

## Критерии выбора вибропогружателей

*К.т.н., доцент Г.Я. Булатов\*;  
доцент Н.Б. Колосова,*

*ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

**Ключевые слова:** вибропогружатели свай; критерии выбора; вынуждающая сила вибропогружателя; статический момент дебалансов; амплитуда колебаний; скорость вибропогружения

В последние годы актуальность создания сверхнадежных фундаментов в России повышается из-за активного перехода к высотному строительству. Но также важна безопасность возведения таких фундаментов как для производителей работ, так и для окружающей среды. По мнению авторов, технология устройства свайного фундамента с помощью вибропогружателей является оптимальной в данном отношении.

В настоящее время известны следующие типы вибропогружателей [1-7]:

- направленного действия (низко- и высокочастотные);
- с пригрузочной подрессоренной плитой;
- вибромолоты;
- вибраторы двойного действия;
- с распределенным внутри сваи-оболочки вибровозбудителем (виброцепь);
- вибровдавливатели;
- виброкабестаны,
- с осевым отверстием или без него.

Одним из важнейших направлений повышения производительности труда при устройстве свайного фундамента вибропогружением является оптимальный выбор вибропогружателя свай.

В СНиП 3.02.01-87 «Земляные сооружения, основания и фундаменты» приведены основные условия выбора вибропогружателей свай. В данной статье приведены дополнительные критерии выбора вибропогружателей, предложенные на основе системного подхода [1,8].

**Критерий IV-1:**  $F_0^{\mathcal{G}} \geq F_0^T$ ,

где  $F_0$  – вынуждающая сила вибропогружателя,

индексы:  $\mathcal{G}$  – возможная величина,  $T$  – требуемая величина.

Значение требуемой вынуждающей силы вибропогружателя  $F_0^T$ , кН, определяем по формуле:

$$F_0^T = \frac{F_d - K_{\text{вс}} G_{\text{вс}}}{k_s}, \quad (1)$$

при

$$k_s = \frac{k_{s,w} k_{s, \text{эп}}}{k_{s, \text{ул}} k_{s \rho}}, \quad (2)$$

где  $F_d$  – несущая способность сваи;

$K_{\text{вс}}$  – коэффициент условий вибропогружения свай (равный 2,8);

$G_{\text{вс}}$  – суммарный вес вибросистемы (вибропогружатель, свайный элемент и наголовник), кН;

$k_s$  – коэффициент снижения бокового сопротивления грунта во время вибропогружения;

$k_{s, \text{эп}}$  – коэффициент влияния характеристик грунта, принимаемый по таблице 1 СНиП 3.02.01-87 (ориентировочно составляет: для песчаных влажных грунтов средней плотности при крупности от Булатов Г.Я., Колосова Н.Б. Критерии выбора вибропогружателей

гравелистых до мелких – 2,6...6,2; для глинистых грунтов с показателем текучести от 0 до 0,8 – 1,3...3,5);

$k_{s,w}$  – коэффициент влияния водонасыщения песков (крупные пески – 1,2; средние – 1,3; мелкие и пылеватые – 1,5);

$k_{s,ил}$  – коэффициент влияния заиления песков (для заиленных – 1,2);

$k_{sp}$  – коэффициент влияния плотности песков (для плотных – 1,2, для рыхлых – 0,9).

$$\text{Критерий IV-2: } F_0^T \geq K_{TC_1} G_{ec},$$

где  $K_{TC_1}$  – коэффициент для трубосвай (1,3 – с извлечением грунта и 2,5 – без извлечения).

$$\text{Критерий IV-3: } K_m^e \geq K_m^T,$$

где  $K_m$  – статический момент массы дебалансов.

Здесь:

$$K_m^T = \frac{M_{ec} A_0^T}{K_{TC_2}}, \quad (3)$$

где  $M_{ec}$  – суммарная масса вибропогружателя, сваи и наголовника;

$K_{TC_2}$  – коэффициент для полых свай и свай-оболочек с извлечением грунта из внутренней полости (равный 1,2);

$A_0^T$  – необходимая амплитуда колебаний при отсутствии сопротивления грунта, принимается по табл. 2 СНиП 3.02.01-87 (для грунтов от водонасыщенных песков и илов до гравелистых песков и твёрдых глин: от 0,7см до 1,4см при глубине погружения до 20 метров, от 0,9см до 1,6см при глубине погружения свыше 20 метров);

При окончательном выборе типа вибропогружателя следует учитывать, что при равной вынуждающей силе большей погружающей способностью обладает вибропогружатель с большим статическим моментом массы дебалансов  $K_m$ , а при прочих равных условиях следует выбирать вибропогружатель с регулируемыми в процессе работы параметрами.

$$\text{Критерий IV-4: } v^e \geq v^T,$$

где  $v^e$  – возможная скорость вибропогружения;

$v^T$  – требуемая скорость вибропогружения.

По мнению авторов, значение требуемой скорости вибропогружения  $v^T$  можно принять в пределах от 10см/мин до 20 см/мин.

Величину возможной скорости вибропогружения определяют по формуле (см/мин):

$$v_1^e = \frac{C_e \lambda}{30} - F_d \frac{C_e^2}{15(150N + G_{ec} C_e)}, \quad (4)$$

при

$$C_e = An, \quad (5)$$

где  $C_e$  – характеристика вибрации;

$A$  – половина размаха колебаний верха сваи, см;

$n$  – число оборотов эксцентриков в мин.;

Булатов Г.Я., Колосова Н.Б. Критерии выбора вибропогружателей

$\lambda$  – коэффициент, учитывающий отношение статического сопротивления грунта к динамическому при вибропогружении, согласно источнику [2] принимается: для песчаных грунтов – 2,0...6,8, для глинистых – 2,0...4,5; согласно источнику [3] принимается: для песков и супесей – 4,5...3,0 от водонасыщенных до маловлажных, для суглинков – 4,0...2,5, для глин – 3,0...2,0 при показателе текучести от 0,75 до 0,25;

$N$  – полезная величина мощности, расходуемая на погружение сваи, кВт;

$G_{\text{вс}}$  – суммарный вес вибросистемы (вес сваи и вибратора с наголовником), т.

$$N = N_{\text{дв}} \eta_{\text{дв}} - N_x, \quad (6)$$

при

$$N_x = \varphi N_{\text{паспорт}}, \quad (7)$$

где  $N_{\text{дв}}$  – полная потребляемая активная мощность в конце погружения, определяемая ваттметром, кВт;

$\eta_{\text{дв}}$  – КПД электродвигателя вибропогружателя (0,8 – 0,9 по [3]);

$N_x$  – потребляемая мощность холостого хода;

$\varphi$  – доля паспортной мощности (для низкочастотных вибропогружателей – 0,25);

$N_{\text{паспорт}}$  – паспортная мощность электродвигателя.

По другим формулам (например, по А.С. Головачеву):

$$v_2^6 = \frac{612 N - 0,4 F_d C_\epsilon \delta h_n}{F_d k_\sigma k_\tau - G_{\text{вс}} k_\tau (1 + \delta h_n)}, \quad (8)$$

где, кроме прежних обозначений,

$$\delta = \frac{U \tau^h}{F \sigma^h}, \quad (9)$$

где  $U$  – периметр сечения сваи;

$F$  – площадь поперечного сечения ствола сваи, м<sup>2</sup>.

$h_n$  – глубина погружения сваи,

а значение амплитуды колебания можно определить по формуле:

$$A \leq \frac{k_1 (k_2 N - N_x)}{n \left( \frac{F_d}{k_3 \lambda} - G_{\text{вс}} \right)}, \quad (10)$$

где  $k_1$  – коэффициент, равный 153;

$k_2$  – коэффициент, равный 0,85;

$k_3$  – коэффициент, равный 0,7.

Значение возможной скорости вибропогружения  $v^6$  также можно определить по обобщенной формуле, рекомендованной как для метода забивки, так и для метода вибропогружения, например по [3]:

$$v_3^6 \leq \frac{\eta F E_d}{\frac{F_d}{M} \left( \frac{F_d}{M} + \eta F \right)} \frac{Q_n + \varepsilon^2 (q + q_1)}{Q_n + q + q_1}, \quad (11)$$

где  $V_3^e$  – возможная скорость вибропогружения, см/мин;

$\eta$  – коэффициент, тс/м<sup>2</sup>, зависящий от типа сваи, согласно СНиП 3.02.01-87 [3] принимается: для железобетонных свай с наголовником – 150 тс/м<sup>2</sup>; для деревянных – (80 – 100) тс/м<sup>2</sup>; для стальных с наголовником – 500 тс/м<sup>2</sup>;

$E_d$  – расчетная энергия удара, тс\*см, зависящая от величины вынуждающей силы и принимаемая в пределах от 450 тс\*см до 3500 тс\*см соответственно для значений вынуждающей силы от 10 тс до 80 тс [3];

$M$  – коэффициент, вводимый для метода вибропогружения, зависящий от вида грунта и принимаемый в пределах 0,7 - 1,3 (меньшее значение соответствует глинистым грунтам, большее – гравийным) [3];

$Q_n$  – полный вес вибропогружателя, тс;

$\varepsilon$  – коэффициент восстановления удара, при применении вибропогружателей равен нулю;

$q$  – вес сваи и наголовника, тс;

$q_1$  – вес подбабака, тс, при использовании вибропогружателя равен нулю.

$$\text{Критерий IV-5: } \frac{1}{T_{чп}^e} \geq \frac{1}{T_{чп}^T},$$

где  $T_{чп}^e$  – возможное значение чистого времени вибропогружения свай;

$T_{чп}^T$  – требуемое значение чистого времени вибропогружения свай.

Чистое время вибропогружения свай запишем в виде:

$$T_{чп} = \sum \frac{h_i}{v_i}, \quad (12)$$

где  $h_i$  – толщина расчётного слоя;

$v_i$  – среднее значение скорости погружения при прохождении сваей  $i$ -го слоя, определяемое по приведенным выше формулам возможных скоростей для различных глубин погружения свай.

$$\text{Критерий IV-6: } \Pi^e \geq \Pi^T.$$

Здесь  $\Pi^e$  – эксплуатационная производительность вибропогружения свай.

Основные положения по расчетам эксплуатационной производительности изложены в литературе [1,2,4,5,6,7,9,10,11,12].

$$\text{Критерий V-1: } \sigma^e \leq \sigma^T,$$

где  $\sigma$  – нормальные напряжения в поперечном сечении материала сваи в процессе вибропогружения.

$$\sigma^T = [\sigma], \quad (13)$$

где  $[\sigma]$  – допустимое нормальное напряжение.

При сжатии возможные нормальные напряжения определяем по формуле:

$$\sigma_c^e = \frac{F_0^e + G_{вс}}{F}, \quad (14)$$

при растяжении – по следующей формуле:

$$\sigma_p^e = \frac{F_0^e - G_{6c}}{F} \quad (15)$$

**Критерий V-2:**  $\sigma_{раз}^e \leq \sigma_{раз}^T$ ,

где  $\sigma_{раз}$  – напряжение разрыва при вибропогружении, вызываемое явлением гидравлического удара жидкости, заполняющей внутреннюю полость оболочки во время вибропогружения.

Жидкостью может быть вода акватории и даже слабые грунты в текучем состоянии, например илы. Здесь возможные напряжения разрыва оцениваются специальными расчетами. Однако при применении различных технологических мероприятий, защищающих трубчатую сваю от явлений гидравлического удара, они могут быть снижены.

### Выводы

1. В приведённой работе на основе системного подхода удалось расширить количество рассматриваемых параметров, и тем самым создать условия для оптимального выбора вибропогружателя.

2. Приведённые зависимости, по нашему мнению, в большей степени удовлетворяют требованиям удобства расчётов, их прозрачности и логичности, что достигалось, в том числе, частичной заменой эмпирических зависимостей на аналитические.

### Литература

1. Булатов Г. Я. Введение в общую теорию технологий (на примере строительства). Учебное пособие. СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2003. 175 с.
2. Ясинецкий В. Г., Фенин Н. К. Организация и технология гидромелиоративных работ. М. : Агропромиздат, 1986. 352 с.
3. Справочник по строительству портов и гидротехнических сооружений / Под общей ред. Г.Н. Николаева. М. : Транспорт, 1972. 474 с.
4. Зерцалов М. Г., Хечинов Ю. Е., Корчагин Е. А., Жохов Е. И., Конюхов Д. С., Маньков А. В. Производство гидротехнических работ. Часть 2. Учебник для вузов. М. : Изд-во МГОУ, 2010. 394 с.
5. Tsinker Gregory P. Port engineering: planning, construction, maintenance and security. Harbors. Design and Construction. Printed in the USA : New Jersey, 2004. 881 p.
6. FOREVER (FONDation REnforcees VERTicalement). Synthese des rezultates et recommandation du Projet national sur les MICROPIEUX. Paris. Ponts et chaussées, 2004. 347 p.
7. Gerard Philipponnat, Bertrand Hubert. Fondation et ouvrages en terre. Paris : Eyrolles, 2008. 548 p.
8. Булатов Г. Я. Обобщенные критерии оптимального выбора технологий и машин // Инженерно-строительный журнал. 2009. №1. С. 32-39.
9. Телешев В. И., Ватин Н. И., Марчук А. Н., Комаринский М. В. Производство гидротехнических работ. Часть 1. Учебник для вузов. М. : Изд-во АСВ, 2010. 432 с.
10. Булатов Г. Я. К теории производительности строительных машин // Труды СПбГТУ. 2007. №502 (К 100-летию инженерно-строительного факультета). С. 129-138.
11. Булатов Г. Я., Терехов А. А. Численное моделирование производительности экскаваторов // Инженерно-строительный журнал. 2011. №2(20). С. 7-15.
12. Теличенко В. И., Терентьев О. М., Лapidус А. А. Технология строительных процессов. Учебник для вузов. Часть 1. М. : Изд-во Высшая школа, 2008. 392 с.

*\*Георгий Яковлевич Булатов, Санкт-Петербург, Россия*

*Тел. раб.: +7(812)297-59-49; эл. почта: bulatov.spbgpu@gmail.com*

## Criteria for selecting the vibratory pile drivers

**G.Ya. Bulatov;**

**N.B. Kolosova,**

*Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia*

*+7(812)297-59-49; e-mail: bulatov.spbgpu@gmail.com*

### Key words

vibratory pile drivers; selection criteria; driving force of vibropiling; unbalance static moment; vibration amplitude; speed of vibropiling

### Abstract

Nowadays in Russia there has been intensive transition from low-rise construction to the high-rise construction. High-rise construction requires reliable foundations. However, these foundations can be performed only by using modern technologies and construction machinery. In this regard, the optimization problem of choice the necessary construction equipment gains in special importance.

This article is devoted to refining the selection of equipment for pile driving, inter alia, the vibratory pile drivers.

The additional selection criteria of vibratory pile drivers are proposed by increasing the number of parameters on the basis of systematic approach. It creates, in turn, the necessary conditions for optimal choice of vibratory pile drivers.

In addition, known empirical dependencies were replaced by analytical dependencies. Received dependencies, according to the authors, meet more convenience of calculations, their transparency and consistency.

### References

1. Bulatov G. Ya. *Vvedeniye v obshchuyu teoriyu tekhnologiy (na primere stroitelstva)*. [Introduction to the general theory of technologies (on the example of construction)]. Uchebnoye posobiye. Saint-Petersburg : Izd-vo SPbGPU, 2003. 175 p. (rus)
2. Yasinetskiy V. G., Fenin N. K. *Organizatsiya i tekhnologiya gidromeliorativnykh rabot*. [Organization and technology of irrigation and drainage works]. Moscow: Agropromizdat, 1986. 352 p. (rus)
3. Nikolayev G. N. *Spravochnik po stroitelstvu portov i gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Handbook on construction of ports and hydraulic structures]. Moscow: Transport, 1972. 474 p. (rus)
4. Zertsalov M. G., Khechinov Yu. E., Korchagin Ye. A., Zhokhov Ye. I., Konyukhov D. S., Mankov A. V. *Proizvodstvo gidrotekhnicheskikh rabot. Chast 2*. [Operation of hydraulic works. Part 2]. Uchebnik dlya vuzov. Moscow: Izd-vo MGOU, 2010. 394 p. (rus)
5. Tsinker G. P. *Port engineering: planning, construction, maintenance and security*. New Jersey: Harbors Design and Construction, 2004. 881 p. (rus)
6. *FOREVER (FONDation RENforcees VERTicalement). Synthèse des résultats et recommandation du Projet national sur les MICROPIEUX*. Paris: Ponts et chaussées, 2004. 347 p.
7. Philipponnat G., Hubert B. *Fondation et ouvrages en terre*. Paris: Eyrolles, 2008. 548 p.
8. Bulatov G. Ya. *Magazine of Civil Engineering*. 2009. No. 1. Pp. 32-39. (rus)
9. Teleshev V. I., Vatin N. I., Marchuk A. N., Komarinskiy M. V. *Proizvodstvo gidrotekhnicheskikh rabot. Chast 1*. [Operation of hydraulic works. Part 1]. Uchebnik dlya vuzov. Moscow: Izd-vo ASV, 2010. 432 p. (rus)
10. Bulatov G. Ya. *Trudy SPbGTU* [Proceedings of SPbGTU]. 2007. No. 502. Pp. 129-138. (rus)
11. Bulatov G. Ya., Terekhov A. A. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 2(20). Pp. 7-15. (rus)
12. Telichenko V. I., Terentyev O. M., Lapidus A. A. *Tekhnologiya stroitelnykh protsessov. Chast1*. [Technology of construction processes. Part 1]. Uchebnik dlya vuzov. Moscow: Vysshaya shkola, 2008. 392 p. (rus)

**Full text of this article in Russian: pp. 71-75**