



**ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ УДАРОВ И УСИЛИЯ ПОДАЧИ
НА СКОРОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ СТЕРЖНЯ В ГРУНТОВЫЙ МАССИВ**

И. В. Тищенко

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

Создана лабораторная модель пневмомолота с массой ударника 4 кг и ступенчатым регулированием ударной мощности за счет ее частотной компоненты. Приведены ее фактические энергетические характеристики в зависимости от варианта настройки. В эксперименте погружаемый стержень подвергался комбинированному воздействию в виде периодических ударных импульсов в сочетании с дополнительной статической нагрузкой. Получены эмпирические графические и расчетные зависимости влияния частоты ударов и величины внешнего силового воздействия на скорость внедрения обсадной трубы в грунтовый массив при условии требуемого порогового значения энергии модели пневмомолота, необходимой для преодоления сопротивления грунта.

Пневмомолот, ударник, частота ударов, энергия ударного импульса, стержневой элемент, статическая нагрузка, сопротивление грунтовой среды, скорость погружения

**INFLUENCE OF IMPACT FREQUENCY AND FEED FORCE
ON THE RATE OF ROD PENETRATION INTO THE SOIL MASS**

I. V. Tishchenko

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: ighor.tishchienko.70@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The laboratory model of a pneumatic hammer with a striker weight of 4 kg and stepwise control of the impact power due to its frequency component is created. Its actual energy characteristics depending on adjustment option are presented. In the experiment, the rod experienced a combined action in the form of periodic shock pulses with an additional static load. Empirical graphical and calculated dependences of the influence of impact frequency and the magnitude of external force on the rate of casing penetration into the soil mass are obtained, provided that the necessary threshold value of pneumatic hammer energy required to overcome the soil resistance is reached.

Pneumatic hammer, striker, impact frequency, shock pulse energy, rod element, static load, soil resistance, sinking rate

Одним из приемов ведения строительных работ при возведении и реконструкции различных сооружений является образование горизонтальных и вертикальных скважин в грунтовом массиве. Они предназначены для бестраншейной прокладки подземных коммуникаций, укрепления откосов котлованов и насыпей, получения набивных свай под фундаменты зданий, опор мостов и эстакад. В данной области широко используются технологии, основанные на погружении в грунт металлических обсадных труб ударными методами (виброударное прокалывание и продавливание) [1]. Их анализ показывает, что главный резерв повышения производительности технологического процесса заключается в оптимизации воздействия ударных импульсов для эффективного внедрения погружаемого элемента в упругопластичную грунтовую среду [2].

Целью первой фазы исследований является определение влияния частоты приложения ударных импульсов на скорость погружения металлической обсадной трубы методом виброударного прокалывания (без экскавации грунта) с расширением лидирующей скважины и дополнительным статическим силовым воздействием в пределах силы отдачи пневмомолота.

Постановка экспериментов строилась на применении методики приближенного физического моделирования системы “пневмомолот – погружаемый элемент – грунтовый массив”, для чего разработано и изготовлено необходимое лабораторное оборудование.

Модель пневмомолота с массой ударника $m = 4$ кг выполнена по схеме ударного устройства с упругим клапаном в камере обратного хода (схема пневмомолотов “Тайфун”), позволяющей ступенчатое регулирование частоты ударов за счет изменения проходного сечения дроссельного канала ударника установкой сменных жиклеров [3, 4]. Тестирование ее параметров методом импульсных индикаторных диаграмм осуществлялось на лабораторном измерительном комплексе (рис. 1). При этом индицируемая модель 1 закреплялась в специальном зажимном устройстве 2. Измерение избыточного давления в камерах прямого и обратного хода достигалось мембранными тензометрическими датчиками Д1 и Д2 соответственно, момент удара фиксировался акселерометром А, а крайнее заднее положение ударника — контактным регистратором перемещения П. Полученные сигналы поступали в блок усилителей БУ и светолучевой осциллограф ОС марки Н-117. Подключение модели к магистральной сети сжатого воздуха 3 осуществлялось гибким шлангом 4 диаметром 16 мм. Калибровка измерительно-регистрирующего канала производилась по образцовому манометру Мн с ценой деления шкалы 5 кПа.

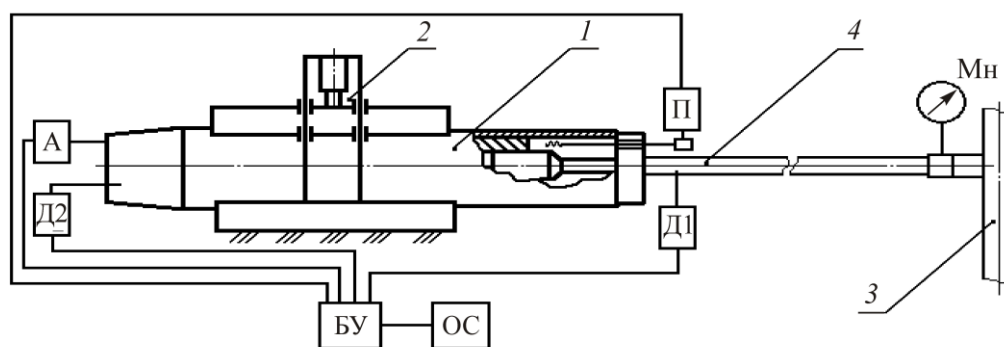


Рис. 1. Схема измерительного комплекса: 1 — модель пневмомолота; 2 — зажимное устройство; 3 — магистральная сеть; 4 — шланг; А — акселерометр; Д1 и Д2 — датчики давления в камерах прямого и обратного хода; П — регистратор перемещения; БУ — блок усилителей; ОС — осциллограф; Мн — манометр

На основе полученных данных определялись частота и энергия удара модели, а так же сила отдачи, действующая на ее корпус:

$$f = \frac{1}{T_1 + T_2}, \quad (1)$$

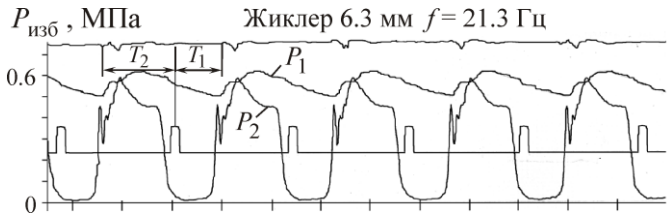
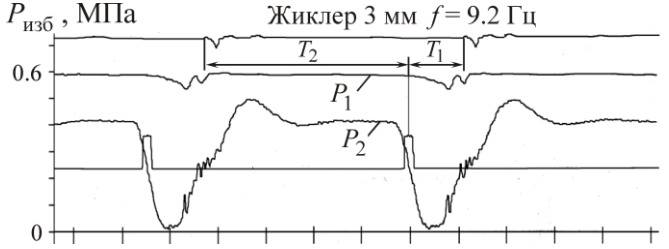
$$E = (\bar{p}_1 - \bar{p}_2) S_1 X_y, \quad (2)$$

$$F_0 = p_{1\max} S_1, \quad (3)$$

где T_1 и T_2 — продолжительность прямого и обратного хода ударника, с; $\bar{p}_1$ и $p_{1\max}$ — среднее и максимальное значения давления в камере прямого хода, МПа; $\bar{p}_2$ — противодавление со стороны камеры обратного хода при разгоне ударника, МПа; S_1 — рабочая площадь патрубка, м²; X_y — фактический ход ударника, м.

Проведенные измерения и вычисления (табл. 1) показывают, что установка сменных жиклеров позволяет в достаточно широком диапазоне варьировать частоту ударных импульсов модели (от 9.2 до 21.3 Гц) за счет значительного (более чем в 3 раза) увеличения времени обратного хода ударника T_2 . При этом изменение энергии единичного удара с 33.3 до 36.4 Дж не превышает 8.5 % от ее максимального значения, что не может оказать существенного влияния на результаты запланированных экспериментов.

ТАБЛИЦА 1. Параметры модели пневмомолота с массой ударника $m = 4$ кг и рабочей площадью патрубка $S_1 = 0.0024$ м²

Диаметр жиклера, мм	Индикаторная диаграмма давлений	Частота ударов f , Гц	Фактическая энергия удара E , Дж
6.3		$T = 0.047$ с $T_1 = 0.018$ с $T_2 = 0.029$ с $f = 21.3$ Гц	$X_y = 30$ мм $\bar{p}_1 = 0.53$ МПа $\bar{p}_2 = 0.02$ МПа $E = 36.4$ Дж $F_0 = 1.24$ кН
3		$T = 0.109$ с $T_1 = 0.016$ с $T_2 = 0.093$ с $f = 9.2$ Гц	$X_y = 25$ мм $\bar{p}_1 = 0.58$ МПа $\bar{p}_2 = 0.02$ МПа $E = 33.3$ Дж $F_0 = 1.21$ кН

Подготовка лабораторного стенда (рис. 2а) включала: формирование грунтового блока 1; образование пионерного канала 2 диаметром $d_0 = 60$ мм для уменьшения лобового сопротивления забоя; установку стартовой рамы 3 и ее регулировку в вертикальной и горизонтальной плоскостях по направлению оси скважины; соединение пневмомолота 4 с погружаемым элементом 5 с помощью конической насадки 6 и стяжного устройства 7; подключение пневмомагистрали к источнику энергии 8. Избыточное давление сжатого воздуха контролировалось по образцовому манометру Мн и поддерживалось на уровне 0.6 ± 0.05 МПа.

При проведении экспериментов на модели сохранялись основные технологические приемы выполнения работ оборудованием натуральных размеров. Статическое усилие подачи обеспечивалось действием силы тяжести наборного груза 9, закрепленного на подающем канате 10 и устанавливаемого в рабочее положение с помощью канатно-блочной системы и грузоподъемного механизма 11. Запуск пневмомолота осуществлялся открытием воздушного крана Кр, после чего начинался отсчет времени продвижения погружаемого элемента в грунтовой массе на заданное фиксированное расстояние, по достижении которого процесс останавливался для последующей переналадки системы.

Погружаемый элемент (рис. 2б) представлял собой отрезок металлической обсадной трубы 12 диаметром $d = 75$ мм и длиной $L = 4$ м, на головной части которой закреплен конусный наконечник 13 с углом при вершине равным 60°, что не превышает угол внутреннего трения супесчано-суглинистых грунтов естественной влажности. На расстоянии $l_1 = 0.4$ м от переднего края установлен цилиндрический расширитель 14 диаметром $D = 85$ мм, что позволяет исключить дальнейший контакт боковой поверхности трубы со стенками скважины.

Физико-механические свойства грунтового блока, приготовленного на основе естественного супесчаного грунта, варьировали в следующих пределах: плотность $\gamma = 1730 - 1770$ кг/м³, влажность $\omega = 5.2 - 7.4$ %, число ударов плотномера ДорНИИ $C = 3 - 6$.

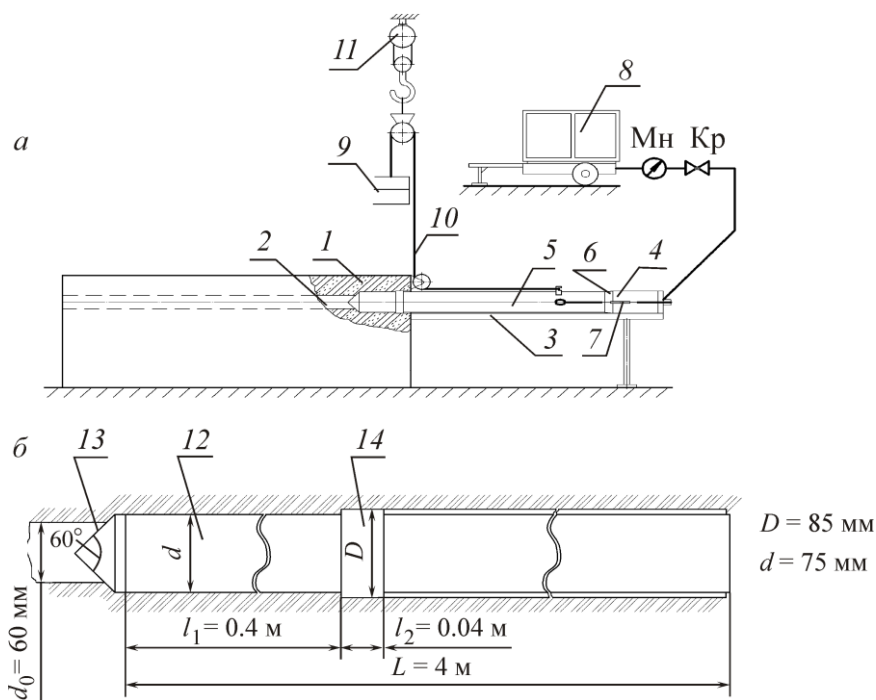


Рис. 2. Постановка экспериментальных исследований со схемой лабораторного стенда (а) и общим видом погружаемого элемента (б): 1 — грунтовый блок; 2 — пионерный канал; 3 — стартовая рама; 4 — пневмомолот; 5 — погружаемый элемент; 6 — насадка; 7 — стяжное устройство; 8 — источник энергии; 9 — наборный груз; 10 — подающий канат; 11 — грузоподъемный механизм; 12 — обсадная труба; 13 — наконечник; 14 — расширитель; Мн — манометр; Кр — воздушный кран

Эксперименты выполнялись в четыре серии, что позволило минимизировать влияние случайных факторов. В ходе проведения каждой из них задавались следующие параметры:

— статическое усилие подачи $N = 0.4, 0.8, 1.2$ кН, кратное величине возникающей силы отдачи пневмомолота F_0 ;

— частота ударных импульсов модели $f = 9.2$ и 21.3 Гц.

Для исключения влияния краевого эффекта, а также обеспечения постоянства лобового и бокового сопротивления забоя осуществлялось предварительное заглубление погружаемого элемента на расстояние 1 м от начала грунтового блока. Критерием эффективности процесса являлось время внедрения единичного метрового участка обсадной трубы при фиксированном статическом воздействии и установленном режиме работы модели пневмомолота. Итоговые значения измеряемых величин представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Результаты экспериментов

Номер серии опытов	Частота ударов f , Гц	Время погружения участка трубы длиной 1 м в зависимости от статического усилия подачи N		
		$N = 1/3F_0 = 0.4$ кН	$N = 2/3F_0 = 0.8$ кН	$N = F_0 = 1.2$ кН
1	9.2	11 мин 54 с	5 мин 34 с	12 мин 49 с
	21.3	4 мин 16 с	2 мин 58 с	2 мин 25 с
2	9.2	20 мин 50 с	16 мин 40 с	5 мин 23 с
	21.3	9 мин 48 с	4 мин 54 с	2 мин
3	9.2	20 мин 50 с	12 мин 47 с	7 мин 34 с
	21.3	16 мин 40 с	5 мин 57 с	6 мин 16 с
4	9.2	23 мин 49 с	9 мин 16 с	8 мин 20 с
	21.3	23 мин 46 с	4 мин 4 с	3 мин 20 с

По полученным данным построены графики изменения скорости погружения обсадной трубы в исследуемом диапазоне значений статического усилия подачи и частоты ударных импульсов пневмомолота (рис. 3).

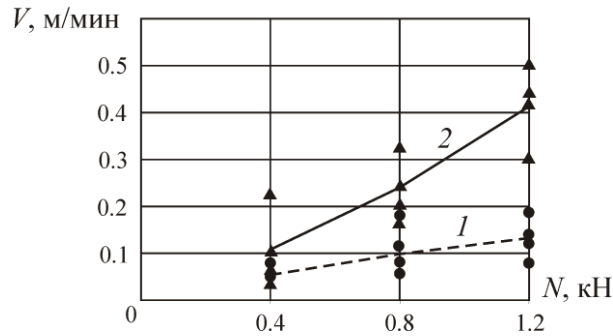


Рис. 3. Изменение скорости погружения обсадной трубы при различных частотных режимах пневмомолота: 1 — $f = 9.2$ Гц; 2 — $f = 21.3$ Гц

Характер представленных экспериментальных зависимостей показывает, что в результате определенного сочетания двух внешних силовых воздействий происходит не просто пропорциональный рост производительности технологического процесса, а наблюдается качественно иная картина движения погружаемого элемента за счет формирования более благоприятных условий взаимодействия системы “пневмомолот – погружаемый элемент – грунтовый массив”. Так, при полной компенсации силы отдачи работающей модели приложением дополнительного статического усилия $N = F_0 = 1.2$ кН и постоянной энергии единичного удара ($E \approx 35$ Дж) наращивание ударной мощности за счет ее частотной компоненты в 2.3 раза сопровождается ростом скорости погружения обсадной трубы в среднем более чем в 3.1 раза (с $V = 0.13$ до $V = 0.41$ м/мин). Такой дополнительный прирост объясняется с одной стороны повышением количества наносимых ударных импульсов за единицу времени, а с другой — увеличением разницы между полной x_1 и обратной x_2 амплитудами движения рассматриваемой колебательной системы за один удар, составляющую остаточное x_0 перемещение погружаемого элемента в грунтовом массиве:

$$V = (x_1 - x_2) f. \quad (4)$$

Используя формулу для определения скорости движения пневмопробойника в грунте [5] и известное решение задачи о расширении грунтовой полости коническим расширителем при его ударном нагружении [6], получим следующие выражения:

$$x_1 = \frac{Ek_y}{F_1 + F_2 + F_0 - N} = \frac{Ek_y}{\pi Q q_1 \left[\left(\frac{D^2 - d_0^2}{4} \right) \frac{1 + k_1 \operatorname{ctg} \alpha}{1 - k_1 \operatorname{tg} \alpha} + (dl_1 + Dl_2) \psi k_1 \right] + F_0 - N}, \quad (5)$$

$$x_2 = \operatorname{ctg} \alpha \frac{1 - \delta}{G + \delta K} \cdot \frac{1 - k_1 \operatorname{tg} \alpha}{1 + k_1 \operatorname{ctg} \alpha} \cdot \frac{\psi F_1 + F_0 - F_2 - N}{\frac{\pi}{4} (D^2 - d_0^2)}, \quad (6)$$

где k_y — коэффициент передачи ударного импульса; F_1 и F_2 — лобовое и боковое сопротивление грунта, Н; Q — исходное внутреннее давление обжатия участка грунтового массива, Па; k_1 — коэффициент трения “металл – грунт”; α — угол наклона образующей конуса к оси симметрии внедряемого тела; q_1 — нормальное напряжение от груди забоя, Па; ψ — коэффициент бокового давления грунта; δ — величина относительного объемного уплотнения кольцевого грунтового слоя; G — модуль сдвига грунта, Па; K — модуль упругой разгрузки, Па.

ВЫВОДЫ

Ввиду наличия пионерной скважины сопротивление моделируемого грунтового массива погружению рассматриваемого элемента характеризуется преобладанием в структуре действующих сил бокового трения. Увеличение частоты виброударных воздействий сопровождается ростом амплитуд колебательных движений обсадной трубы за счет снижения сил бокового трения грунта о поверхность контакта внедряемого тела.

При прочих равных условиях приложение достаточной по величине дополнительной внешней статической силы вызывает повышение скорости продвижения системы “пневмомолот – погружаемый элемент” посредством сокращения фазы ее обратного перемещения в грунтовой массе. Расширение спектра силовых воздействий путем введения дополнительного статического усилия и увеличение ударной мощности пневмомолота за счет ее частотной компоненты повышает эффективность ударного импульса и способно расширить технологические возможности виброударного прокалывания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Kershenbaum N. Ya. and Minaev V. I.** Laying horizontal and vertical wells by impact method, Moscow, Nedra, 1984. [**Кершенбаум Н. Я., Минаев В. И.** Прокладка горизонтальных и вертикальных скважин ударным способом. — М.: Недра, 1984. — 140 с.]
2. **Danilov B. B. and Smolyanitsky B. N.** Ways to improve the efficiency of driving steel pipes into the ground with pneumatic hammers, Journal of Mining Science, 2005, vol. 41, no. 6, pp. 566–572. [**Данилов Б. Б., Смоляницкий Б. Н.** Пути повышения эффективности забивания в грунт стальных труб пневматическими молотами // ФТПРПИ. — 2005. — № 6. — С. 81–88.]
3. **Smolyanitsky B. N., Chervov V. V., Trubitsyn V. V., Tishchenko I. V., and Veber I. E.** New pneumatic impact machines for special construction work, Mechanization of construction, 1997, no. 7, pp. 12–18. [**Смоляницкий Б. Н., Червов В. В., Трубицын В. В., Тищенко И. В., Вебер И. Э.** Новые пневмоударные машины для специальных строительных работ // Механизация строительства. — 1997. — № 7. — С. 12–18.]
4. **Chervov V. V.** Impact energy of pneumatic hammer with elastic valve in back-stroke chamber, Journal of Mining Science, 2004, vol. 40, no. 1, pp. 74–83. [**Червов В. В.** Энергия удара пневмомолота с упругим клапаном в камере обратного хода // ФТПРПИ. — 2004. — № 4. — С. 80–89.]
5. **Tupitsyn K. K.** About the process of interaction of pneumatic breakers with the ground, Journal of Mining Science, 1980, vol. 23, no. 1, pp. 54–63. [**Тупицын К. К.** О процессе взаимодействия пневмопробойников с грунтом // ФТПРПИ. — 1980. — № 4. — С. 24–28.]
6. **Isakov A. L. and Zemtsova A. E.** The problem of expanding the ground cavity during trenchless replacement of underground utilities, Journal of Mining Science, 1998, vol. 34, no 3, pp. 267–271. [**Исаков А. Л., Земцова А. Е.** Задача о расширении грунтовой полости при бестраншейной замене подземных коммуникаций // ФТПРПИ. — 1998. — № 3. — С. 95–100.]