

УДК 621.23.05

**ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ  
ГЕНЕРАТОРОВ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА АМПЛИТУДУ  
И СКОРОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ ТРУБЫ В ГРУНТ**

**И. В. Тищенко, В. В. Червов**

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

Рассмотрена проблема повышения производительности виброударного погружения в грунт стальных трубчатых элементов. Дано описание опытной модели генератора со ступенчатой регулировкой скорости соударения ударника с наковальной. Приведены результаты экспериментального моделирования процесса внедрения в зависимости от параметров нагружения трубной плети. Установлено их влияние на амплитудные значения генерируемых силовых импульсов и скоростные характеристики продвижения элемента в упругопластичной грунтовой среде.

*Пневмомолот, виброударное прокалывание, амплитуда ударного импульса, скорость соударения, энергия удара, интенсивность и глубина погружения*

Характерная черта современного добывающего сектора экономики — активное освоение новых труднодоступных месторождений полезных ископаемых и увеличение мощностей действующих предприятий с учетом ужесточения экологических требований, приоритетом которых является максимальная сохранность существующего природного ландшафта и снижение загрязнений окружающего пространства продуктами горного производства. В этой связи особую важность приобретают исследования, направленные на совершенствование известных, поиск новых технологий и технических средств, обеспечивающих сооружение протяженных подземных выработок и объектов инфраструктуры при минимальном техногенном воздействии на геосреду и биосферу.

Функционирование добывающих предприятий горного, нефтяного и газового кластера неразрывно связано с возведением и реконструкцией промышленных и гражданских объектов различного назначения, транспортных магистралей и коммуникаций, что сопряжено с проведением комплекса специальных строительных работ [1]. В их перечень входит бестраншейная прокладка подземных каналов, укрепление откосов котлованов и насыпей, сооружение подпорных стенок и экранов, формирование набивных свай под фундаменты зданий, опор мостов, эстакад, линий электропередач. При этом широко используются технологии, основанные на проходке горизонтальных и вертикальных скважин, погружении ударным способом в грунт различных металлических профилей и конструкций. Для их реализации создана широкая гамма устройств, работающих на различных видах энергоносителя, в том числе и на сжатом воздухе [2, 3]. В качестве примера можно привести выполнение комплекса работ на объектах реконструкции Учалинского горно-обогатительного комбината (г. Учалы, Республика Башкортостан),

крупнейшего в России производителя медного, цинкового и пиритного концентратов. В рамках экологической программы по охране русла р. Буйда от загрязнения стоками с большим содержанием тяжелых металлов на предприятии реализован проект по строительству дренажных сооружений с насосной станцией и трассой трубопроводов. В местах пересечения водоводов с железнодорожной магистралью для транспортировки добываемого сырья на обогатительную фабрику сооружались подземные переходы путем виброударного продавливания стальных кожухов диаметром 530 мм. При этом использовалось оборудование и технологии, разработанные в лаборатории механизации горных работ ИГД СО РАН: пневмомолот “Тайфун-190” и комбинированный способ очистки труб от грунтового керна [4].

Накопленный опыт применения ударных машин при производстве специальных строительных работ показывает, что дальнейшее повышение их технического уровня должно быть направлено на рост производительности технологического процесса за счет повышения мощности импульсного нагружения и улучшения условий взаимодействия элементов системы “генератор – погружаемый элемент – грунтовый массив”. Решение поставленной технической задачи может быть осуществлено:

- повышением частоты виброударного воздействия;
- присоединением дополнительных источников вибрационной и ударной нагрузки;
- увеличением энергии единичного удара как за счет применения более массивного ударника, так и путем роста скорости его соударения с рабочим инструментом.

Результаты выполненных ранее в ИГД СО РАН исследований свидетельствуют о том, что при движении тела в упругопластичной грунтовой среде под действием импульсной нагрузки в совокупности со статическим усилием в пределах силы отдачи генератора, расширение частотного диапазона свыше 10 Гц может вызывать снижение бокового сопротивления породного массива, сопровождаемое дополнительным приростом скорости внедрения элемента в грунт [5, 6]. Такой эффект получил название “аномально низкого трения” [7]. Основываясь на полученных данных, разработан и исследован опытный образец высокочастотного пневмомолота, рассчитанный на давление сжатого воздуха 1.2 МПа с массой ударной части 80 кг и частотой воздействия до 12.4 Гц, что является наивысшим показателем в машинах данного класса [8, 9].

В работе [10] приведены результаты экспериментального моделирования процесса внедрения трубной плети с последовательным подключением к источнику импульсной нагрузки дополнительных вибраторов с осевым и поперечным направлением колебаний. Показана возможность использования в качестве силового возбудителя комбинированного генератора из двух ударных устройств с расширенным спектром воздействия.

Первым вариантом повышения энергии силового импульсного воздействия предусматривалось увеличение подвижных масс ударных механизмов. Таким путем созданы линейки машин “Тайфун” (ИГД СО РАН, Россия) [11] и “Grundoram” (TRACTO-TECHNIK, Германия) [12]. Технические параметры устройств ударного действия из разработанных типоразмерных рядов оптимизированы по массогабаритным показателям и согласованы с номенклатурой рекомендуемых для погружения стандартных стальных элементов и профилей. При этом масса ударников у отечественных пневмомолотов находится в пределах от 70 кг — “Тайфун-70” до 1000 кг — “Тайфун-1000”, а у некоторых зарубежных образцов достигает 2000 кг — “Taurus” и более — “Apollo”. Учитывая, что переход к устройствам с более массивными ударными частями сопровождается неизбежным увеличением металлоемкости, ростом показателей расходных характеристик, предполагает значительные затраты на производство и эксплуатацию оборудования, можно констатировать, что этот путь наращивания энергии единичного удара к настоящему времени практически исчерпал себя.

Вторым параметром энергетической составляющей ударного импульса является скорость нанесения удара бойка по рабочему инструменту. В численно-аналитических исследованиях с применением различных расчетных моделей выполнен анализ волновых процессов забивания трубы в грунт при различных внешних факторах [13–16]. Согласно полученным результатам, предельное погружение элемента при прочих равных условиях прямо пропорционально амплитуде ударного импульса, которая, в свою очередь, зависит от скорости нанесения удара по волноводу. До настоящего времени в большинстве импульсных устройств, предназначенных для проходки подземных каналов и погружения различных элементов в упругопластичной грунтовой среде, этот показатель не превышает 4–5 м/с [17]. Такие конструктивные ограничения связаны со стремлением снизить максимальные напряжения в деталях машин и повысить их наработку на отказ. Вместе с тем в горнодобывающей промышленности при производстве буровых работ по разведке и добыче полезных ископаемых широкое распространение получили пневмударники с повышенной скоростью соударения [18]. Это обусловлено необходимостью разрушения более крепких скальных пород и требованиями по уменьшению габаритов машин, которые для непосредственного воздействия на забой размещаются внутри образуемой скважины.

На основании многочисленных исследований и обширного практического опыта по эксплуатации данной техники выработаны общие рекомендации, согласно которым при соблюдении ряда условий имеется возможность повышения скорости нанесения удара по инструменту ударником в форме цилиндра с полым поршневым участком до уровня 8–9 м/с [19, 20]. Указанные факторы могут иметь основополагающее значение в работах по дальнейшему улучшению технического уровня устройств ударного действия для погружения металлических элементов в грунт. Для обоснования критериев их эффективности и условий возможной практической реализации проведен цикл экспериментальных исследований на физических моделях. Их цель — изучение влияния различных сочетаний энергетических параметров генераторов ударных импульсов на амплитуду создаваемого ими силового воздействия и скорость поступательного перемещения стального профиля в грунтовой массе.

#### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В соответствии с поставленной задачей модель импульсного генератора должна обладать возможностью ступенчатого регулирования скорости соударения подвижной массы с рабочим инструментом в исследуемом диапазоне значений (4–9 м/с) при неизменной частоте ударного воздействия. При ее создании за основу взята заложенная в пневмомолотах “Тайфун” схема воздушораспределения с упругим кольцевым клапаном в камере прямого хода (рис. 1), обладающая простой конструкцией и широким диапазоном изменения характеристик [5, 6, 10]. Конструктивные и энергетические параметры такого ударного устройства связаны соотношениями [21]:

$$E = \left( p_0 - \frac{\Delta p_1}{2} \right) A_1 X_0 \psi, \quad (1)$$

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}}, \quad (2)$$

$$f = \frac{1}{X_0 \psi} \left( \frac{2}{v} + \frac{A_2}{\lambda S} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $E$  — энергия удара, Дж;  $p_0$  — магистральное давление на входе в распределительный тракт, МПа;  $\Delta p_1$  — максимальное падение давления в камере прямого хода, МПа;  $A_1, A_2$  — площади камер прямого и обратного хода, м<sup>2</sup>;  $X_0$  — ход ударника до начала выхлопа, м;  $\psi$  — коэффи-

циент заброса ( $\psi \geq 1$ );  $v$  — предупредная скорость, м/с;  $m$  — масса ударника, кг;  $f$  — частота ударов, Гц;  $\lambda$  — интенсивность движения воздушного потока через дроссельный канал, м/с;  $S$  — сечение отверстия жиклера, м<sup>2</sup>.

Их анализ показывает, что для принятого соотношения площадей  $A_1$  и  $A_2$  камер 1 и 2, задаваемых диаметрами патрубка  $D_1$  и наковальни  $D_2$ , более интенсивный разгон подвижной массы  $m$  с рабочим ходом, определяемым расстоянием  $X_0$  от точки переднего замыкания упругого клапана 3 до начала выхлопных пазов 4 (рис. 1), обеспечивается подъемом магистрального давления  $p_0$  источника сжатого воздуха. Возможное при этом изменение частоты ударов  $f$  корректируется подбором сечения  $S$  пропускного отверстия жиклера.

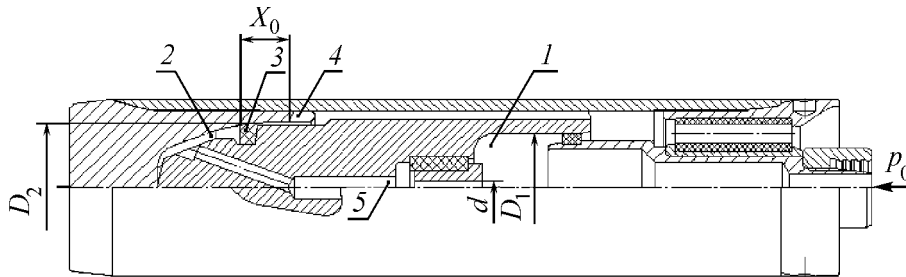


Рис. 1. Функциональная схема пневмомолота: 1 — камера прямого хода; 2 — камера обратного хода; 3 — упругий клапан; 4 — выхлопной паз; 5 — дроссельный канал

Разработанная и изготовленная экспериментальная модель пневмомолота “Тайфун-1” (рис. 2а) с массой ударной части  $m = 1$  кг имеет три режима настройки по магистральному давлению:  $p_0 = 0.6, 1.2, 2.4$  МПа. Ее основными конструктивными элементами (рис. 2б) являются: корпус 1, в переднюю часть которого ввернута наковальня 2 с размером  $X_0 = 40$  мм, ударник 3, задняя гайка с патрубком 4. Ступенчатое регулирование частоты ударов в пределах каждого режима настройки достигается изменением сечения дроссельного канала за счет установки одного из сменных жиклеров 5 с отверстием  $d = 1.5, 1.7, 2.0, 2.5$  мм. Цикл воздухораспределения обеспечивается работой упругого клапана 6.

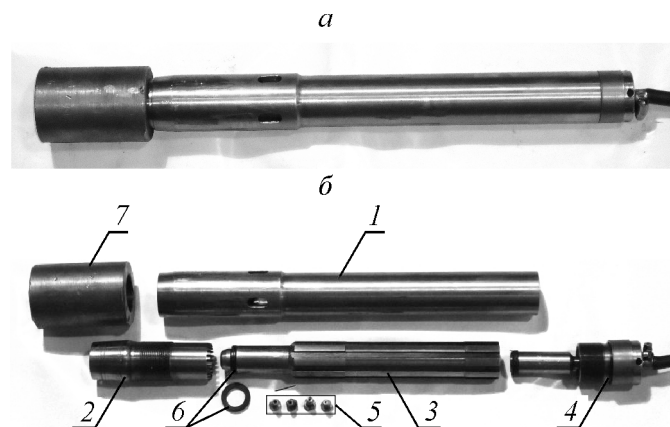


Рис. 2. Общий вид модели пневмомолота с массой ударника  $m = 1$  кг в сборке (а) и поэлементно (б): 1 — корпус; 2 — наковальня; 3 — ударник; 4 — задняя гайка с патрубком; 5 — набор сменных жиклеров; 6 — упругий клапан; 7 — переходная насадка

Тестирование параметров модели осуществлялось на лабораторном измерительном стенде. Оно состояло из следующих операций:

— определение фактического хода ударника по положению вмонтированного в заднюю гайку подвижного стержневого датчика в момент замыкания им электрической контактной цепи;

— регистрация изменения давлений в камерах машины и продолжительности рабочего цикла путем записи импульсных индикаторных диаграмм типовым комплектом измерительно-регистрирующей аппаратуры (датчики Р8АР фирмы НВМ, Германия; усилитель аналогового сигнала; цифровой преобразователь).

Источником сжатого воздуха служил переносной компрессор высокого давления типа “Junior II-E” производства компании BAUER (Германия), оснащенный баллоном емкостью 50 л с понижающим редуктором.

Обработка импульсных индикаторных диаграмм позволила выяснить характер процесса наполнения и опорожнения управляемой передней камеры, определить уровень падения давления  $\Delta p_1$  при прямом ходе ударника, зафиксировать продолжительность рабочего цикла. На основе этих данных с использованием зависимостей 1, 2 и результатов измерения полного рабочего хода, представленного как произведение  $X_0 \cdot \psi$ , уточнены фактические значения энергии удара  $E$  и скорости соударения  $v$ , установлен диапазон изменения частоты ударных импульсов  $f$ . В итоге были отобраны три варианта настройки, которые характеризуются индикаторными диаграммами, приведенными на рис. 3, и в полной мере отвечают указанным выше требованиям. Так, при кратном повышении магистрального давления с  $p_0 = 0.6$  МПа (рис. 3а) до  $p_0 = 1.2$  МПа (рис. 3б) и  $p_0 = 2.4$  МПа (рис. 3в) наблюдается практически пропорциональный рост энергии в диапазоне:  $E = 9.5, 17.7, 33.2$  Дж и скорости соударения:  $v = 4.3, 6.0, 8.1$  м/с. При этом за счет установки соответствующих жиклеров частота ударного воздействия поддерживается на уровне, близком к постоянному:  $f = 12 - 12.8$  Гц.

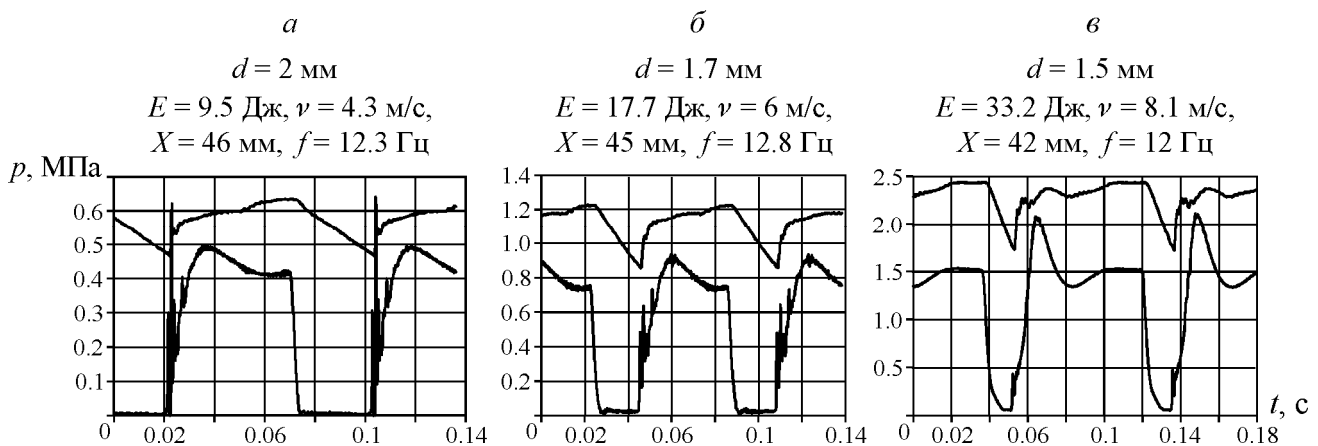


Рис. 3. Индикаторные диаграммы пневмомолота с массой ударника  $m = 1$  кг при номинальном рабочем давлении  $p$ , МПа: а — 0.6; б — 1.2; в — 2.4

Для получения сравнительных данных в ходе экспериментов также применялись ранее изготовленные модели: “Тайфун-2” ( $m = 2$  кг,  $E = 17$  Дж,  $v = 4.1$  м/с,  $f = 11.8$  Гц) и “Тайфун-4” ( $m = 4$  кг,  $E = 35$  Дж,  $v = 4.2$  м/с,  $f = 12.6$  Гц) [5, 10], рассчитанные на работу при давлении энергоносителя  $p_0 = 0.6$  МПа.

В качестве тела, внедряемого в грунтовую среду, использовалась стальная сборная трубная плеть 1 (рис. 4) с наружным диаметром 33 мм, состоящая из двух секций, свинчиваемых резьбовыми муфтами. Взаимодействующая с грунтом головная часть трубы длиной 1.9 м оснащалась коническим наконечником с углом при вершине  $60^\circ$ . На противоположном конце последней секции устанавливались импульсные генераторы 2. Передача ударов осуществлялась через

коническую переходную насадку 3. Дополнительное статическое усилие в осевом направлении создавалось набором грузов 4 массой 45 кг, опирающихся на демпфер 5, фиксируемый на трубе шкворнем 6.

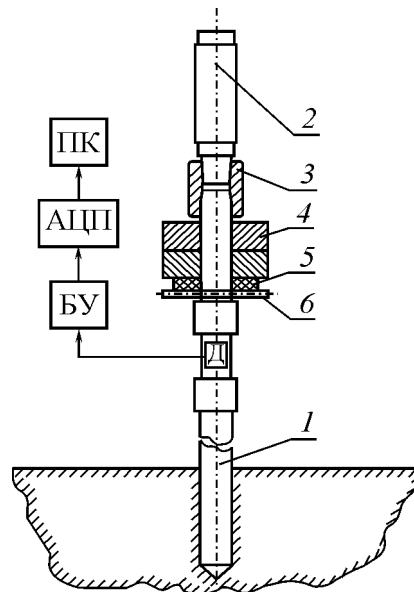


Рис. 4. Схема эксперимента: 1 — труба; 2 — ударный модуль; 3 — переходная насадка; 4 — гравитационный пригруз; 5 — демпфер; 6 — шкворень; Д — датчик силы; БУ — блок усилителей; АЦП — аналого-цифровой преобразователь сигнала; ПК — компьютер

Измерительная часть включала тензометрический датчик Д в виде отрезка полого цилиндра диаметром 33 мм и длиной 250 мм с наклеенными на его наружной поверхности тензорезисторами [22, 23], блок усилителей электрического сигнала БУ, аналого-цифровой преобразователь АЦП, соединенный с персональным компьютером ПК. Калибровка регистрирующего канала в единицах силы осуществлялась с помощью гидравлического пресса, оснащенного образцовым манометром класса 04. Установка датчика на трубную плетку выполнялась при помощи резьбовых соединений. Данные обрабатывались стандартным пакетом программ Power Graph Professional и Excel.

Перед началом каждого опыта выполнялся ряд подготовительных операций:

- организация лидерной скважины глубиной 0.5 м от поверхности грунтового основания для вертикального направления трубной плетки;
- предварительное внедрение головной части трубы длиной 1.9 м;
- присоединение второй секции, монтаж датчика усилий, установка вертикальной линейки длиной 2.5 м с ценой деления шкалы 1 мм для непрерывного контроля глубины погружения.

Грунтовая среда, начиная с глубины 1.4 м, представляла собой плотную супесчаную смесь естественного залегания с нормальной влажностью (10–12%).

Процесс внедрения трубной плетки экспериментальными генераторами ударных импульсов (рис. 5) фиксировался на видеокамеру марки SONY HDR-SR10E для последующего анализа и покадровой обработки. Время прохождения каждого контрольного отрезка длиной 0.1 м измерялось электронным секундомером с точностью 0.1 с. Запись диаграмм силовых импульсов осуществлялась через равные дистанционные промежутки протяженностью 0.2 м. Регистрация результатов начиналась с отметки 2 м и заканчивалась по достижению глубины 3.4 м.

По завершению каждого опыта производился демонтаж силового и измерительного оборудования, а забитая труба извлекалась из грунта с помощью кран-балки грузоподъемностью 2 т.

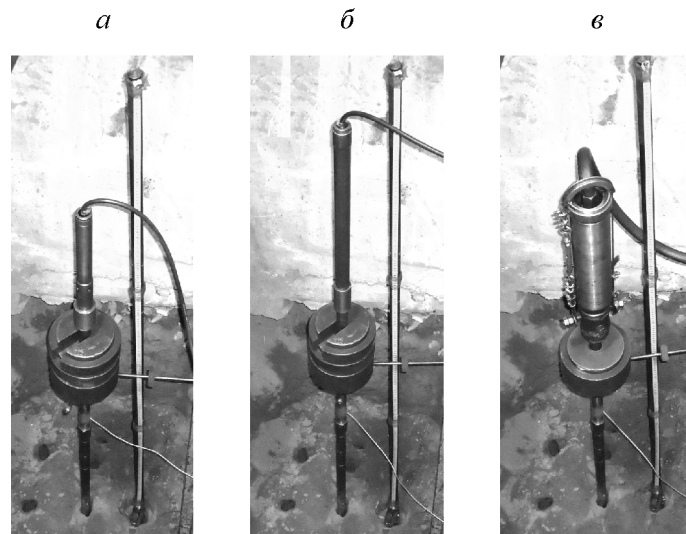


Рис. 5. Погружение трубы диаметром 33 мм пневмомолотом “Тайфун-1” (а), “Тайфун-2” (б) и “Тайфун-4” (в)

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На первом этапе моделировался процесс внедрения трубчатого элемента пневмомолотом “Тайфун-1” (рис. 5а) для принятых вариантов его настройки по рабочему давлению. На рис. 6 представлены диаграммы силовых импульсов, формируемых в погружаемой трубной плети при различных энергетических параметрах генератора. Согласно полученным данным, для постоянной подвижной массы  $m = 1$  кг кратное изменение скорости ее соударения приблизительно в 1.4 раза: с  $v = 4.3$  м/с (рис. 6а) до  $v = 6$  м/с (рис. 6б) и  $v = 8.1$  м/с (рис. 6в) приводит к пропорциональному росту максимального амплитудного значения передаваемой импульсной нагрузки от  $F_{\max} = 24$  до 35 и 47 кН соответственно. Такие результаты лежат в плоскости фундаментальных представлений о характере волновых процессов ударных систем и соответствуют выводам многочисленных экспериментальных исследований, в которых рассмотрены условия формирования фронта волны для случаев одиночного удара при падении тел различной формы с заданной высоты (гравитационные копровые установки) [24, 25].

По времени прохождения контрольных отрезков вычислены средние поинтервальные значения скоростей, что позволило получить характеристику перемещения трубной плети в грунтовой массе с отметки  $h = 2$  до 3.4 м (рис. 7). Анализ представленных кривых показывает, что по своей форме они качественно не отличаются друг от друга, а их значения на протяжении каждого промежуточного отрезка пути определяются лобовым и боковым сопротивлением данного типа грунта. На всех трех кривых четко выделяются две зоны, разделенные точками максимумов функций, приобретающих свои наибольшие значения на отметке  $h = 2.4-2.6$  м. Первая характеризует фазу разгона системы, а вторая соответствует стадии постепенного затухания процесса перемещения трубной плети в результате растущей площади контакта ее боковой поверхности с грунтовой средой и вызванного этим увеличением сил внешнего трения. Пошаговый рост энергии ударного воздействия приблизительно в 1.9 раза с  $E = 9.5$  Дж (кривая 1) до 17.7 (кривая 2) и 33.2 Дж (кривая 3) за счет соответствующего повышения предупредительной скорости ударника массой  $m = 1$  кг сопровождается скачкообразным увеличением интенсивности движения трубчатого элемента в 1.7–2.5 раза на участке  $h = 2.0-2.8$  м. В дальнейшем такая разница становится еще ощутимее, что особенно заметно при сравнении значений кривых 1 и 2 на

завершающем отрезке пути до отметки  $h = 3.4$  м. Этот факт свидетельствует о том, что пороговое значение энергии  $E = 9.5$  Дж становится недостаточным для эффективного преодоления сопротивления грунтовой среды и процесс погружения в этом случае переходит в стадию отказа.

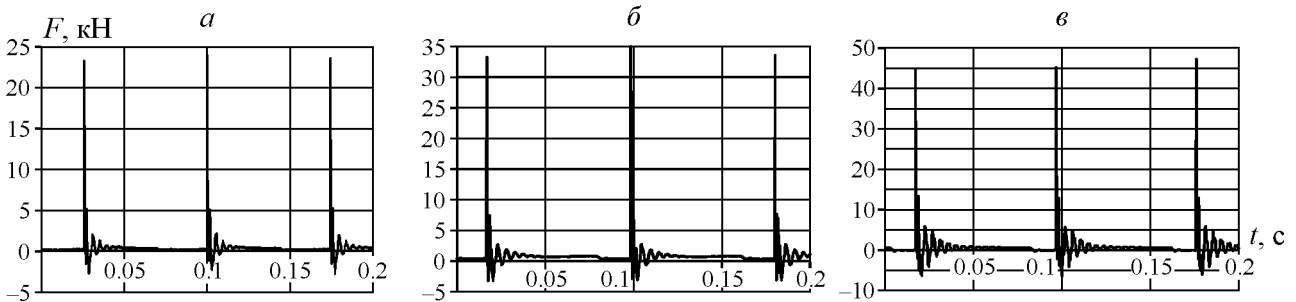


Рис. 6. Диаграммы силовых импульсов в трубной плети при воздействии пневмомолота с массой ударника  $m = 1$  кг и скоростью соударения, м/с:  $a$  — 4.3;  $b$  — 6;  $v$  — 8.1

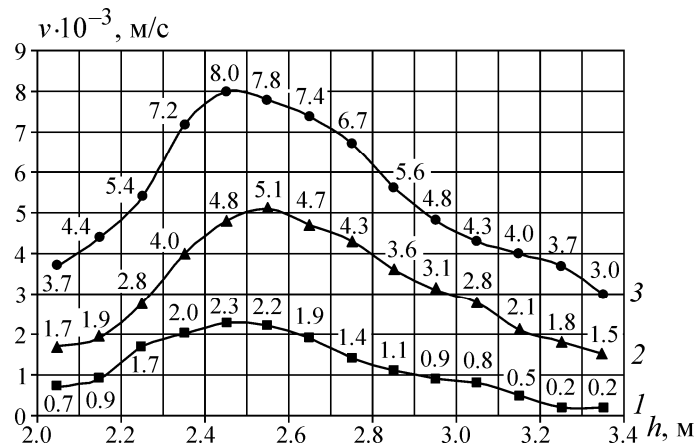


Рис. 7. Скорость внедрения трубной плети пневмомолотом с массой ударника  $m = 1$  кг при различных вариантах настройки: 1 —  $E = 9.5$  Дж,  $v = 4.3$  м/с; 2 —  $E = 17.7$  Дж,  $v = 6$  м/с; 3 —  $E = 33.2$  Дж,  $v = 8.1$  м/с

На втором этапе исследований рассматривался случай, когда при тех же внешних условиях наращивание энергетической компоненты ударного воздействия на погружаемый в грунт элемент происходит за счет увеличения массы ударника при постоянной скорости его соударения с наковальной машины. Для этого к трубной плети последовательно присоединялись модели пневмомолотов “Тайфун-2” (рис. 5б) и “Тайфун-4” (рис. 5в). Полученные диаграммы генерируемых силовых импульсов отображены на рис.8. Сравнивая их со значениями усилий, передаваемых на трубу при работе устройства “Тайфун-1” в режиме  $p_0 = 0.6$  МПа (рис. 6а), нетрудно заметить, что увеличение масс ударных частей от  $m = 1$  до 4 кг при скорости соударения  $v = 4.1 - 4.3$  м/с практически не влияет на амплитуды сил ударной волны, которые в обоих случаях лежат в пределах  $F_{\max} = 24 - 30$  кН. Приведенные данные хорошо коррелируют с результатами предшествующих исследований, рассматривающих характер силового импульса в стержне, погружаемом в грунт виброударным методом. В них при сходных внешних условиях и аналогичных факторах воздействия максимальные амплитудные значения импульсной нагрузки фиксировались на уровне  $F_{\max} = 20 - 25$  кН [26]. Некоторый разброс значений в пределах 5–6 кН в том и другом случае можно объяснить влиянием конструктивных изменений в устройствах с ударной массой  $m = 2$  кг (более длинный ударник у “Тайфуна-2”) и  $m = 4$  кг (большой диаметр корпуса у “Тайфуна-4”) по сравнению с моделью “Тайфун-1”, имеющей боек  $m = 1$  кг [20].



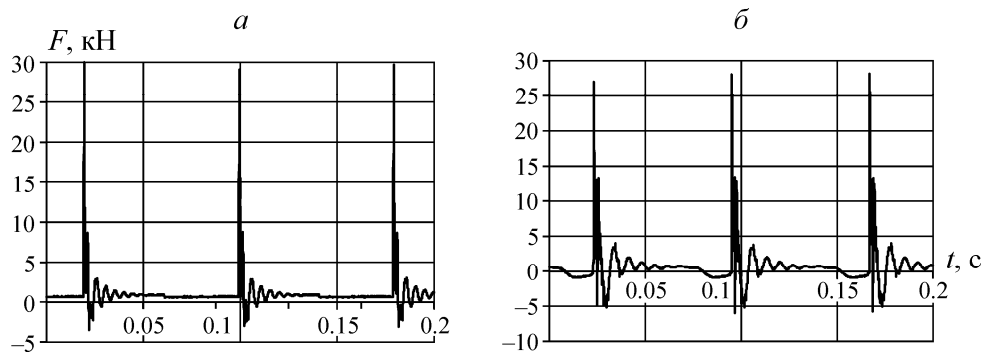


Рис. 8. Диаграммы силовых импульсов в трубной плети при воздействии пневмомолотов с различной массой ударника: *a* —  $m = 2$  кг,  $v = 4.1$  м/с; *б* —  $m = 4$  кг,  $v = 4.2$  м/с

Сравнивая вновь полученные скоростные характеристики погружения (рис. 9) с описанными ранее аналогичными зависимостями (рис. 7), можно сделать вывод об их качественном подобии независимо от способа воздействия на трубную плеть. Количественный анализ данных, отображенных на кривых 1–3, полученных при использовании моделей пневмомолотов “Тайфун-1” ( $m = 1$  кг,  $E = 9.5$  Дж,  $v = 4.3$  м/с), “Тайфун-2” ( $m = 2$  кг,  $E = 17$  Дж,  $v = 4.1$  м/с), “Тайфун-4” ( $m = 4$  кг,  $E = 35$  Дж,  $v = 4.2$  м/с), показывает, что рост энергии удара в 1.8–2.1 раза за счет массы ударника сопровождается практически пропорциональным изменением значений скорости внедрения в 1.6–2.2 раза на всем протяжении движения трубчатого элемента в грунтовом массиве.

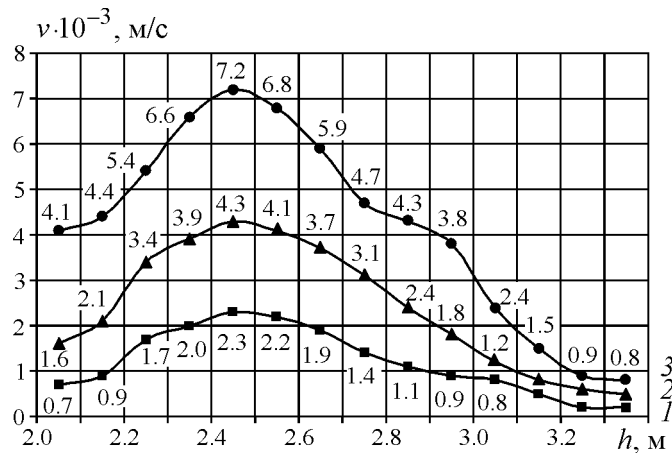


Рис. 9. Скорость внедрения трубной плети пневмомолотами с различной массой ударника: 1 —  $m = 1$  кг,  $E = 9.5$  Дж; 2 —  $m = 2$  кг,  $E = 17$  Дж; 3 —  $m = 4$  кг,  $E = 35$  Дж

Для составления итоговой характеристики исследуемого процесса на рис. 10 представлены сравнительные кривые изменения скорости погружения трубной плети диаметром 33 мм в грунтовый массив по мере роста глубины внедрения от  $h = 2$  до 3.4 м при различных способах воздействия. Их данные свидетельствуют о том, что в одних и тех же грунтовых условиях, при одинаковой величине энергетической и частотной компоненты ударной нагрузки более эффективными являются устройства с большей скоростью соударения ударника с рабочим инструментом. Как отмечено ранее, у всех моделей, задействованных в экспериментах, близкие значения частоты ударов, не выходящие за пределы  $f = 11.8 - 12.8$  Гц. Сравнение интенсивности перемещения трубчатого элемента при воздействии на него как пневмомолотами “Тайфун-2” ( $m = 2$  кг,  $v = 4.1$  м/с) и “Тайфун-1” ( $m = 1$  кг,  $v = 6$  м/с) с  $E \approx 17$  Дж (кривые 1, 2), так и пневмо-

молотами “Тайфун-4” ( $m = 4$  кг,  $v = 4.2$  м/с) и “Тайфун-1” ( $m = 1$  кг,  $v = 8.1$  м/с) с  $E \approx 34$  Дж (кривые 3, 4) показывает, что в первом случае разница в скорости составляет 1.2–3 раза, а во втором достигает 1.3–4 раз в пользу машин с меньшей массой и большей величиной разгона ударной массы. В указанных интервалах разностные значения изменяются в зависимости от глубины внедрения, начиная с отметки  $h = 2.5$  м и достигая максимума в конечной стадии процесса.

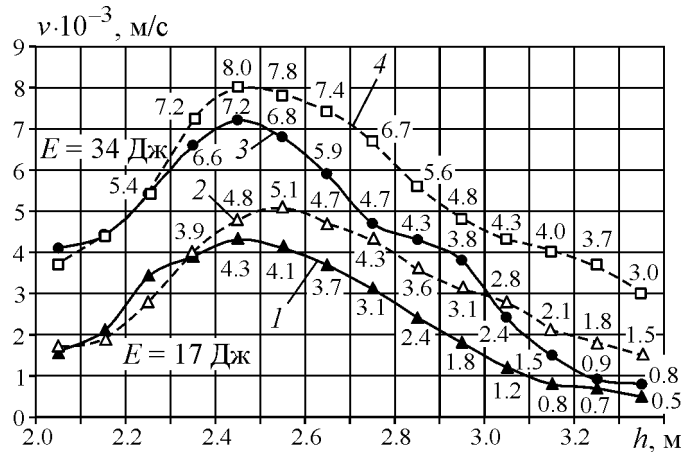


Рис. 10. Сравнение эффективности погружения трубной плети при различных способах воздействия: 1 — пневмомолотом “Тайфун-2” ( $m = 2$  кг,  $E = 17$  Дж,  $v = 4.1$  м/с); 2 — “Тайфун-1” ( $m = 1$  кг,  $E = 17.7$  Дж,  $v = 6$  м/с); 3 — “Тайфун-4” ( $m = 4$  кг,  $E = 35$  Дж,  $v = 4.2$  м/с); 4 — “Тайфун-1” ( $m = 1$  кг,  $E = 33.2$  Дж,  $v = 8.1$  м/с)

Физическую картину этого явления можно объяснить, опираясь на исследования по распространению волн деформаций в стержневых элементах под действием импульсной нагрузки [14, 20]. Согласно им, при прочих равных условиях, предельное погружение трубчатого элемента в грунтовый массив напрямую связано с амплитудой приложенного к его торцу ударного импульса. По мере распространения волны от точки нанесения удара до противоположного конца трубы, непосредственно взаимодействующего с забоем, происходит постепенное ее затухание по линейному закону с коэффициентом, зависящим от величины внешнего бокового трения.

В эксперименте амплитуда генерируемых ударных импульсов изменялась от  $F_{\max} = 24–30$  кН — у машин со скоростью соударения  $v = 4.1–4.3$  м/с до  $F_{\max} = 35$  и  $47$  кН — у моделей с  $v = 6$  и  $8.1$  м/с соответственно (рис. 6, 8). С учетом того что во всех опытах интенсивность затухания импульсов одинакова и определяется изменением бокового сопротивления данной грунтовой среды по мере роста глубины погружения тела, в случаях с большими исходными значениями импульсной нагрузки достигается дополнительное увеличение силового воздействия рабочего наконечника трубы на забой. Это создает более благоприятные условия для сдвига слоев грунта в зоне контакта, что сопровождается ростом величины перемещения системы за каждый удар и скорости проходки в целом.

При создании пневмоударной техники с повышенной скоростью нанесения удара (более 4 м/с) для погружения различных металлических профилей в грунтовую среду на первый план выходят проблемы обеспечения требуемой надежности и долговечности. Их решение может идти по двум направлениям:

— совершенствование технологии производства, использование качественных легированных сталей с высокой ударной прочностью и большим сопротивлением усталостному разрушению, оптимизация режимов термического упрочнения особо нагруженных конструктивных элементов [27, 28];

— улучшение поверхностных форм деталей для снижения количества концентраторов напряжений, переход на конструкции с подвижным соединением корпуса и наковальни, использование составных ударников [29, 30].

### ВЫВОДЫ

Совершенствование технологий погружения в грунт различных конструктивных элементов и профилей возможно на основе создания и применения пневматических устройств с повышенной скоростью соударения подвижной массы с инструментом, которая должна возрасти с  $v = 4 - 5$  м/с, что соответствует уровню современных серийных машин, до  $v = 8 - 9$  м/с — предлагаемых перспективных. При этом целесообразно осуществить переход на использование компрессорных установок со степенью сжатия рабочего тела до 1.5–2.5 МПа. Такой подход обосновывается полученными экспериментальными результатами:

1. На основе клапанной схемы воздухораспределения с упругим кольцевым элементом в управляемой рабочей камере машины создана экспериментальная модель генератора импульсной нагрузки с массой ударной части  $m = 1$  кг и тремя вариантами настройки основных энергетических параметров:  $p_0 = 0.6$  МПа,  $E = 9.5$  Дж,  $v = 4.3$  м/с;  $p_0 = 1.2$  МПа,  $E = 17.7$  Дж,  $v = 6$  м/с;  $p_0 = 2.4$  МПа,  $E = 33.2$  Дж,  $v = 8.1$  м/с.

2. Амплитудные значения импульсов сил увеличиваются кратно величине предупредной скорости ударника, что подтверждается данными, полученными при внедрении трубы диаметром 33 мм в супесчаный грунт нормальной влажности (10–12%):  $F_{\max} = 24, 35, 47$  кН при  $v = 4.3, 6.0, 8.1$  м/с соответственно.

3. При заданных внешних факторах процесса скорость перемещения трубчатого элемента в грунтовой среде находится в прямой пропорциональной зависимости от энергетических параметров устройств ударного действия в исследуемом диапазоне их значений:  $E = 9.5 - 35$  Дж.

4. Сравнение двух пар машин с одинаковым уровнем энергии удара, но с разными значениями составляющих ее структурных единиц ( $m = 1$  кг,  $v = 6$  м/с;  $m = 2$  кг,  $v = 4.1$  м/с и  $m = 1$  кг,  $v = 8.1$  м/с;  $m = 4$  кг,  $v = 4.2$  м/с) показывает, что в одних и тех же грунтовых условиях более эффективными являются пневмомолоты с большей предупредной скоростью ударника, при которой интенсивность погружения трубы при максимальном заглублении в грунт ( $h = 3.4$  м) увеличивается в 3 раза.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хестле Х. Справочник строителя: Строительная техника, конструкции и технологии. — М.: Техносфера, 2007.
2. Костылев А. Д., Гилета В. П. и др. Пневмопробойники в строительном производстве. — Новосибирск: Наука, 1987.
3. Рыбаков А. П. Основы бестраншейных технологий (теория и практика). — М.: Стройиздат, 2006.
4. Тищенко И. В. Виброударное продавливание и комбинированный способ очистки труб от грунтового керна // Строит. и дор. машины. — 2013. — № 11.
5. 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.
6. 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.
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. **Смоляницкий Б. Н., Тищенко И. В., Червов В. В.** Перспективы совершенствования пневмомолотов для специальных строительных работ // ФТПРПИ. — 2009. — № 4.
9. **Тищенко И. В., Червов В. В.** Высокочастотный пневмомолот для специальных строительных работ // Строит. и дор. машины. — 2011. — № 7.
10. **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.
11. **Смоляницкий Б. Н., Червов В. В., Трубицын В. В. и др.** Новые пневмоударные машины для специальных строительных работ // Механизация стр-ва. — 1997. — № 7.
12. **Кюн Г., Шойбле Л., Шлик Х.** Закрытая прокладка непроходных трубопроводов. — М.: Стройиздат, 1993.
13. **Кершенбаум Н. Я., Минаев В. И.** Проходка горизонтальных и вертикальных скважин ударным способом. — М.: Недра, 1984.
14. **Исаков А. Л., Шмелев В. В.** Анализ волновых процессов при забивании металлических труб в грунт с использованием генераторов ударных импульсов // ФТПРПИ. — 1998. — № 2.
15. **Александрова Н. И.** Численно-аналитическое исследование процесса ударного погружения трубы в грунт с сухим трением. Ч. 1. Внешняя среда не деформируема // ФТПРПИ. — 2012. — № 5.
16. **Александрова Н. И.** Численно-аналитическое исследование процесса ударного погружения трубы в грунт с сухим трением. Ч. 2. Внешняя среда деформируема // ФТПРПИ. — 2013. — № 3.
17. **Гурков К. С., Климашко В. В., Костылев А. Д. и др.** Пневмопробойники. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1990.
18. **Подэрни Р. Ю.** Горные машины и комплексы для открытых работ. — М.: Недра, 1985.
19. **Блохин В. С.** Повышение эффективности бурового инструмента. — Киев: Техника, 1982.
20. **Алимов О. Д., Манжосов В. К., Еремьянц В. Э.** Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах. — М.: Наука, 1985.
21. **Червов В. В.** Энергия удара пневмомолота с упругим клапаном в камере обратного хода // ФТПРПИ. — 2004. — № 1.
22. **Макаров Р. А., Ренский А. Б., Боркунский Г. Х. и др.** Тензометрия в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1975.
23. **Нуберт Г. П.** Измерительные преобразователи неэлектрических величин. — Л.: Энергия, 1970.
24. **Еремьянц В. Э., Демидов А. Н.** Экспериментальные исследования ударных систем с неторцевым соударением элементов. — Фрунзе: Илим, 1981.
25. **Закаблукровский Н. Г., Покровский Г. Н., Серпенинов Б. Н.** О влиянии скорости нагружения, соотношения масс и жесткостей бойка и инструмента на эффективность передачи удара // Передача удара и машины ударного действия. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1976.
26. **Тищенко И. В., Червов В. В., Горелов А. И.** Характер силового импульса в стержне, погружаемом в грунт виброударным воздействием // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: тр. конф. с участием иностр. ученых (9–12 октября 2012). Т. 2. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2012.
27. **Котов О. К.** Поверхностное упрочнение деталей машин химико-термическими методами. — М.: Машиностроение, 1969.
28. **Репин А. А., Алексеев С. Е., Попелюх А. И., Теплых А. М.** Влияние неметаллических включений на долговечность ударных машин // ФТПРПИ. — 2011. — № 6.
29. **Соколинский В. Б.** Машины ударного разрушения (Основы комплексного проектирования). — М.: Машиностроение, 1982.
30. **Паспорт СО 134.000А ПС.** Ударный узел машины для проходки скважин и забивания труб СО 134. — Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1979.

*Поступила в редакцию 17/III 2014*