

## **МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАЯХ ПРИ ЗАБИВКЕ**

*Представлено вдосконалений метод визначення напружень стиснення, що виникають у голові залізобетонних паль при їх забиванні в ґрунти. Викладено також методи визначення граничних напружень стиснення та розтягнення у палях.*

**Ключові слова:** *палля, напруження.*

*Представлен усовершенствованный метод определения сжимающих напряжений, возникающих в голове железобетонных свай при их забивке в ґрунты. Изложены также методы определения предельно допустимых сжимающих и растягивающих напряжений в сваях.*

**Ключевые слова:** *свая, напряжения.*

*Will Presented advanced method of the determination compressing voltages, appearing in head iron-concrete pile under their submersion in soils. They Are Stated also methods of the determination at most possible compressing and spraining voltages in pile.*

**Kea words:** *pile, voltages.*

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими задачами.** При использовании железобетонных свай для устройства фундаментов зданий и сооружений важно уже на стадии проектирования знать фактические напряжения, возникающие в головной части свай при их забивке, а также предельно допустимые напряжения, при которых еще обеспечивается сохранность бетона свай от разрушений. Наличие достоверных методов расчета указанных напряжений позволит производить прогноз бездефектной забивки свай в ґрунты, обеспечивая тем самым снижение непредвиденных потерь бетона, арматуры и энергии в фундаментостроении.

**Анализ последних исследований и публикаций, в которых положено начало решению данной проблемы.**

**Метод определения сжимающих напряжений в голове свай.** Касаясь напряжений, возникающих в головной части свай, следует отметить, что в научно-технической литературе имеют место более 15 формул, предложенных специалистами для расчета динамических напряжений в сваях в разные годы [1]. Из них для расчета сжимающих напряжений в голове свай широкое применение получили формулы Бахолдина Б.В. [2], Чернышева Ю.Г. [3] и Школьников И.Е. [4].

Для свай длиной до 12 м предпочтительно использовать формулы Бахолдина Б.В. и Чернышева Ю.Г., а для свай длиной более 12 м – формулу Школьников И.Е., которая базируется на волновой теории удара. Формула

Чернышева Ю.Г. по сравнению с формулой Бахолдина Б.В. лучше обоснована теоретически и позволяет получать более точные результаты [3]. В связи с этим данная формула была включена в ТУ-1-77 [5] и ТУ-1-82 [6]. Указанные преимущества формулы Чернышева Ю.Г. послужили основой для ее рассмотрения в качестве исходной формулы в наших исследованиях.

**Выделение ранее не решенных частей общей проблемы, которым посвящена данная статья.** Формула Чернышева Ю.Г. в том виде, в котором она представлена в работе [3], недостаточно полно учитывает особенности ударного взаимодействия системы «дизель-молот – шабот – наголовник – амортизатор – свая – грунт». Это обусловлено тем, что для нее характерны следующие теоретические недостатки:

– не учитывается деформируемость шабота и наголовника молота, а также деформируемость его верхнего амортизатора (при использовании для забивки свай Н-образного наголовника);

– не учитывается сопротивление грунтов погружению свай;

– эпюра распределения динамических сжимающих напряжений по длине свай при ударе принята в форме треугольника, что не вполне соответствует фактическим данным;

– энергия удара молота принимается в виде произведения параметров  $G$  и  $H$  (где  $G, H$  – соответственно вес и высота падения ударной части молота), что приемлемо только для подвесных молотов.

**Цель.** Целью статьи является совершенствование метода определения сжимающих напряжений, возникающих в голове железобетонных свай при их забивке в грунты.

**Изложение основного материала исследования.** Учитывая вышеизложенные доводы для совершенствования формулы Чернышева Ю.Г., пересмотрим ее исходные положения, не меняя в ней основной принцип решения задачи. Этот принцип, сформулированный Чернышевым Ю.Г., выражается в таком виде: при забивке свай для сжатия и деформирования любого элемента, участвующего в соударении, затрачивается определенная доля энергии удара молота. В соответствии с данным принципом можно записать следующее уточненное уравнение взаимодействия соударяемых элементов при ударе дизель-молота

$$E_d(\alpha_{sh} + \alpha_{va} + \alpha_n + \alpha_{na} + \alpha_s + \alpha_g) = P(\Delta_{sh} + \Delta_{va} + \Delta_n + \Delta_{na} + \Delta_s + \Delta_g), \quad (1)$$

где  $E_d$  – полная энергия удара молота, кДж;  $\alpha_{sh}, \alpha_{va}, \alpha_n, \alpha_{na}, \alpha_s, \alpha_g$  – коэффициенты, определяющие долю энергии удара молота, которая расходуется соответственно на сжатие шабота, верхнего амортизатора, наголовника, нижнего амортизатора, свай и грунта;  $P$  – сила воздействия молота, кН;  $\Delta_{sh}, \Delta_{va}, \Delta_n, \Delta_{na}, \Delta_s, \Delta_g$  – деформации сжатия соответственно шабота, верхнего амортизатора, наголовника, нижнего амортизатора, свай и грунта.

Уравнение (1) в отличие от уравнения, принятого Чернышевым Ю.Г. [3], дополнительно учитывает деформируемость грунта, шабота, наголовника и верхнего амортизатора в наголовнике дизель-молота.

Уравнение (1) можно представить в виде выражения (2).

$$E_d = P_1(\Delta_{sh} + \Delta_{va} + \Delta_n + \Delta_{na} + \Delta_s) + RS_n, \quad (2)$$

$$P_1 = P - R, \quad (3)$$

$$(\alpha_{sh} + \alpha_{va} + \alpha_n + \alpha_{na} + \alpha_s + \alpha_g) = 1, \quad (4)$$

где  $R$  – сопротивление грунтов погружению сваи, кН;  $S_n$  – полный отказ сваи, м.

Для дальнейшего упрощения уравнения (2) запишем следующие выражения

$$\sum \alpha = (\alpha_{sh} + \alpha_{va} + \alpha_n + \alpha_{na} + \alpha_s), \quad (5)$$

$$RS_n = E_d(1 - \sum \alpha). \quad (6)$$

Тогда с учетом этих формул уравнению (2) можно придать следующий вид

$$E_d(1 - \alpha_g) = P_1(\Delta_{sh} + \Delta_{va} + \Delta_n + \Delta_{na} + \Delta_s). \quad (7)$$

Определяя из уравнения (7) силу  $P_1$  и представляя сжимающее напряжение в голове сваи в виде отношения  $P_1/A$  где  $A$  – площадь поперечного сечения сваи, автором получена следующая усовершенствованная формула по расчету динамических сжимающих напряжений в голове сваи

$$\sigma = \{[E_d(1 - \alpha_g)]/A[(l_{sh}/E_{sh}) + (l_{va}/E_{va}) + (l_n/E_n) + (l_{na}/E_{na} + M(L_s/E_{b,d}))]\}^{1/2}, \quad (8)$$

где  $l_{sh}$  – толщина шабота, м;  $E_{sh}$  – динамический модуль упругости материала шабота, кПа;  $l_{va}$  – толщина верхнего амортизатора, м;  $E_{va}$  – динамический модуль упругости материала верхнего амортизатора, кПа;  $l_n$  – общая толщина днища и диафрагмы наголовника, м;  $E_n$  – динамический модуль упругости материала наголовника, кПа;  $l_{na}$  – толщина нижнего амортизатора, м;  $E_{na}$  – динамический модуль упругости материала нижнего амортизатора, кПа;  $M$  – коэффициент, учитывающий характер изменения напряжений по длине сваи;  $L_s$  – длина сваи, м;  $E_{b,d}$  – динамический модуль упругости бетона сваи, кПа.

При использовании формулы (8) следует:

– динамический модуль упругости материала амортизатора в наголовнике молота, а также динамический модуль упругости бетона сваи принимать в соответствии с требованиями СН РК 5.01-12-2003 [7];

– полную энергию удара дизель-молота определять по формулам, представленным в работе [8].

Учитывая, что в большинстве случаев при забивке свай в наголовнике дизель-молота используются деревянные амортизаторы, для них рекомендуется динамический модуль упругости определять по формуле

$$E_{va}(E_{na}) = (\sigma + \sigma_o) / k_a, \quad (9)$$

где  $\sigma$  – то же, что в формуле (8);  $\sigma_o, k_a$  – коэффициенты, принимаемые в зависимости от вида материала амортизатора.

Зависимость (9) получена на основе обработки данных [9].

Рассмотрим пути определения коэффициентов  $M$  и  $\alpha_g$ , входящих в формулу (8).

В формуле Чернышева Ю.Г. коэффициент  $M = 0,5$  [3]. Аналогично было принято и в формуле Бахолдина Б.В. [2]. Это означает, что при ударе молота для сваи характерна треугольная эпюра распределения напряжений по длине.

В действительности характер изменения сжимающих напряжений по длине сваи при ударах молота более сложный. Об этом свидетельствуют результаты изучения напряженного состояния свай при забивке, представленные в работе [10]. Так, из этих данных следует, что при забивке для свай характерны в общем случае следующие три эпюры распределения сжимающих напряжений:

- эпюра 1 – в виде трапеции с вогнутостью в верхней части;
- эпюра 2 – в виде правильной трапеции;
- эпюра 3 – в виде трапеции с выпуклостью в верхней и средней частях сваи.

Для рассматриваемых эпюр напряжений на основе обработки результатов исследований, изложенных в работе [10], нами определены значения коэффициента  $M$  (таблица 1).

**Таблица 1 – Значения коэффициента  $M$**

Марка дизель-молота	Длина (глубина погружения) сваи, м	Среднее напряжение в свае, МПа	Расстояние $a_{sn}$ , м	Коэффициент $M$	Эпюра напряжений
С-996	10 (6)	9,47	2,60	0,260	эпюра 1
	6 (3)	6,72	2,28	0,380	
	8 (3)	9,09	2,90	0,363	
	12 (6)	9,96	3,90	0,325	
С-330	9 (2)	5,23	3,08	0,342	эпюра 2
С-996	10 (4)	14,59	5,15	0,515	
	12 (10)	14,54	6,39	0,533	
С-330	9 (8)	13,57	4,50	0,500	эпюра 3
С-996	6 (4)	15,22	3,48	0,580	
	8 (4)	15,89	4,95	0,619	
	8 (4)	14,29	5,14	0,643	

Из таблицы следует, что среднее значение рассматриваемого коэффициента для эпюр 1, 2 и 3 соответственно составляет 0,334; 0,516 и 0,614. Исходя из этого, значения коэффициента  $M$  в формуле (8) для эпюр 1, 2 и 3 рекомендуется принимать соответственно 1/3, 1/2 и 2/3.

Для установления значений коэффициента  $\alpha_g$  проведены эксперименты с применением свай с размерами поперечного сечения 30×30 см и длиной 6, 8 и 12 м. Опыты проводились на двух площадках с неоднородным напластованием грунтов. Сваи, снабженные тензостержнями в головной части, погружались в грунты двумя типами дизель-молотов с измерением через каждые 0,5 – 1,5 м динамических сжимающих напряжений в голове свай, отказов свай и высоты подъема ударной части молотов.

Значения коэффициента  $\alpha_g$  определялись из формулы (8) при экспериментальных значениях сжимающих напряжений в голове свай. Выявлено, что между данным коэффициентом и остаточным отказом свай  $S_a$  существует устойчивая зависимость, которая выражается в виде

$$\alpha_g = \alpha_{g,o} + k_\alpha S_a, \quad (10)$$

где  $\alpha_{g,o}$ ,  $k_\alpha$  – соответственно коэффициенты, равные 0,0475 и 4,7 м<sup>-1</sup>.

В силу экспериментальной обоснованности формула (10) предлагается автором для расчета коэффициента  $\alpha_g$ . Формула позволяет учитывать влияние сопротивления грунтов (через значения остаточного отказа свай) на величину динамических сжимающих напряжений в голове свай.

Принимая во внимание достоверность формулы (10), а также учитывая принятый способ определения коэффициента  $\alpha_g$ , можно утверждать, что точность определения сжимающих напряжений в голове свай по формуле (8) достаточна для инженерных расчетов.

Таким образом, расчет динамических сжимающих напряжений в голове свай при забивке предлагается производить по формуле (8). При этом параметры, входящие в нее, следует устанавливать в соответствии с рекомендациями, представленными в настоящей работе.

**Методы определения предельно допустимых динамических напряжений в сваях.** В научной литературе существует ряд формул по определению предельно допустимых динамических напряжений в сваях [6, 11, 12 – 14]. Все они предназначены только для расчета предельно допустимых сжимающих напряжений в сваях. Предложения же по расчету предельно допустимых растягивающих напряжений в сваях в настоящее время отсутствуют. Формулы, представленные в работах [12 – 14], позволяют получать заниженные значения предельно допустимых сжимающих напряжений, и поэтому их применение может приводить к недопогружению свай при забивке. Формула, входящая в технические указания [6], предназначена для свай с центральной стержневой арматурой без поперечного армирования ствола, а формула, представленная в работе [11], не учитывает динамическую сопротивляемость бетона свай.

Перечисленных недостатков лишена формула (11), рекомендуемая нами для определения предельно допустимых сжимающих напряжений в сваях. Формула, получена на основе результатов экспериментальных исследований [15, 16].

$$\sigma_d = kK_1K_2k_uR_b, \quad (11)$$

где  $k$  – коэффициент, равный 0,90 – 0,95;  $K_1$  – коэффициент, учитывающий снижение предельно допустимого динамического сжимающего напряжения  $\sigma_1$  с увеличением количества ударов молота;  $\sigma_1$  – предельно допустимое сжимающее напряжение в голове сваи при единичном ударе молота, МПа;  $K_2$  – коэффициент, учитывающий увеличение предельно допустимого сжимающего напряжения в голове сваи  $\sigma_1$  при неравноценных ударах молота и принимаемый 1,12;  $k_u$  – коэффициент динамического упрочнения материала свай, принимаемый 1,58 – 2,22 в зависимости от марки свай;  $R_b$  – сопротивление бетона сваи сжатию (призменная прочность) в момент забивки, МПа.

При использовании формулы (11) значения коэффициента  $K_1$  следует определять по формуле

$$K_1 = K_{\max} - \Delta K \ln(n), \quad (12)$$

где  $K_{\max}$  – коэффициент, равный 1,0;  $\Delta K$  – приращение коэффициента  $K_1$ , равное 0,043;  $n$  – количество ударов дизель-молота по свае.

Формула (12) получена на основе обработки значений коэффициента  $K_1$ , приведенных в ТУ-1-82 [6].

Формула (11) включена в СН РК 5.01-12-2003 [7] и позволяет определять предельно допустимые динамические сжимающие напряжения в сваях с учетом основных факторов, оказывающих влияние на динамическую сопротивляемость бетона свай при забивке.

Расчет предельно допустимых динамических растягивающих напряжений в сваях рекомендуется производить по формуле

$$\sigma_{dr} = k_{ur}R_{bt,ser}k_n\gamma_{b1}, \quad (13)$$

где  $k_{ur}$  – коэффициент динамического упрочнения бетона сваи при растяжении;  $R_{bt,ser}$  – расчетное сопротивление бетона сваи растяжению, соответствующее моменту забивки, МПа;  $k_n$  – коэффициент, равный 1,2 для предварительно напряженной сваи [17];  $\gamma_{b1}$  – коэффициент условий работы бетона сваи при многократно повторяющейся нагрузке, принимаемый в соответствии с требованиями СНиП 2.03.01-84 [17].

Формула (13) получена из известной зависимости между статической и динамической сопротивляемостью бетона при растяжении [18] с введением в нее коэффициентов  $k_n$  и  $\gamma_{b1}$ .

Для выполнения расчетов по формуле (13) необходимы значения коэффициента динамического упрочнения  $k_{ur}$ . Исследования, выполненные Удальцовым В.С. и Баженовым Ю.М. [18], свидетельствуют о том, что значения динамического упрочнения бетона при растяжении  $k_{ur}$  зависят от состава бетона и продолжительности приложения к нему динамической нагрузки.

**Вывод.** Таким образом, нами на основе зависимости между коэффициентом динамического упрочнения  $k_{ur}$  и продолжительностью приложения нагрузки  $t$ , экспериментально установленной Удальцовым В.С. [18], выполнены расчеты по определению значений данного коэффициента. Установлено, что значения коэффициента  $k_{ur}$  следует принимать: для трубчатого дизель-молота – 1,23; для штангового дизель-молота – 1,15.

#### Литература

1. Бекбасаров И.И. Определение сжимающих напряжений, возникающих в голове железобетонной сваи при забивке в грунты / И.И. Бекбасаров // Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. – Астана, 2004. – №3 (39). – С. 180 – 186.
2. Бахолдин Б.В. О величине напряжений в сваях при забивке / Б.В. Бахолдин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1967. – №2. – С. 7 – 9.
3. Чернышев Ю.Г. Напряжения в голове сваи при ударном погружении / Ю.Г. Чернышев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1971. – №1. – С. 17 – 18.
4. Школьников И.Е. Расчет динамических напряжений в свае при забивке: автореф. дис. на соискан. науч. степени канд. техн. наук: 05.23.02. – М.: ЦНИИС, 1977. – 19 с.
5. ТУ-1-77. Технические указания по применению забивных железобетонных свай сплошного квадратного сечения без поперечного армирования ствола с напрягаемой стержневой арматурой на стройках Главзападуралстроя. – Пермь: Типография №2, 1978. – 19 с.
6. ТУ-1-82. Технические указания по применению на стройках Главзападуралстроя забивных железобетонных свай сплошного квадратного сечения с центральной стержневой арматурой без поперечного армирования ствола из бетона на шлакощелочном вяжущем. – Пермь, 1983. – 21 с.
7. СН РК 5.01-12-2003. Инструкция по технологии бездефектной забивки железобетонных свай в грунты. – Астана: KAZGOR, 2003. – 13 с.
8. Бекбасаров И.И. Определение энергии удара дизель-молота при забивке свай в грунты / И.И. Бекбасаров // Наука и техника Казахстана. – 2004. – №1. – С. 139 – 145.
9. Руководство по производству и приемке работ при устройстве оснований и фундаментов. – М.: Стройиздат, 1977. – 241 с.
10. Бартоломей А.А. О динамических сжимающих напряжениях, возникающих в сваях при их забивке в грунты / А.А. Бартоломей, И.И. Бекбасаров // Межвуз. сб. науч. тр. «Основания и фундаменты в геологических условиях Урала». – Пермь, 1984. – С. 6 – 12.
11. Колесник Г.С. Учет возможности погружения свай при выборе их длины / Г.С. Колесник, И.Б. Рыжков // Сб. науч. тр. «Ускорение научно-технического прогресса в фундаментостроении». – М., 1987. – Т. 1 – С. 135 – 136.
12. Василевский Ю.И. Инженерные приложения теории динамического расчета железобетонных забивных свай / Ю.И. Василевский // Морские порты. – 1977. – Вып. 10. – С. 50 – 58.
13. Временные указания по учету динамических усилий в железобетонных сваях при забивке. – Одесса: ОИИМФ, 1967. – 17 с.
14. Дорофеева В.В. Причины разрушения железобетонных свай при забивке / В.В. Дорофеева // Сб. науч. тр. ЛИСИ «Механика грунтов, основания и фундаменты». – Л., 1973. – №78. – С. 25 – 28.
15. Бекбасаров И.И. О коэффициенте динамического упрочнения материала свай и предельно допустимых сжимающих напряжениях в них при забивке / И.И. Бекбасаров // Вестник ТарГУ им. М.Х. Дулати «Природопользование и проблемы антропосферы». – Тараз, 2002. – №3 (7). – С. 94 – 99.
16. Бекбасаров И.И. Определение предельно допустимых напряжений в железобетонных сваях при забивке в грунты / И.И. Бекбасаров // Материалы

*Международной науч.-практ. конф. «Инновационные технологии в совершенствовании подготовки инженерных и научных кадров». – Тараз, 2006. – С. 274 – 277.*

*17. СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции. – Москва: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 79 с.*

*18. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении / Ю.М. Баженов. – М.: Стройиздат, 1970. – 270 с.*

*Надіслано до редакції 14.09.2009*

*©И.И. Бекбасаров*