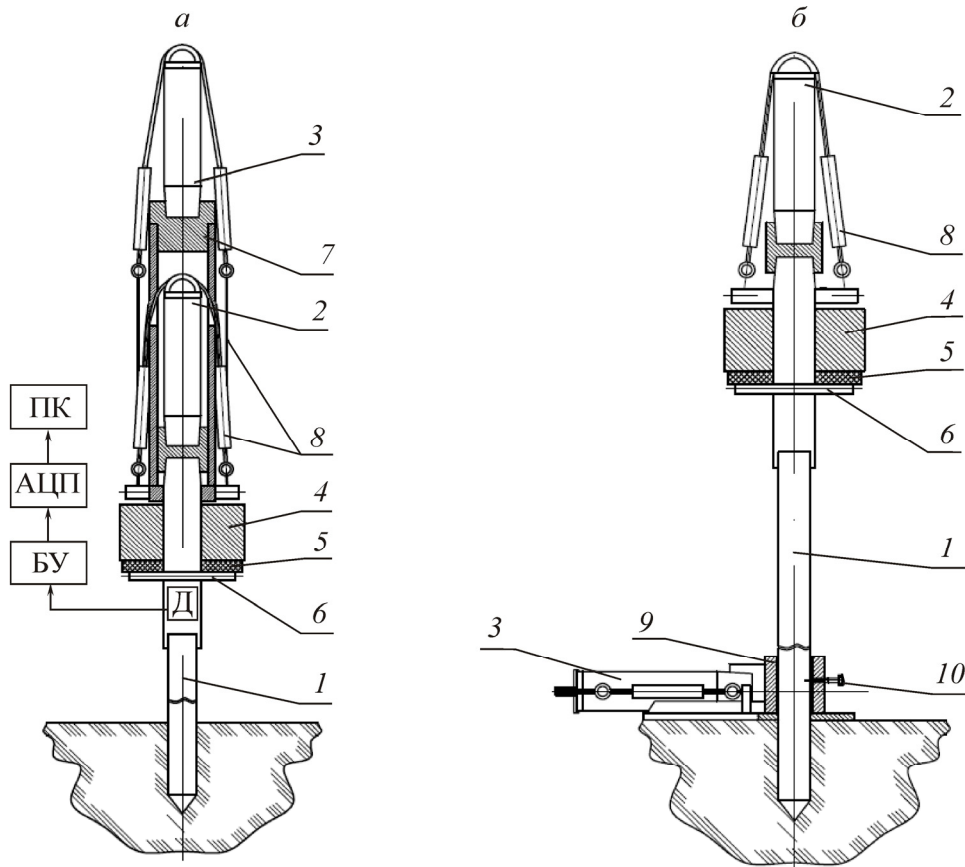


Рис. 2. Схема эксперимента с комбинированным генератором из двух устройств ударного действия при продольной (а) и продольно-поперечной (б) компоновке: 1 — труба; 2, 3 — ударные модули; 4 — гравитационный пригруз; 5 — демпфер; 6 — шкворень; 7 — переходная капсула; 8 — стяжное устройство; 9 — зажимной механизм; 10 — регулировочный винт; Д — датчик силы; БУ — блок усилителей; АЦП — преобразователь сигнала; ПК — компьютер

В качестве генераторов ударных импульсов использовались различные модели пневматических устройств с массами ударников 1–4 кг, выполненных по единой схеме воздухораспределения с упругим клапаном в камере обратного хода, положенной в основу конструкции всех пневмомолотов “Тайфун” [10]. Их основные технические характеристики приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Технические характеристики моделей пневмомолотов

Параметр	Вариант исполнения модели			
	“Тайфун-1”	“Тайфун-1-2.4”	“Тайфун-2”	“Тайфун-4”
Масса ударной части, кг	1	1	2	4
Рабочее давление, МПа	0.6	2.4	0.6	0.6
Расчетная предупредарная скорость, м/с	4.24	4.19	4.12	4.18
Энергия удара, Дж	9	10	17	35
Частота ударов, Гц	13.5	43.5	6.4	13.8
Сила отдачи, кН	0.23	0.92	0.23	1.20
Габаритные размеры корпуса, мм:				
диаметр	40	40	40	90
длина	355	360	620	460

Источником дополнительного вибрационного воздействия служил пневматический мембранный вибровозбудитель типа “Напор” конструкции лаборатории вибротехники ИГД СО РАН. Его технические параметры представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Технические характеристики вибровозбудителя

Параметр	“Напор-01-05”
Масса вибровозбудителя, кг	7
Диапазон рабочего давления, МПа	0.3 – 0.6
Эффективная вынуждающая сила, кН	1.7
Максимальная частота колебаний, Гц	90
Расход сжатого воздуха, м <sup>3</sup> /мин	1.2

Грунтовая среда представляла собой плотную супесчаную смесь естественного залегания с пониженной влажностью, уровень которой составлял менее 10 %.

Перед началом каждого эксперимента осуществлялся ряд необходимых подготовительных операций:

- организация лидерной скважины глубиной 0.5 м от поверхности грунтового основания для вертикального направления трубной плети;
- предварительное внедрение головной части трубы длиной 1.9 м;
- присоединение второй секции, монтаж датчика усилий, установка вертикальной линейки длиной 2.0 м с ценой деления шкалы 1 мм для непрерывного контроля глубины погружения.

Процесс внедрения трубной плети экспериментальными ударно-импульсными установками (рис. 3, 4) фиксировали на видеокамеру марки SONY HDR-SR10E, что позволяло после покадровой обработки полученного видеоклипа с помощью компьютерной программы Picture Motion Browser определять время и рассчитывать среднюю скорость погружения элемента на каждом контрольном отрезке длиной 0.1 м. Регистрация результатов измерений начиналась с отметки 2 м и заканчивалась при достижении глубины 4 м — в первой серии опытов и 3.4 м — во второй.



Рис. 3. Погружение трубы диаметром 50 мм пневмомолотом “Тайфун-4” и вибровозбудителем “Напор-01-05” с осевым (а) и поперечным (б) направлением колебаний



Рис. 4. Погружение трубы диаметром 33 мм пневмомолотами “Тайфун-2” и “Тайфун-1” с соосной компоновкой (а); пневмомолотами “Тайфун-2” и “Тайфун-1-2.4” при продольно-поперечной их установке (б)

По завершении эксперимента проводился демонтаж силового и измерительного оборудования, а забитая труба извлекалась из грунта с помощью имеющейся кран-балки грузоподъемностью 2 т.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На первом этапе исследования моделировался процесс внедрения трубчатого элемента с внешним диаметром 50 мм экспериментальной установкой, состоящей из устройства ударного действия “Тайфун-4” и осевого вибратора “Напор-01-05” (рис. 3а). Величина приложенной статической нагрузки в ходе проведения данной серии опытов не изменялась и составляла  $G = 1$  кН, что позволяло компенсировать силу отдачи модели пневмомолота, равную  $F_0 = 1.2$  кН (табл. 1). На рис. 5 представлены диаграммы силовых импульсов, формируемых в погружаемой трубной плети при различных вариантах сочетания внешнего периодического ударного и вибрационного воздействия.

При работе только одного пневмомолота, снабженного ударником массой  $m_y = 4$  кг, наносящим удары с энергией  $E = 35$  Дж и частотой  $f = 13.8$  Гц, в трубе генерировался ударный импульс с максимальной амплитудой силы  $F_{\max} = 55 - 60$  кН (рис. 5а). Такой уровень внешнего воздействия являлся достаточным для преодоления лобового и бокового сопротивления грунтового массива внедряемым рабочим инструментом с заданными линейными размерами. При этом скорость перемещения трубной плети в зависимости от глубины ее внедрения варьировала в пределах  $V = (1.5 - 4.8) \cdot 10^{-3}$  м/с (кривая 1 на рис. 6).

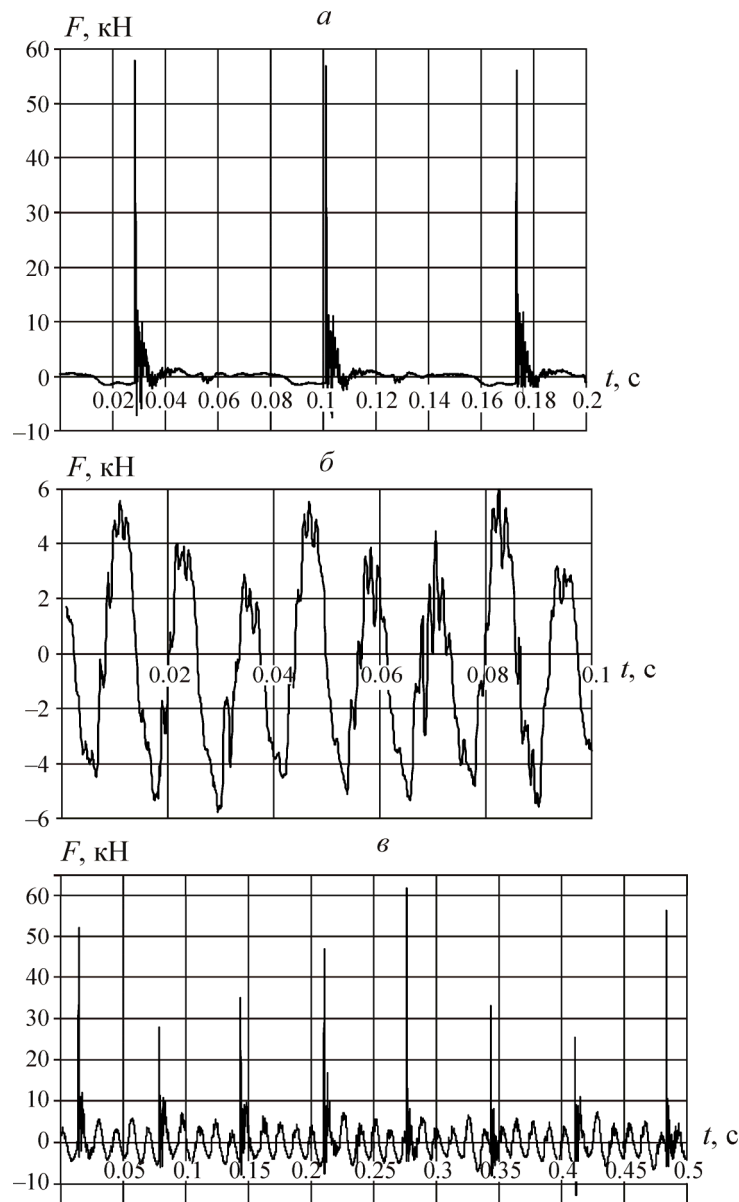


Рис. 5. Диаграммы силовых импульсов в трубной плети диаметром 50 мм при различных способах воздействия: пневмомолотом “Тайфун-4” (а); вибратором “Напор-01-05” (б); комбинированным ударно-вибрационным с осевым направлением колебаний (в)

Включение в работу только одного осевого вибратора с максимальной развиваемой возмущающей силой  $F_{\max} = 5 - 6$  кН и частотой  $f = 90$  Гц (рис. 5б), действующей в направлении как сжатия трубы (положительные значения), так и ее растяжения (отрицательные значения), сопровождалось возвратно-поступательными колебаниями трубного элемента и отсутствием его углубления в грунтовой массив. Очевидно, что такой нагрузки недостаточно для разрушения связей между частицами грунта в забойной зоне. Дальнейшее увеличение веса гравитационного пригруза и повышение мощности вибровозбудителя нецелесообразно, так как метод вибропогружения эффективен только в малосвязных песках и обводненных глинах, что ограничивает область его применения [6]. Поэтому в следующей серии опытов проведена оценка вибрационного воздействия как дополнительного к основному ударному способу нагружения трубной плети.

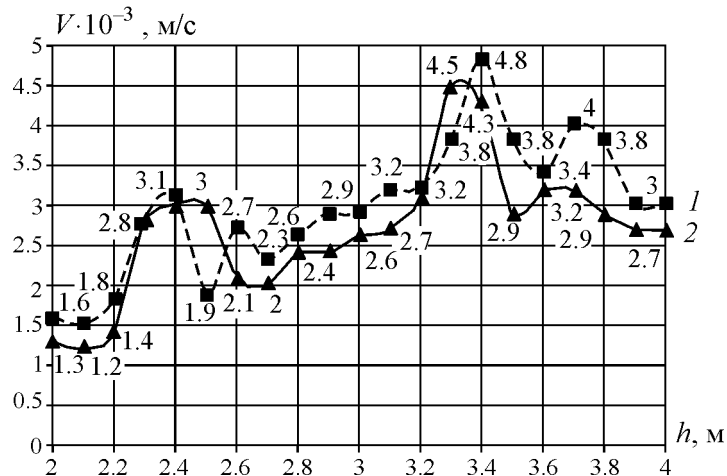


Рис. 6. Изменение скорости внедрения трубной плети диаметром 50 мм при различных способах воздействия: 1 — пневмомолотом “Тайфун-4”; 2 — пневмомолотом “Тайфун-4” и поперечным вибратором

Установлено, что одновременное воздействие пневмомолота и вибровозбудителя с колебаниями, направленными вдоль оси трубы, приводило к резкому падению скорости ее поступательного перемещения с последующей полной остановкой процесса. Так, на рис. 5в видно, что приложение дополнительной вибрационной нагрузки приводит в большинстве случаев к периодическому неконтролируемому снижению амплитуды ударных импульсов с необходимого порогового уровня  $F_{\max} = 55 - 60$  кН до значения  $F_{\max} = 25 - 35$  кН, что нарушает условия разрушения грунта и преодоления его лобового сопротивления применяемым рабочим инструментом за каждый наносимый удар. Такая картина может наблюдаться в случае, когда работа вибратора вызывает значительное снижение трения внедряемого тела о боковые стенки скважины, сопровождающееся движением трубы в сторону от забойной зоны как за счет возмущающей силы самого виброисточника, периодически меняющего вектор своего действия в направлении, противоположном забиванию трубного элемента, так и под действием силы отдачи пневмомолота. Возникающий при этом отрыв наконечника от забоя разгружает трубную плеть и резко снижает эффективность ударного воздействия, что отрицательно влияет на производительность всего процесса. Для компенсации такого побочного эффекта целесообразно предусматривать соответствующее увеличение внешней статической силы, что на практике не всегда возможно по условиям прочности погружаемого элемента и ограничениям, накладываемым специфическими технологическими особенностями рассматриваемого метода погружения.

Далее изменялось направление колебаний виброисточника с осевого на поперечное (см. рис. 3б). Однако такой вариант совместного воздействия пневмомолота с продольным вектором ударных импульсов и вибратора, действующего в плоскости, перпендикулярной оси трубы, не привел к положительным изменениям скоростного режима продвижения трубной плети в грунтовом массиве (кривая 2 на рис. 6) по сравнению с работой только одной машины “Тайфун-4” (кривая 1 на рис. 6).

На втором этапе исследования труба диаметром 33 мм погружалась в грунт комбинированным ударным модулем, состоящим из пневмомолотов “Тайфун-1” и “Тайфун-2”, скомпонованных по соосной схеме (рис. 4а). Величина необходимого статического напорного усилия задавалась на уровне  $G = 0.25$  кН, что позволяло уравнивать максимальную силу отдачи моделей, составляющую  $F_0 = 0.23$  кН (см. табл. 1).



Результаты экспериментов приведены на рис. 7 в виде диаграмм силовых импульсов. Анализ первых двух зависимостей показывает, что несмотря на разницу в структуре ударной мощности источников периодической нагрузки (табл. 1), ее амплитуда поддерживается в пределах  $F_{\max} = 15 - 21$  кН как при  $E = 9$  Дж,  $f = 13.5$  Гц (рис. 7а), так и при  $E = 17$  Дж,  $f = 6.4$  Гц (рис. 7б). Такой уровень силового воздействия обеспечивал преодоление сопротивления грунтового массива данным трубчатым элементом и его поступательное перемещение.

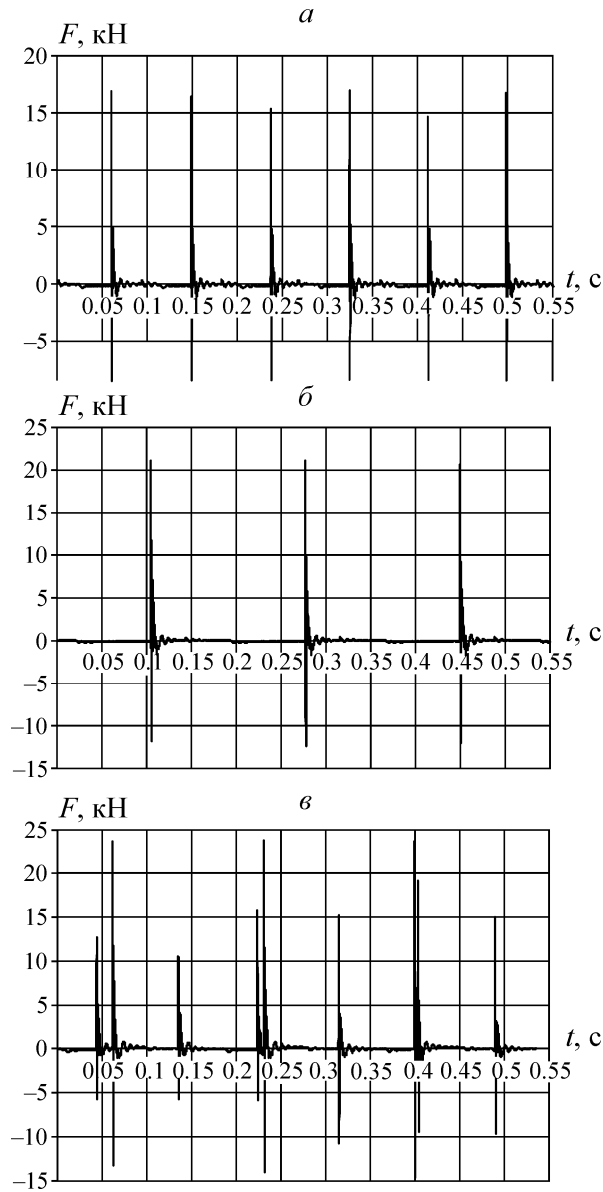


Рис. 7. Диаграммы силовых импульсов в трубной плети диаметром 33 мм при различных способах воздействия: пневмомолотом “Тайфун-1” (а); пневмомолотом “Тайфун-2” (б); совместной работой двух устройств с продольным направлением ударов (в)

Одновременное включение в работу двух устройств ударного действия с несинхронизированными временными частотными интервалами несколько изменяет картину моделируемого процесса (рис. 7в). Так, значения амплитуд ударных импульсов колеблются в больших пределах: от  $F_{\max} = 11$  кН до  $F_{\max} = 24$  кН, а суммарная результирующая частота силового воздейст-

вия приобретает переменные значения. Очевидно, что такие изменения связаны с параллельным воздействием на погружаемый элемент сразу двух несинхронизированных между собой импульсных источников, удары которых могут как совпадать, так и наноситься через различные промежутки времени.

Обработка материалов видеосъемки позволила получить картину перемещения забиваемой трубной плети и вычислить средние значения скоростей на каждом контрольном интервале. Результаты представлены на рис. 8. Их анализ показывает, что по своей форме кривые скоростей качественно не отличаются друг от друга, а их значения на протяжении каждого промежуточного отрезка пути определяются изменением сопротивления грунтового массива при погружении рабочего органа в грунт с отметки  $h = 2$  м до  $h = 3.4$  м.

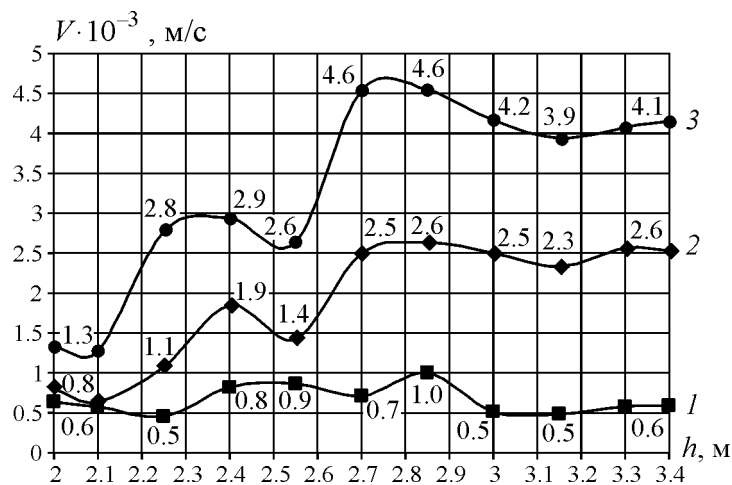


Рис. 8. Изменение скорости внедрения трубной плети диаметром 33 мм при различных способах воздействия: 1 — пневмомолотом “Тайфун-1”; 2 — пневмомолотом “Тайфун-2”; 3 — совместной работой двух ударных устройств с продольным направлением ударов

Сравнение скоростных показателей на кривых 1 и 2 (рис. 8) свидетельствует о том, что обе модели ударных устройств имеют энергетические параметры, достаточные для разрушения забоя и дальнейшего перемещения трубной плети. Причем включение в работу устройства с массой ударника  $m_y = 2$  кг и энергией  $E = 17$  Дж (кривая 2) дает более чем двукратный рост скорости движения системы по сравнению с первым вариантом ее нагружения моделью с  $m_y = 1$  кг,  $E = 9$  Дж (кривая 1).

Одновременная работа сразу двух несинхронизированных между собой устройств ударного действия, попеременно и совместно наносящих удары с энергией  $E = 9$  Дж,  $E = 17$  Дж, частотой  $f = 13.5$  Гц,  $f = 6.4$  Гц, мощностью  $N = 121.5$  Вт и  $N = 108.8$  Вт соответственно, сопровождается суммарным повышением ударной мощности всего модуля до  $N = 230.3$  Вт. Такое увеличение полезной нагрузки на трубную плеть приводит к росту скорости ее перемещения в грунтовом массиве (кривая 3 на рис. 8). При этом приращение скоростных показателей на каждом контрольном отрезке представляет собой не простое сложение соответствующих величин от каждой машины в отдельности (кривые 1, 2), а превышает их суммарные значения в 1.1–1.8 раз. Этот положительный фактор свидетельствует об улучшении условий взаимодействия элементов системы “грунтовой массив–забиваемый элемент–источник ударной нагрузки”, что выражается в более эффективной разработке забоя вследствие уменьшения сопротивления грунтовых слоев сдвигу за счет ослабления сцепления между частицами грунта и снижения коэффициента его

внутреннего трения. В результате увеличивается величина перемещения рабочего инструмента за каждый ударный импульс, что в совокупности с ростом частоты ударов обеспечивает повышение производительности всего технологического процесса.

В дальнейшем моделировался вариант перевода источника дополнительной импульсной нагрузки с продольного на поперечное расположение по отношению к оси погружаемого элемента (см. рис. 4б). При этом использовалась модель пневмомолота “Тайфун-1-2.4” с ударником массой  $m_y = 1$  кг, рассчитанная на рабочее давление  $p = 2.4$  МПа и имеющая наибольшую в данном классе машин частоту ударов  $f = 43.5$  Гц при сохранении их энергии на уровне  $E = 10$  Дж (см. табл. 1).

Полученные скоростные характеристики процесса (рис. 9) подтверждают тот факт, что совокупное приложение к трубе основных продольных и дополнительных поперечных ударных импульсов приводит, начиная с отметки  $h = 2.3$  м, к устойчивому повышению интенсивности продвижения рабочего инструмента в грунте в 1.1 – 1.5 раз (кривая 2) по сравнению с традиционным способом нагружения системы только одним пневмомолотом, установленным вдоль оси погружаемого элемента (кривая 1). Это, безусловно, свидетельствует об уменьшении сопротивляемости грунтового массива в зоне его контакта с внедряемым телом при проколе.

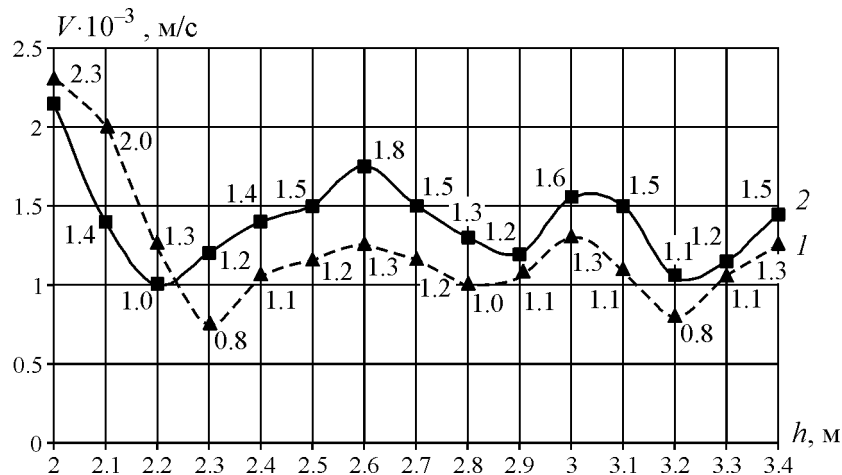


Рис. 9. Изменение скорости внедрения трубной плиты диаметром 33 мм при различных способах воздействия: 1 — пневмомолотом “Тайфун-2”; 2 — пневмомолотами “Тайфун-2” с осевым и “Тайфун-1-2.4” с поперечным направлением воздействия

## ВЫВОДЫ

1. В технологиях погружения вертикальных металлических профилей ударным методом применение дополнительной вибрационной нагрузки осевого направления, приложенной в их хвостовой части, приводит к снижению эффективности разрушения забоя рабочим наконечником и сопровождается падением производительности процесса вплоть до полной его остановки. Подключение виброисточника с поперечными колебаниями не оказывает существенного влияния на скоростной режим продвижения трубной плиты в грунтовом массиве.

2. Расширение спектра силового воздействия путем присоединения к погружаемому элементу двух пневмомолотов с необходимой энергией единичного удара  $E = 17$  Дж и  $E = 9$  Дж, установленных последовательно вдоль оси трубной плиты, приводит к росту частоты ее нагружения, сопровождающемуся улучшением условий взаимодействия рабочего инструмента с забоем и повышением скорости его продвижения, опережающим соответствующие показатели при суммировании ударной мощности комбинированного модуля в 1.1 – 1.8 раз.

3. Присоединение к основному генератору продольной импульсной нагрузки с энергией  $E = 17$  Дж дополнительного источника с  $E = 10$  Дж и  $f = 43.5$  Гц, действующего в плоскости, перпендикулярной оси трубы, сопровождается уменьшением сопротивления грунтового массива и повышением интенсивности продвижения рабочего инструмента в грунте в 1.1 – 1.5 раза.

4. Результаты экспериментов с комбинированным осевым источником ударной нагрузки позволяют продолжить работу в данном направлении, наметив следующие задачи его дальнейшего совершенствования:

— согласование режимов работы двух пневмомолотов с целью синхронизации их частотных характеристик путем введения системы автоматической регулировки с обратной связью;

— разработка конструктивных схем и создание высокочастотного импульсного модуля с двумя или несколькими ударными массами, объединенными в одном корпусе и имеющими единую систему воздухораспределения [11].

Авторы выражают благодарность руководителю отдела горной и строительной геотехники ИГД СО РАН профессору, д-ру техн. наук Б. Н. Смоляницкому за постановку проблемы и постоянное внимание к работе, заведующему лабораторией вибротехники ИГД СО РАН канд. техн. наук С. Я. Левенсону за помощь в подготовке стендов, а также сотрудникам лаборатории механизации горных работ В. В. Трубицыну и С. Н. Трифонову за активное участие в проведении экспериментов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хестле Х. Справочник строителя. Строительная техника, конструкции и технологии. — М.: Техносфера, 2007.
2. Смоляницкий Б. Н., Тищенко И. В., Червов В. В. и др. Резервы повышения производительности виброударного погружения в грунт стальных элементов в технологиях специальных строительных работ // ФТПРПИ. — 2008. — № 5.
3. 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.
4. Тищенко И. В., Червов В. В., Горелов А. И. Характер силового импульса в стержне, погружаемом в грунт виброударным воздействием / Сб. науч. тр. конф. с участием иностранных ученых “Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды”. Т. 2: Машиностроение. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.
5. Цытович Н. А. Механика грунтов. — М.: Высш. шк., 1979.
6. Бауман В. А., Быховский И. И. Вибрационные машины и процессы в строительстве. — М.: Высш. шк., 1977.
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.
8. Макаров Р. А., Ренский А. Б., Боркунский Г. Х. и др. Тензометрия в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1975.
9. Нуберт Г. П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. — Л.: Энергия, 1970.
10. Смоляницкий Б. Н., Червов В. В., Трубицын В. В. и др. Новые пневмоударные машины “Тайфун” для специальных строительных работ // Механизация строительства. — 1997. — № 7.
11. А. с. № 1245666. Устройство ударного действия для проходки скважин в грунте / А. Д. Костылев, Б. Б. Данилов, Б. Н. Смоляницкий, А. Т. Сырямин, В. В. Червов // Опубл. в БИ. — 1986. — № 27.

*Поступила в редакцию 21/III 2012*