

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МОЛОТОВ ДЛЯ ЗАБИВАНИЯ СТАЛЬНЫХ СВАЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

Владимир Васильевич Червов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный просп., 54, доктор технических наук, заведующий лабораторией механизации горных работ, тел. (383) 205-30-30 доб. 128, e-mail: chervov@misd.ru

Обоснована актуальность применения пневматических молотов при «закрытом способе» строительства подземных сооружений. Определены силы сопротивления, возникающие при забивании стальной трубы в грунт. На основе анализа опыта длительной эксплуатации пневматических молотов с переменной структурой мощности установлено соответствие величины энергии удара диаметру забиваемой трубы. Предложена зависимость энергии единичного удара пневматического молота от диаметра трубы, забиваемой открытым концом. Обоснован главный параметр пневматического молота, определяющий технические возможности данной машины и эксплуатационные требования. Даны характеристики типоразмерного ряда пневматических молотов с переменной структурой мощности. Приведены примеры вертикального погружения труб на строительных объектах страны. Показана технологическая возможность сооружения подпорных стен в грунте на основе использования стального проката: двутавров, швеллеров, шпунта и т.п. Описаны схемы размещения технологической оснастки для надежного крепления пневматического молота к забиваемому в грунт стержневому элементу.

Ключевые слова: пневматический молот, труба, масса, удар, частота ударов, сжатый воздух, расход воздуха, грунт, сила

EXPERIENCE OF STEEL PILE DRIVING BY PNEUMATIC HAMMERS IN UNDERGROUND CONSTRUCTION BY THE CUT-AND-COVER METHOD

Vladimir V. Chervov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Eng.), Head of Mining Mechanization Laboratory, +7 (383) 205 30 30 ext. 128, e-mail: chervov@misd.ru

The timeliness of application of pneumatic hammers in the deep bore tunneling in underground construction is justified. The penetration resistance forces in steel pipe driving in soil are determined. The analysis of long-term operation of adjustable capacity pneumatic hammers shows the conformity of the blow energy and the driven pipe diameter. The relationship between the unit blow energy and the open-ended pipe diameter is proposed. The main pneumatic hammer parameter to govern the machine performance is substantiated. The standard pneumatic hammers of adjustable capacity are characterized. The cases of vertical pipe driving at construction sites in Russia are described. The technological capability of construction of retention wall in soil using rolled steel, namely, I-beams, U-sections, piling bars, etc. is illustrated. The production tooling arrangements to ensure secure mounting of the hammer on the axial element driven in soil are described.

Keywords: pneumatic hammer, pipe, mass, blow, blow frequency, compressed air, air flow rate, soil, force

При строительстве метрополитена используют как «закрытый способ» ведения работ, без вскрытия дневной поверхности, так и «открытый способ», при котором станции и тоннели сооружаются в котлованах или в траншеях с последующей засыпкой грунтом [1]. Закрытый способ применяется при строительстве линий глубокого заложения, когда этого требуют не только гидрогеологические условия или сохранность ценной застройки в городах, но и тогда, когда применение открытого способа строительства сопряжено с экономическими потерями, существенно превышающими затраты на закрытый способ строительства. Во всех остальных случаях станции и тоннели мелкого заложения делают открытым способом. В Новосибирске строительство всех подземных станций метрополитена было осуществлено открытым способом. Котлованы для сооружения таких станций имеют глубину более 30 метров. Для предотвращения обрушения грунта и обеспечения устойчивости стен котлованов применяется способ предварительного сооружения стены в грунте. После полного возведения стен в грунте на полную проектную глубину можно проводить безопасную выемку грунта из котлована. Кроме котлованов для строительства станций требуются специальные камеры для опускания проходческого щита на проектную глубину заложения тоннелей метрополитена или подъема на дневную поверхность. Стенки этих камер изготавливаются из предварительно забитых на проектную глубину вертикальных труб путем их жесткого соединения между собой по мере извлечения грунта. В результате образуется вертикальная выработка в грунте с надежно укрепленными стенами.

Энергия удара при забивании трубы расходуется на преодоление силы сопротивления со стороны грунта [2].

Сила сопротивления F при забивании трубы открытым концом в грунт складывается из трех составляющих: силы лобового сопротивления F_1 , силы трения F_2 по боковой поверхности вследствие обжатия окружающим грунтом и сил трения F_3 и F_4 в результате действия веса грунтового керна.

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4. \quad (1)$$

Сила F_1 лобового сопротивления пропорциональна площади кольцевого сечения трубы, которая увеличивается как за счет диаметра d , так и за счет толщины δ стенки трубы.

$$F_1 = f(d; \delta). \quad (2)$$

Силы трения F_2 по боковой поверхности пропорциональны площади боковой поверхности трубы, поэтому зависят от диаметра трубы линейно.

$$F_2 = f(d). \quad (3)$$

Силы трения наружной поверхности трубы о грунт F_3 от действия веса грунтового керна возрастают в квадратичной зависимости от диаметра трубы [3].

$$F_3 = f(d^2). \quad (4)$$

Силы трения внутренней поверхности трубы о грунтовый керн F_4 пропорциональны квадрату диаметра трубы.

$$F_4 = f(d^2). \quad (5)$$

Сопротивление от действия веса грунтового керна с увеличением диаметра забиваемой трубы становится значительным. Поэтому забивание трубы диаметром более 0,8 м необходимо производить с периодическим удалением грунтового керна из трубы. Это уменьшит силу сопротивления F при забивании трубы открытым концом в грунт до двух составляющих F_1 и F_2 , которые зависят линейно от увеличения диаметра d трубы. Снижение до минимума сил трения F_3 и F_4 , действующих от веса грунтового керна, дает возможность использовать линейную зависимость энергии удара от диаметра трубы при выборе пневматического молота для забивания трубы.

Диапазон диаметров забиваемых в грунт труб находится в пределах от 0,1 м до 1,2 м. Исходя из многолетнего опыта прокладки стальных труб-кожухов [4] подземных коммуникаций известно, что для забивания стальной трубы открытым концом диаметром 1,4 м требуется пневмомолот с энергией удара 12 кДж, а при диаметре 0,3 м – 1,3 кДж.

Если принять линейную зависимость требуемой для забивания трубы энергии удара от ее диаметра в диапазоне 0,3-1,4 м с открытым концом, то

$$L = f(d_{TP}) = 9,7 \cdot d_{TP} - 1,6. \quad (6)$$

где L – требуемая энергия удара, кДж;

d_{TP} – диаметр забиваемой трубы, м.

Сила сопротивления F при забивании трубы закрытым концом в грунт складывается из двух составляющих: силы лобового сопротивления F_1 и силы трения F_2 по боковой поверхности вследствие обжатия трубы окружающим грунтом.

$$F = F_1 + F_2. \quad (7)$$

Сила F_1 лобового сопротивления пропорциональна площади поперечного сечения трубы, которая увеличивается в квадратичной зависимости от диаметра d .

$$F_1 = f(d^2). \quad (8)$$

Сила трения F_2 по боковой поверхности пропорциональна площади боковой поверхности трубы, поэтому зависит от диаметра трубы линейно.

$$F_2 = f(d). \quad (9)$$

При малом диаметре трубы, забиваемой закрытым концом в грунт, сила трения F_2 по боковой поверхности во много раз больше силы F_1 лобового сопротивления. Именно сила трения F_2 по боковой поверхности является определяющей при прокладке трубной плети большой длины. Поэтому можно принять линейную зависимость энергии удара от диаметра трубы, забиваемой в грунт закрытым концом.

Для забивания стальной трубы с закрытым торцом диаметром 104 мм достаточно 0,3 кДж, а для трубы диаметром 325 мм требуется 0,9 кДж.

Если принять линейную зависимость требуемой для забивания трубы энергии удара от диаметра в диапазоне 0,1-0,3 м с закрытым концом, то

$$L = f(d_{TP}) = 3 \cdot d_{TP}. \quad (10)$$

где L – требуемая энергия удара, кДж;

d_{TP} – диаметр забиваемой трубы, м.

Для забивания труб малого диаметра, в принципе возможно использование пневмомолота с большой энергией удара 12 кДж. Но это нецелесообразно по экономическим соображениям:

- увеличенная стоимость оборудования;
- большие эксплуатационные расходы на аренду автокрана большой грузоподъемности для монтажа оборудования;
- компрессор увеличенной производительности;
- значительная сила отдачи не будет полностью уравновешена силой трения трубы о грунт, что потребует дополнительного оборудования для создания напорного усилия.

Кроме этого, большие габариты и вес пневмомолота требуют применения копровой установки. Поэтому, для каждого диаметра труб целесообразно использовать пневмомолот с определенной энергией удара.

Главным параметром пневматических молотов [5, 6] для забивания труб, имеющих общий принцип работы системы воздухораспределения [7, 8], была принята масса ударной части (см. таблицу). Этот параметр позволяет определить энергию удара исходя из заданной предударной скорости $v_y = (4,0...4,5) \text{ м/с}$ на номинальном избыточном давлении сжатого воздуха $p_m = 0,6 \text{ МПа}$.

$$L = 0,5 \cdot M_{y0} \cdot v_y^2 \quad (11)$$

Технические характеристики пневмомолотов серии Тайфун.

Машина	Масса ударника, кг	Энергия удара, Дж	Частота ударов, с ⁻¹	Расход, м ³ /с	Диаметр труб, мм	Диаметр (длина) машины, мм	Масса машины, кг
Тайфун-40	40	400	3-5	0,033-0,058	До 159	160 (1000)	80
Тайфун-70	70	700	2,5-3,7	0,050-0,075	До 273	160 (1400)	140
Тайфун-130	130	1300	2-4	0,063-0,125	До 325	240 (1330)	280
Тайфун-190	190	1800	2-3,2	0,083-0,133	До 530	240 (1700)	370
Тайфун-320	320	3000	1,5-2,5	0,100-0,150	До 630	270 (1920)	650
Тайфун-500	500	4300	1-1,7	0,100-0,167	До 820	400 (2000)	1350
Тайфун-740	740	6000	1-1,5	0,133-0,200	До 1020	400 (2650)	1750
Тайфун-1000	1000	8500	0,8-1,3	0,167-0,250	До 1220	460 (2670)	2500
Тайфун-1500	1500	12000	1-1,5	0,266-0,400	До 1420	600 (2700)	3500

В Казани работы по сооружению фундаментных оснований ведут десятки пневматических молотов Тайфун-190 и Тайфун-500. Объемы составляют многие сотни стальных труб-свай в год (рис. 1).



Рис. 1. Возведение подпорных стен при строительстве открытым способом станций метро в Казани при помощи пневматического молота Тайфун-500

Для опускания проходческого щита при строительстве метрополитена в Новосибирске при помощи пневматического молота Тайфун-190 были сооружены подпорные стены вертикальной камеры в грунте глубиной 28 м. Для этого были забиты около двухсот вертикальных труб диаметром 377 мм (рис. 2).



Рис. 2. Вид сверху внутри камеры на проходческий щит (он справа) и подпорную стену из забитых в грунт труб диаметром 377 мм при помощи пневматического молота Тайфун-190.

В Екатеринбурге пневматическим молотом Тайфун-500 за 2,5 часа была забита вертикальная обсадная труба диаметром 1420 мм на глубину 8 м.

Очень большой объем работ по забиванию двутавров с сечением №60 пневматическим молотом Тайфун-500 был выполнен при строительстве станции метро "Березовая роща" (рис. 3). Мягкая работа пневмомолота обеспечила выполнение работы по сооружению подпорных стен с погрешностью расположения верхнего торца двутавра относительно проектной отметки не более 10 мм.



Рис. 3. Сооружение подпорной стены в грунте при строительстве станции метро "Березовая роща" в Новосибирске открытым способом: пневматический молот Тайфун-500 забивает двутавр (слева) и ряд забитых в грунт двутавров

Для забивания вертикального шпунта 1 (рис. 4) или двутавра необходимо на его задний конец присоединить при помощи продольных сварных швов отрезок трубы 3 длиной около 0,4 м. Отрезок трубы предназначен для закрепления машины при помощи насадки и стяжного устройства и для наилучшей передачи ударного импульса забиваемому элементу [9–11].

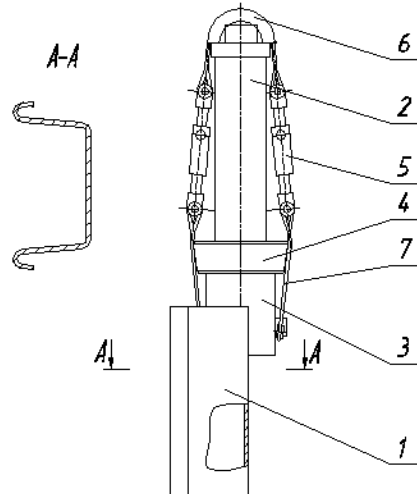


Рис. 4. Соединение машины с забиваемым шпунтом

1 – шпунт; 2 – пневматический молот; 3- труба; 4 – насадка; 5 – талреп; 6 - прижим; 7 – канат сдвоенный; 8 – канат задний

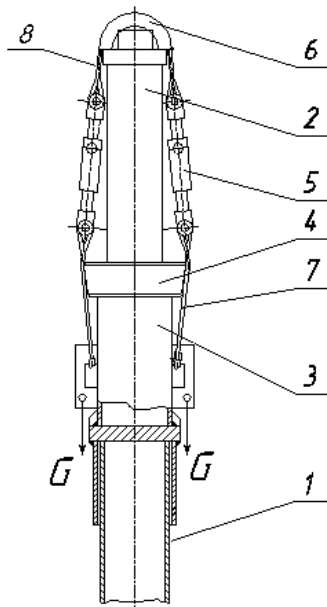


Рис. 5. Соединение машины с вертикальной трубой

1 – труба; 2 – пневматический молот; 3 – переходник; 4 – насадка; 5 – талреп; 6 - прижим; 7 – канат сдвоенный; 8 – канат задний; G – усилие от тяговой лебёдки, веса пригруза или дополнительного стяжного устройства.

Для забивания одиночной вертикальной трубы пневматический молот необходимо закрепить при помощи стяжного устройства, приварив к трубе два ребра. Для забивания большого количества вертикальных труб следует изготовить переходник 3 (рис. 5). Это позволит сократить время подготовительных операций.

Выводы

1. Для каждого диаметра труб рекомендуется использование пневматического молота с определенной энергией удара.

2. При наличии нескольких пневмомолотов с разной энергией удара целесообразно забивание первой секции трубной плети начинать пневмомолотом с меньшей силой отдачи и энергией удара.

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории механизации горных работ ИГД СО РАН за активное участие в изготовлении и в стендовых испытаниях опытных образцов пневматических молотов.

Работа выполнена в рамках государственного задания по проекту № 0256-2021-0003.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Власов С.Н., Торгалов В.В., Виноградов Б.Н. Строительство метрополитенов. – М.: Транспорт, 1987. – 278 с.
2. Григоращенко В. А. Прокладка металлических труб пневмопробойниками. – Новосибирск: Изд. ИГД СО АН СССР. Препринт №38, 1990. – 32 с.
3. Бабаков В. А. Об одном варианте расчета движения пневмопробойника в грунте. Горные машины: сб. науч. тр. ИГД СО АН СССР. – Новосибирск, 1980. – С.80–84.
4. Гурков К.С., Климашко В.В., Костылев А.Д. и др. Новый типоразмерный ряд пневмопробойников // ФТПРПИ. – 1989. – № 4. – С. 61–65.
5. Гурков К.С., Климашко В.В., Костылев А.Д. и др. Пневмопробойники. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО РАН, 1990. – 217 с.
6. Смоляницкий Б.Н., Червов В.В., Скачков К.Б. Новые пневмоударные машины Института горного дела СО РАН // Механизация строительства. – 2001. – №12. – С.7–12.
7. Патент РФ № 2462575. Устройство ударного действия. / Червов В.В., Смоляницкий Б.Н., Трубицын В.В., Червов А.В., Тищенко И.В. – опубл. в Б. И. 2012, № 27.
8. Патент РФ № 2400350. Устройство ударного действия. / Червов В.В., Смоляницкий Б.Н., Трубицын В.В. – опубл. в Б. И. 2010, № 27.
9. Суднишников Б.В., Есин Н.Н., Тупицын К.К. Исследование и конструирование пневматических машин ударного действия. – Новосибирск: Наука, 1985. – 134 с.
10. Тищенко И.В. Модели пневматических импульсных генераторов с переменной структурой ударной мощности // Известия вузов. Строительство. – 2014. – № 3. – С.79–87.
11. Червов В.В. Основы конструирования пневмомолота для бестраншейной прокладки коммуникаций // Проблемы и перспективы развития горных наук: международная конференция, 1–5 ноября 2004. – Новосибирск. – С. 127–132.

© В. В. Червов, 2021