

УДК 624.155.15

Исследование сравнительной эффективности заглубления стального шпунта в плотный грунт различными погружающими машинами

Верстов Владимир Владимирович,

д-р техн. наук, проф.,

Гайдо Антон Николаевич,

канд. техн. наук, доц., Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университете

В статье исследуются параметры различных машин, обеспечивающих погружение стального шпунта через прослойки плотного грунта при устройстве ограждений котлованов. В результате экспериментальных работ установлена эффективность ударного и виброударного способов при повышенной частоте ударов и небольшой высоте сброса молота.

Ключевые слова: стальной шпунт, молот, вибрационный погружатель, частота удара, энергия удара.

E-mail: gaidoan@mail.ru

Vladimir V. Verstov,

Dr. of Tech. Sci.,

Anton N. Gaido,

PhD. Tech. Sci., Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Study the effectiveness of the steel sheet pile driving in dense soil by different mechanisms

The article explores the parameters of various machines for dipping the the steel sheet pile through the dense layers of the soil. This is necessary for deep pits - the protection of the walls. The efficiency of the use of impact hammer and vibrator-hammer blow at a high frequency and a low drop height of impact hammer.

Keywords: steel sheet piling, pile driving hammer, vibrator, vibration frequency, impact energy.

Практика современного строительства в городских условиях характеризуется устройством подземных сооружений разного назначения:

подземные этажи высотных и многоэтажных зданий, торговые центры, паркинги, транспортные развязки, тоннели и т.п. Такие конструкции необходимо возводить в котлованах значительной глубины, что при ограниченной территории строительной площадки и высоком уровне грунтовых вод является непростой задачей. В этих условиях необходимо предусматривать ограждения котлованов, которые должны служить как водогрунтонепроницаемой преградой, так и иметь достаточную жесткость для восприятия давления прилегающего массива грунта и временных нагрузок, возникающих от движения строительной техники, площадок складирования и т.п.

В этой связи вопросы разработки эффективных технологий сооружения ограждения котлованов приобретают высокую актуальность и большое практическое значения.

На основании анализа опыта строительства установлено, что в зависимости от условий производства работ применяются две технологии устройства ограждения котлованов – погружение по контуру возводимого сооружения различными методами готовых элементов в виде свай, стальных балок различного поперечного сечения, шпунта и устройство на месте производства монолитных стен в грунте, касательных или секущихся буронабивных свай, закрепление грунта в виде цементации, замораживания и т.п. [1].

Авторами статьи установлено, что для котлованов глубиной до 15 м устройство ограждений из стального шпунта различных форм поперечных сечений является наиболее технологичным в сравнении с остальными способами по критериям минимальной стоимости, продолжительности работ и площади, требуемой для установки технологического оборудования [2]. После завершения работ нулевого цикла шпунт можно извлечь из грунта для утилизации или повторного использования,

оборачиваемость современных шпунтовых систем может достигать 5 – 8 циклов.

Известно, что для обеспечения надежной работы ограждения шпунт необходимо погрузить на достаточную глубину (обычно принимают равной утроенной глубине котлована) и обеспечить обязательное заглубление нижнего торца в водоупорные слои грунта. Однако эта задача осложняется при наличии в геологическом разрезе слоев плотных грунтов, что может препятствовать погружению шпунта на проектную глубину, приводить к его деформации (потеря продольной устойчивости, разрыв замков, «увод» ограждения от требуемого очертания в плане и т.д.).

В таких условиях для определения возможности успешного производства работ необходимо провести пробное погружение шпунта и проанализировать полученные технологические показатели – глубину и время погружения, количество ударов и конечный отказ для забивного способа при фиксации момента наступления деформаций погружаемых элементов. При таких опытных работах можно выбрать технологию погружения шпунта, оптимальные технологические режимы и параметры погружения. Описанию подобного цикла эксперимента и посвящена предлагаемая вниманию читателей статья.

На строительной площадке были проведены опытные работы по погружению в грунт стального шпунта следующих профилей: корытного Ларсен-IV, Ларсен-V, ШК-1 и плоского ШП-1. Параметры шпунта приведены в табл.1.

Грунты опытной площадки представлены следующими напластованиями:

- песок насыпной 0,0 – 2,0 м ;

- торф 2,0 – 2,2 м;
- песок мелкий с включением гравия 2,2 – 3,0 м;
- суглинок моренный твердой и полутвердой консистенции с гравием и галькой (до 20 %) от 3,0–4,0 м.

Таблица 1

Технические параметры погружаемого шпунта

Профиль шпунта	Обозначение	Размеры поперечного сечения, мм			Площадь поперечного сечения, см ²	Масса 1 м, кг
		Ширина (м/у замками)	Высота	Толщина листа		
Плоский	ШП-1	400	–	10	82	62,6
Корытный	ШК-1	400	75	10	64	49,0
То же	Л-IV	400	204,5	12-14,8	94,3	74,0
То же	Л-V	420	196	15-21	127,6	100,0

Целью экспериментов был выбор технологии и установление возможности эффективного погружения шпунта в толщу твердого суглинка, основные физико-механические характеристики которого приведены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические характеристики грунта опытной площадки
(суглинка мореного твердого)

№ п/п	Наименование показателя	Размерность	Величина
1	Плотность грунта	г/см ³	2,72
2	Коэффициент пористости	ед.	0,33
3	Влажность естественная	то же	0,11
4	Показатель консистенции	то же	-0,22
5	Угол внутреннего трения	градусы	28
6	Сцепление	МПа	0,035
7	Модуль деформации	МПа (кгс/см ²)	36 (360)
8	Коэффициент фильтрации	м/сут	0,05

Для погружения шпунта в сравнительном варианте использовались следующие способы:

- забивка механически молотом свободного падения массой 3,5 т и 3,65 т с частотой сброса 15–20 мин⁻¹. Энергия удара 17,5 кДж и 18,2 кДж. Количество энергии, передаваемой на торец погружаемого шпунта в минуту 350 и 364 кДж;

- забивка трубчатым дизельным молотом с частотой падения 50 мин⁻¹ и массой ударной части 1,8 т, общая масса молота 3,65. Высота падения ударной части молота 3 м. Энергия удара 48 кДж. Количество энергии, передаваемой на торец погружаемого шпунта в минуту 2400 кДж;

- забивка гидравлическим молотом одиночного действия с массой ударной части 4,0 т (общая масса молота 6,2 т) с частотой удара 100 мин⁻¹. Высота падения ударной части молота 0,1 – 0,8 м. Энергия удара 20 кДж. Количество энергии, передаваемое на торец погружаемого шпунта в минуту 2000 кДж;

- вибрационное погружение вибропогружателем В-402 массой 2,74 т, работающим в вибрационном режиме при частоте колебаний 1440 мин⁻¹ и амплитуде 25 мм. Такой режим работы предусматривает жесткое крепление вибровозбудителя со шпунтом с помощью гидравлического зажима;

- виброударное погружение вибропогружателем ВП-1 с массой 4,7 т, настроенным на работу в режиме свободного беспружинного вибромолота с частотой ударов 420 мин⁻¹ и амплитудой колебаний 20,6 мм. В процессе экспериментов, масса вибропогружателя была последовательно увеличена до 6,7 т. Энергия удара о торец погружаемого шпунта составил 1,4 кДж. Количество энергии, передаваемое на торец погружаемого шпунта в минуту составляет 588 кДж. Следует отметить, что такой виброударный

способ погружения не предусматривает жесткого сцепления вибратора с заглубляемым элементом и аналогичен режимам работ современных гидравлических молотов, используемых для погружения свайных элементов заводского изготовления.

Технологические схемы опытного погружения шпунта указанными способами представлены на рис.1.

Всеми перечисленными способами погружали в замок 4 – 6 шпунтин длиной 8 – 11 м каждого профиля. Сравнительные результаты технологических показателей погружения представлены в табл. 2.

Результаты экспериментов в виде диаграмм изменения глубины, скорости и отказов опытного погружения шпунта представлены на рис. 2.

При этом критерием для прекращения работ служили деформации верхнего торца шпунта, потеря продольной устойчивости или осадка от одного удара (отказ) 1 – 2 мм. Определение момента прекращения работ основано на том, что, как показала практика производство шпунтовых работ, в плотных грунтах при указанных явлениях возникают деформации нижней зоны погруженного шпунта, разрывы замков и как следствие нарушение сплошности ограждения в грунте.

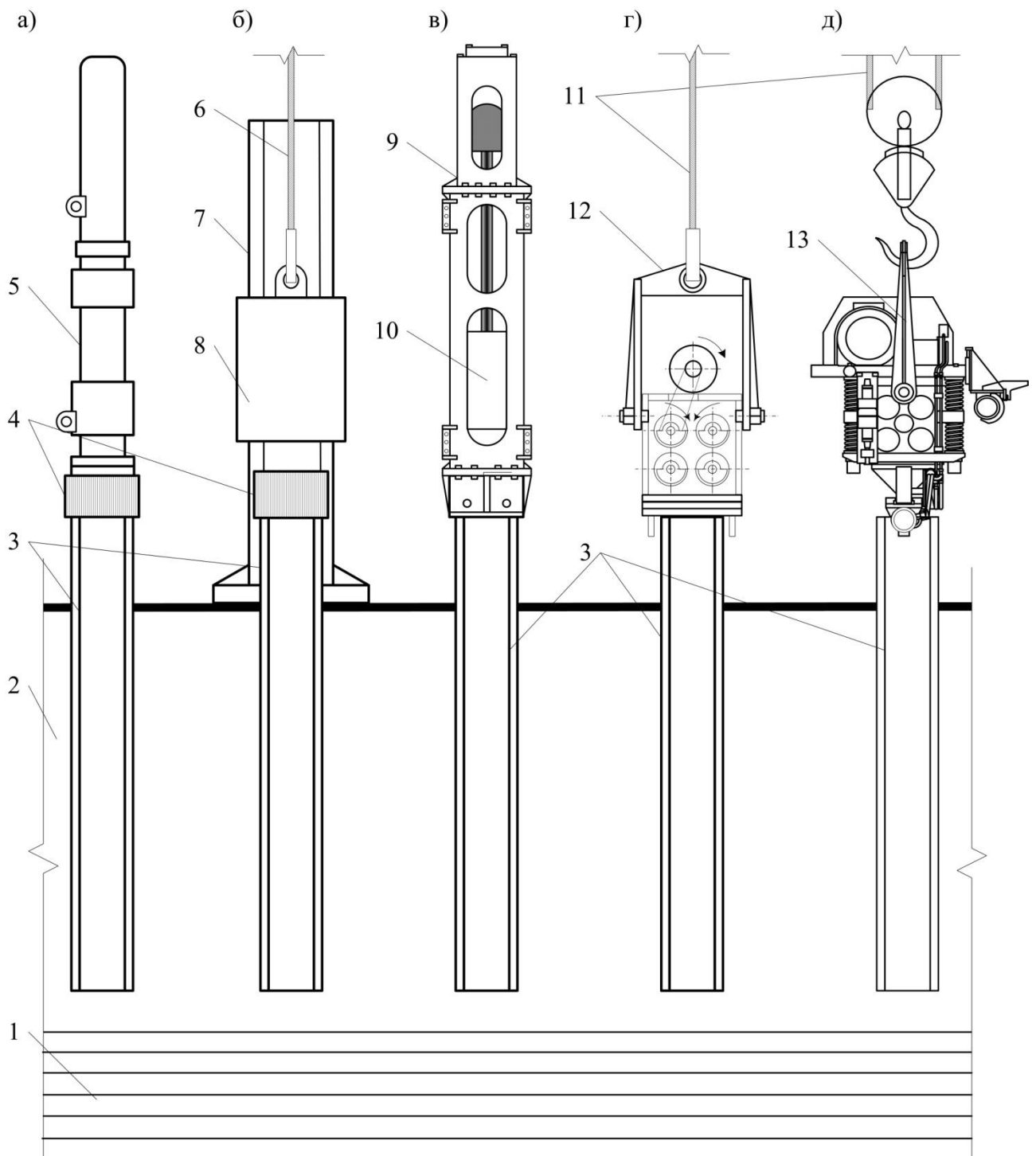


Рис. 1. Технологические схемы погружения шпунта в процессе опытных работ: а, б, в – забивка соответственно дизельным, механическим и гидравлическим молотами; г, д – погружение в виброударном и вибрационном режимах, соответственно; 1 – плотный водоупорный грунт, 2 – верхнее напластование слабых грунтов, 3 – шпунт, 4 – наголовник, 5 – дизельный молот, 6 – канат лебедки копра, 7 – стойка копра, 8 –

механический молот свободного падения, 9 – гидравлический молот, 10 – ударная часть молота, 11 – крюк крана, 12 – свободный беспружинный вибро молот, 13 – вибропогружатель ВП-402.

Таблица 2

Сравнительные результаты погружения шпунта

Наименование показателя	Технология погружения шпунта					
	Забивка мех. молотом, массой, т		Забивка дизельн. молотом	Забивка гидравл. молотом	Вибрационное погружение В-402	Виброударное погружение ВП-1
	3,5	5,65				
1	2	3	4	5	6	7
А. Шпунты корытного профиля: Ларсен-IV						
Макс. глубина погружения, м	4,13	6,0	7,5	7,5	4,0	7,0
То же в слой суглинка	1,13	3,0	4,5	4,5	1,0	4,0
Конечный отказ, см	0,1-0,2	0,5-0,6	0,3	0,4	–	–
Скорость погружения шпунта без дефектов, см/мин	11-12	12-13	17	17-20	8-13	10
Погружение шпунта Ларсен-V						
Макс. глубина погружения, м	6,1	6,2	7,5	8,0	3,7	7,0 – 8,0
То же в слой суглинка	3,1	3,2	4,5	5,0	0,7	2,5 – 3,0
Конечный отказ, см	0,4-0,6	0,2-0,6	0,2-0,5	0,3	–	–
Скорость погружения шпунта без дефектов, см/мин	12	12-15	17	17-20	8-13	10
Погружение шпунта ШК-1						
Макс. глубина погружения, м	4,66	4,0	6,0	5,5	3,7	5,5–6,0
То же в слой суглинка	1,66	1,0	3,0	2,5	0,7	2,5–3,0
Конечный отказ, см	0,1	0,2	0,5-0,6	0,4	–	–

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
Скорость погружения шпунта без дефектов, см/мин	10	11-12	14-15	16	8-13	9-11
Б. Погружение плоского шпунта ШП-1						
Макс. глубина погружения, м	3,0	2,5	3,2	3,0	3,0	3,0-3,2
То же в слой суглинка	0	0	0,2	0	0	0-0,2
Конечный отказ, см	0,2	0,2	0,3-0,4	0,4	–	–
Скорость погружения шпунта без дефектов, см/мин	10	11-12	14-15	16	8-13	9-11

В результате проведенных экспериментов установлено, что максимальная глубина погружения шпунта корытных профилей Ларсен-IV, Ларсен-V и ШК-1 механическим молотом составила 5,5-6,2 м в том числе в мореный суглинок на 2,5 – 3,2 м. При этом увеличение массы молота приводило к значительным деформациям верхнего торца шпунта без увеличения глубины погружения. В ряде опытов при массе молота 5,65 т и относительно небольшой высоте сброса 0,3 – 0,5 м в конце погружения деформации верха шпунта были столь велики, что для продолжения эксперимента требовалось деформированную часть шпунта срезать.

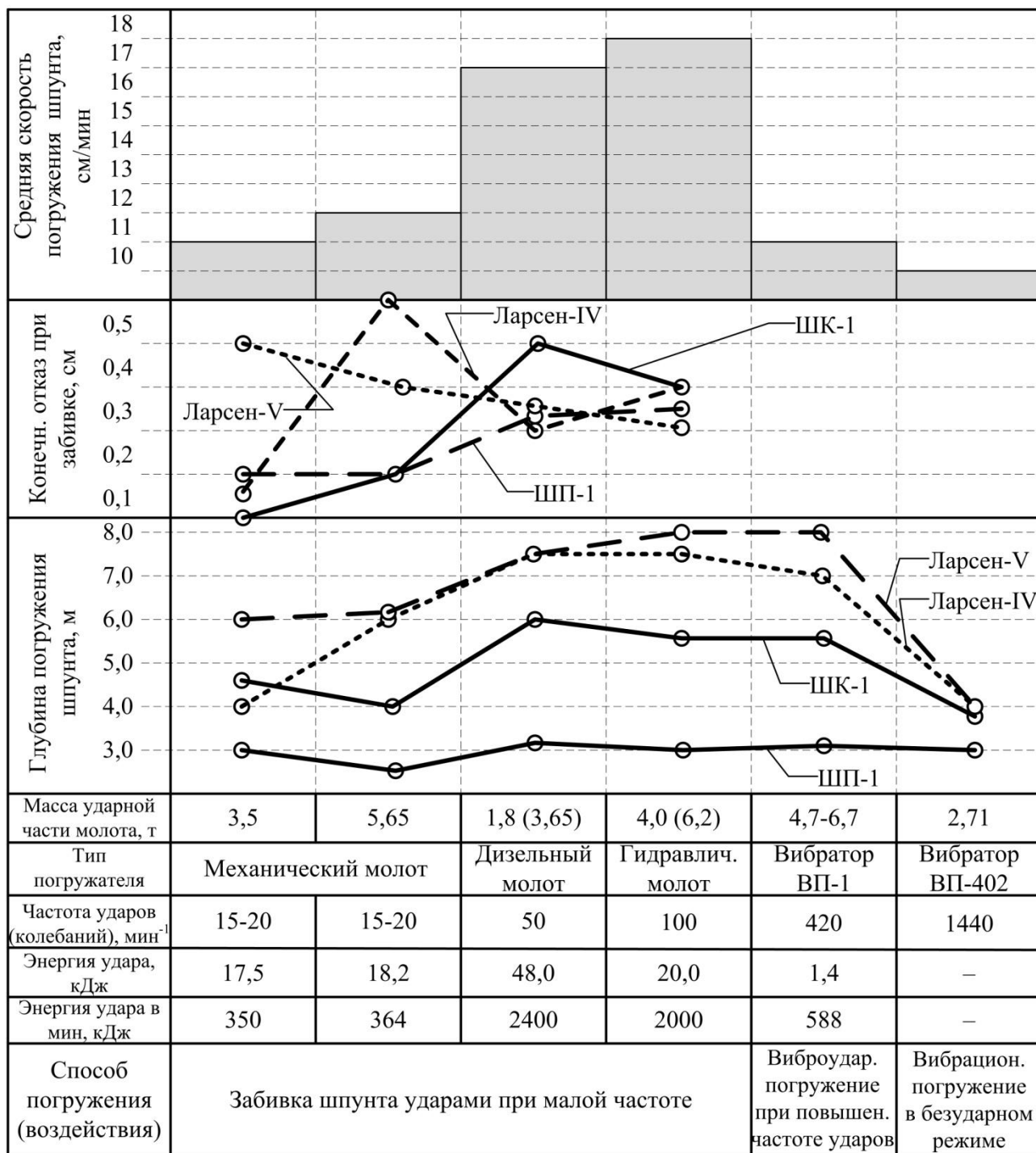


Рис. 2. Диаграммы технологических параметров опытного погружения шпунта.

Погружение шпунта всех профилей вибропогружателем В-402 в безударном режимах работы обеспечивало полную сохранность элементов при отсутствии деформаций. Однако при достижении шпунтом кровли

моренных суглинков, а в ряде случаев при заглублении в такую породу на 0,1 – 0,5 м погружение прекращалось. По показаниям осциллографа, амплитуда колебаний шпунта при внедрении в суглинок составляла 6 – 8 мм, что было достаточно для преодоления сил бокового трения и не обеспечило преодоление лобового сопротивления твердого суглинка.

В связи с тем, что вибрационное погружение шпунта не обеспечило требуемых результатов, были проведены дополнительные опыты по виброударной забивке шпунта погружателем ВП-1, снабженным вилочной направляющей и настроенным на режим свободного беспружинного вибромолота [3]. Для определения эффективной и устойчивой работы общую массу этого вибропогружателя последовательно устанавливали в пределах 4,7; 5,7 и 6,7 т. Увеличение массы достигалось приваркой стального листа к днищу корпуса вибратора (рис. 3). Каждая ступень массы характеризовалась её отношением к вынуждающей силе соответственно 0,25; 0,1 и 0,36.

Такая настройка вибропогружателя ВП-1 позволяла успешно заглублять шпунт корытного профиля на 2,5 – 4,0 м в моренный суглинок со скоростью 10 см/мин без критических деформаций. Увеличение массы вибромолота обеспечило повышение устойчивости работы и исключило его раскачивание в поперечной плоскости. Из испытанных наиболее рациональным оказался режим погружения машиной с массой 6,7 т. В этом же режиме проведены опыты по погружению плоского шпунта ШП-1. Как и в случае ударного воздействия такой шпунт погружался лишь до кровли моренного суглинка, а затем начинал деформироваться с потерей продольной устойчивости, что в каждом случае требовало прекращать эксперимент.

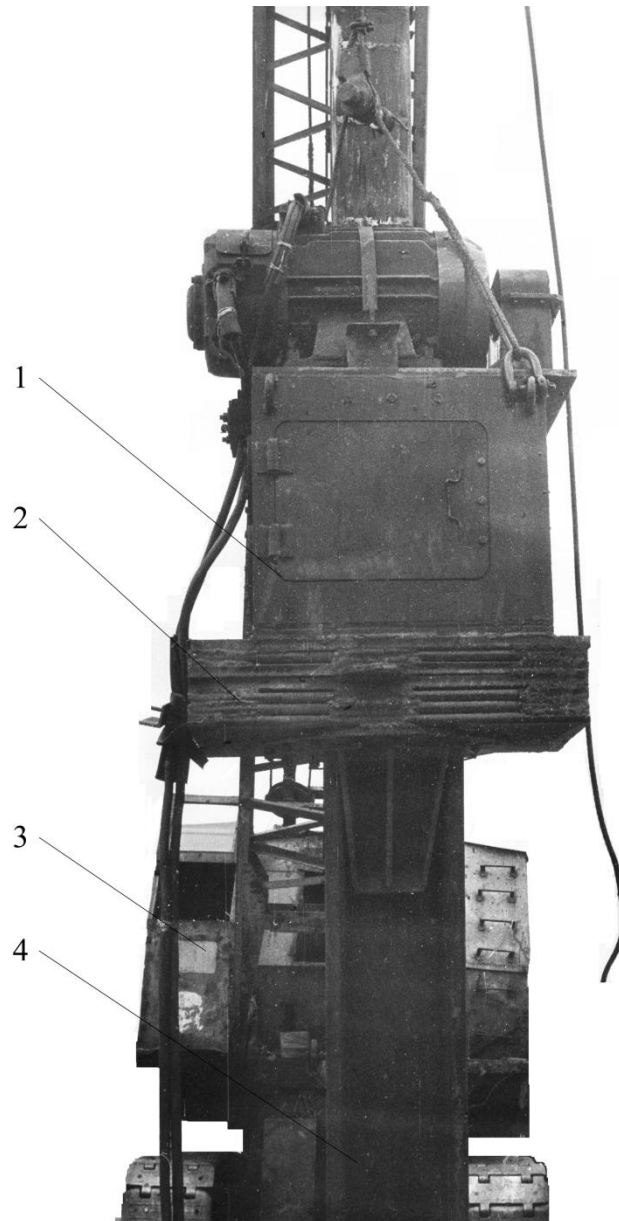


Рис. 3. Общий вид вибропогружателя ВП-1: 1 – корпус вибропогружателя; 2 – дополнительные стальные листы, увеличивающие массу агрегата; 3 – гусеничный стреловой кран; 4 – шпунт.

В результате проведенных опытных работ с учетом диаграмм рис. 2 и данными табл. 2 можно заключить об эффективности применения ударного и виброударного способов для погружения шпунтов корытного профиля с достаточными прочностными характеристиками (Ларсен-IV и Ларсен-V) в прослой плотных грунтов. При этом характер изменения глубины и скорости погружения шпунта указывает на рациональность

применения ударных режимов с частотой свыше 100 ударов в минуту с суммарной энергией удара не менее 2000 кДж в минуту и виброударных режимов при частоте удара свыше 420 ударов в минуту с при отношении общей массы машины к вынуждающей силы – 0,4.

С учетом этого практически значимого вывода на рис. 3 показан график, определяющий зависимость глубины погружения (H) стального шпунта ударным способом корытного профиля и виброударными способами в зависимости от суммарной энергии удара ($E_{заб}$) прикладываемой к торцу шпунта. График построен на основании представленных выше экспериментальных данных погружения шпунта механическим, дизельным и гидравлическим молотами, а также вибропогружателем ВП-1, настроенным на виброударный режим работы.

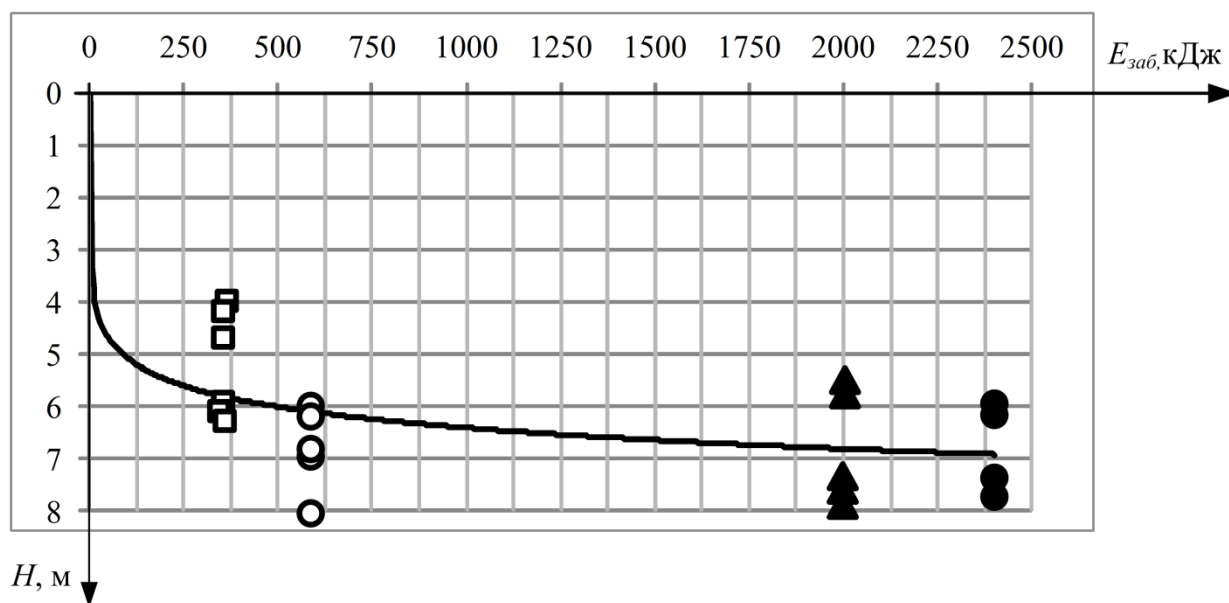


Рис. 3. График погружения шпунта ударным и виброударным способами с заглублением в моренный суглинок: □ ○ ▲ ● – экспериментальные точки полученные для погружения шпунта механическим молотом, вибропогружателем ВП-1, гидравлическим и дизельным молотами, соответственно.

В результате математической обработки опытных результатов, получены выражения, описывающие процесс погружения шпунта корытного профиля в зависимости от частоты и энергии удара. Для шпунта типа Ларсен-IV зависимость имеет следующий вид (коэффициент корреляции равен 0,98):

$$H = 7,60 \cdot (1 - e^{-0,003 E_{заб}}) \quad (1)$$

где H , м – глубина погружения шпунта;

$E_{заб}$, кДж – суммарная энергия удара передаваемая на торец шпунта в минуту.

Для шпунта типа Ларсен-V зависимость имеет вид (коэффициент корреляции равен 0,99):

$$H = 7,90 \cdot (1 - e^{-0,004 E_{заб}}) \quad (2)$$

Для шпунта типа ШК-1 зависимость имеет вид (коэффициент корреляции равен 0,98):

$$H = 5,88 \cdot (1 - e^{-0,004 E_{заб}}) \quad (3)$$

Результирующая зависимость, определяющая характер погружения для шпунта корытного профиля всех типов имеет следующий вид (коэффициент корреляции равен 0,89):

$$H = 7,12 \cdot (1 - e^{-0,004 E_{заб}}) \quad (4)$$

На основании графиков, представленных на рис. 3 и выражений 1–4, можно заключить что погружать в прослой плотных грунты шпунт эффективно ударным или виброударным способами с относительно не высокой энергией единичного удара и повышенной частотой, что обеспечивает бездефектное заглубление элемента в грунт с приемлемой для практики скоростью.

Такой результат можно объяснить изменением характера сопротивления слоев плотного грунта внедрению в него шпунта. При повышенной частоте ударов циклическое нагружение вызывает усталостное нагружение грунта под торцем погружаемого шпунта, что в свою очередь разрушает монолитную массу и уменьшает лобовое сопротивление внедрению элемента. С учетом этого, режим работы сваебойного оборудования для погружения шпунта в рассматриваемых инженерно-геологических условиях должен обеспечивать повышенную частоту ударов. В проведенных опытах такой режим найден для низкочастотных вибраторов типа ВП-1, которые необходимо утяжелять до отношения общей массы к вынуждающей силе до 0,4. Забивать шпунт эффективно так же свайными молотами при частоте удара не менее 100 мин⁻¹. Погружение шпунта плоского поперечного сечения не рекомендуется из-за возникновения критических деформаций при достижении элементом кровли плотного грунта.

С учетом вышесказанного можно сделать вывод о том, что при необходимости погружения шпунтов на строительных площадках с геологическим разрезом, характеризующимся преимущественным залеганием в нижней зоне разреза прослоев плотных грунтов мощностью 3 – 5 м, необходимо проводить пробное погружение 5 – 15 шпунтин проектной длины в замок для определения возможности эффективного выполнения работ и рациональных технологических параметров. Авторами установлена целесообразность ударного и виброударного способов погружения шпунта при повышенной частоте ударов.

При ограничении уровня динамического воздействия, например в условиях плотной городской застройки, следует рассматривать технологию вибрационного погружения шпунта высокочастотными вибраторами городского типа, технологические параметры которого

(частоту и амплитуду колебаний, вынуждающую силу) следует предварительно рассчитывать по методике, учитывающей величину удельного сопротивления срыву прорезаемых торцем шпунта прослоев плотных грунтов (см. приложение 12 в работе [1]).

Практическое использование представленных авторами результатов экспериментальных исследований позволит разработчикам проектов производства работ в каждом конкретном случае инженерно-геологических условий назначать рациональные виды динамических воздействий на погружаемый стальной шпунт и выбирать наиболее эффективные режимы работы погружающих машин.

Список литературы

1. *Мангушев Р.А.* Современные свайные технологии / Р.А. Мангушев, А.В. Ершов, А.И. Осокин. – М.: Изд-во АСВ, 2010 – 240 с.
2. *Верстов, В.В.* Технология и комплексная механизация шпунтовых и свайных работ / В.В. Верстов, А.Н. Гайдо, Я.В. Иванов – СПб.: Издательство «Лань», 2012. – 288 с.
3. *Верстов В. В.* Отечественный высокоэффективный вибропогружатель для выполнения специальных работ в грунтах / В.В. Верстов, Е.М. Перлей, И.В. Гольденштейн // Механизация строительства. – 2000. – № 9. – С. 15.