

8. Васильев, Б.Ф. *Натурные исследования температурно-влажностного режима жилых зданий.* – М.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1957. – 210 с.
9. Пилипенко, В.М. К вопросу создания и эксплуатации легких штукатурных систем / В.М. Пилипенко, В.Н. Черноиван, Н.В. Черноиван // *Архитектура и строительство* – 2012. – № 1(225) – С. 62–67.
10. Франчук, А.У. *Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А.У. Франчук.* – М.: Госстрой СССР, НИИСФ, 1969. – 144 с.

Материал поступил в редакцию 18.12.12

CHERNOIVAN V.N., NOVOSELTSEV V.G., CHERNOIVAN N.V. Effective bearing additional thermal protection «Thermal screen»

The construction for additional thermal protection of external walls of buildings – the warning system «Thermal screen» - is presented in the paper.

УДК 624.155

Чернюк В.П., Семенюк С.М.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ И УГЛА ЗАОСТРЕНИЯ НАКОНЕЧНИКА СВАИ ПРИ ПОГРУЖЕНИИ В ГРУНТ

Введение. Важное значение в системе капитального строительства придается свайному фундаментостроению. Немаловажную роль в этом играет энергоёмкость погружения свай и несущая способность свайных фундаментов. Одним из многих путей повышения эффективности и снижения энергоёмкости погружения свай является установление оптимальной формы и рационального угла заострения свай при их забивке в грунт.

Обзор экспериментальных и теоретических исследований зависимости усилия погружения сваи от формы заострения наконечника, профиля или вертикального элемента [1, 2] показывает, что задача сводится в основном к определению угла заострения симметричного клина, конуса, ножа или пирамиды, при котором сопротивление будет минимальным.

Определим оптимальную форму и угол заострения наконечника и режущих профилей из условия минимальной энергоёмкости погружения сваи в грунт, а также для образования опережающих трещин разрыва грунта (трещинообразования), при условии отсутствия уплотненных ядер грунта, впереди сваи.

При погружении вертикальной сваи в грунтовой массив процесс заглубления наконечника происходит неравномерно, со скоростями, меняющимися от нуля до максимального значения. При таком характере погружения энергия расходуется на преодоление лобового сопротивления грунта разрушению, касательных сил сцепления грунта с наконечником, сопротивления трению, являющегося результатом взаимодействия заостренной части наконечника сваи с грунтом (рис. 1, а). Установим, при какой форме и угле заострения общее сопротивление погружению будет минимальным, для чего выделим на глубине, большей критической, элементарный участок на заостренной части наконечника, посредством которой впереди расположенный грунт сминается, вытесняется и уплотняется в стенки прорези. В результате преодоления сопротивления грунта вытеснению, касательных сил сцепления грунта с наконечником и сопротивления трению на элементарный участок действует полное напряжение σ , которое отклонено от нормали к плоскости на угол γ , причем $\gamma = \mu + \beta$, где μ – угол трения наконечника сваи о грунт; β – угол отклонения напряжения σ от влияния касательных сил сцепления наконечника сваи с грунтом.

Полное напряжение σ может быть разложено на касательную $\tau + \sigma_n \operatorname{tg} \mu$ и нормальную σ_n составляющие или на составляющие σ_x и σ_y , параллельные координатным осям x и y (см. рис. 1, а).

Из условия статического равновесия ($\sum Sx = 0$) приложенных к выделенной части наконечника сваи сил будем иметь:

$$\begin{aligned} dP &= \sigma_n \sin \alpha dS + \sigma_n \operatorname{tg} \mu \cos \alpha dS + \tau \cos \alpha dS = \\ &= (\sigma_n \operatorname{tg} \alpha + \sigma_n \operatorname{tg} \mu + \tau) \cos \alpha dS = \\ &= [\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg}(\mu + \beta)] \sigma_n \cos \alpha dS = (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \gamma) \sigma_n \cos \alpha dS, \end{aligned} \quad (1)$$

где dP – элементарное приращение усилия погружения сваи, приходящееся на выделенный элементарный участок заостренной части наконечника;

σ_n – нормальное напряжение, действующее со стороны грунта на элемент заостренной части наконечника;

α – угол наклона элемента боковой поверхности заострения к оси симметрии пирамиды наконечника X ;

μ – угол трения наконечника о грунт;

dS – площадь элемента боковой поверхности, взятого на расстоянии X от вершины наконечника;

τ – касательное удельное сцепление грунта с наконечником сваи;

γ – угол отклонения полного напряжения σ от нормали;

β – угол влияния касательных сил сцепления грунта на полное напряжение σ .

Учитывая, что $\cos \alpha ds = dz dx$, а пределами интегрирования по X и Z соответственно являются $X_1 = 0$, $X_2 = X_0$ и $Z_1 = 0$, $Z_2 = ax/X_0$, будем иметь:

$$P = \int_0^{X_0} \int_0^{ax/X_0} (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \gamma) \sigma_n dz dx = \int_0^{X_0} \sigma_n (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \gamma) \alpha \frac{X}{X_0} dx, \quad (2)$$

где P – усилие погружения, приходящееся на одну грань наконечника сваи;

a – ширина поперечного сечения сваи;

X_0 – высота наконечника.

Анализ исследований показывает, что для случая предельного равновесия клиновидного штампа или наконечника зонда распределение напряжений по боковой поверхности заострения не зависит от ширины штампа или радиуса скважины (в нашем случае от размера b). Физические явления процесса нагружения свай на глубине, где не происходит скол грунта в сторону открытой поверхности, аналогичны явлениям, возникающим при взаимодействии с грунтом штампов глубокого заложения. Поэтому можно считать, что распределение напряжений по боковой поверхности заострения и боковой отпор также не зависят от ординаты y .

Чернюк Владимир Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительного производства Брестского государственного технического университета.

Семенюк Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительного производства Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Строительство и архитектура

Напряжения σ_x и σ_y , как известно, увеличиваются с увеличением угла заострения наконечника сваи, вертикального ножа или штампа. При этом вычисления, произведенные по формуле (3) и ей аналогичной, показывают, что напряжения σ_y , перпендикулярные стенкам прорези, практически остаются постоянными. Поэтому целесообразно выразить усилие P через напряжение σ_y , которое можно вынести за знак интеграла.

Связь между напряжениями, действующими со стороны грунта на выделенный элемент, вытекает из треугольников, в которых полное напряжение σ является общей стороной:

$$\sigma_n = \sigma_y \frac{\cos \gamma}{\cos(\alpha + \gamma)} \quad (3)$$

Подставляя σ_n из выражения (3) в полученное ранее выражение (2) и полагая $\sigma_n = const$, $a = const$, $x_0 = (b/2) ctg \alpha$, после несложных преобразований получим:

$$P = \frac{ab}{2} \sigma_y \cos \gamma \frac{1 + tg \gamma ctg \alpha}{\cos(\alpha + \gamma)} \quad (4)$$

Для определения оптимального угла заострения a исследуем функцию P из выражения (4) на экстремум, для чего определим первую производную dP/da и приравняем ее к нулю. В конечном виде полученное выражение будет выглядеть следующим образом:

$$\sin^2 \alpha \cdot tg(\alpha + \gamma)(1 + ctg \alpha \cdot tg \gamma) = tg \gamma \quad (5)$$

Уравнение (5) в общем виде относительно α решить нельзя. Поэтому значение $\alpha = f(tg \gamma)$ будем искать методом подбора. Учитывая, что в реальных условиях для немерзлых и мерзлых [3, 4, 6] грунтов $\tau/\sigma_n = 0,3 \dots 0,8$, а $tg \mu = 0,2 \dots 0,7$ величина значения $tg \gamma$ может изменяться в пределах от 0,5 до 1,3 (см. рис. 1, а). Результаты исследований сведем в табл. 1, на основании которой построим график (рис. 1, б).

Таблица 1. Зависимость угла заострения наконечника сваи 2α от $tg \gamma$

$tg \gamma$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
2α	51°20'	49°40'	47°40'	45°20'	43°20'	41°20'	39°20'	37°40'	36°40'

Как видно из табл. 1 и рис. 1, б оптимальными углами заострения наконечника сваи при минимальных усилиях и энергоёмкости погружения являются $2\alpha = 36 \dots 52^\circ$, что соответствует реальным значениям $tg \gamma = 0,5 \dots 1,3$. Полученные значения оптимальных углов заострения хорошо согласуются с экспериментальными данными А.Н. Зеленина [3, 4], который считал угол $2\alpha = 45^\circ$ оптимальным применительно для всех видов грунтов, и теоретическими исследованиями В.К. Тимошенко [2], который показал, что существует целый интервал значений $45^\circ \leq 2\alpha \leq 55^\circ$, в котором изменение угла заострения клина (наконечника) не оказывает существенного влияния на усилие резания грунта P .

Исследование уравнения (5) и графика на рис. 1, б доказывает, что выпукло-вогнутые формы заострения наконечников не способствуют существенному уменьшению сопротивления погружению сваи из-за практически прямолинейной зависимости $2\alpha = f(tg \gamma)$ и постоянной величины усилия погружения P_e установленном интервале изменения оптимальных углов заострения наконечников сваи 2α .

Исходя из технологических соображений (простоты изготовления и сложности опалубочных форм), следует считать целесообразной прямолинейную форму заострения профилей и граней $2\alpha = 36 \dots 52^\circ$. Для практического применения можно рекомендовать $2\alpha = 45^\circ$.

Не менее актуален вопрос определения условий погружения и конкретных углов заострения наконечника сваи 2α , приводящих к образованию опережающих трещин разрыва грунта (трещинообразованию) и, тем самым, обеспечивающих минимум энергоёмкости погружения сваи (при условии отсутствия уплотненных ядер грунта впереди сваи).

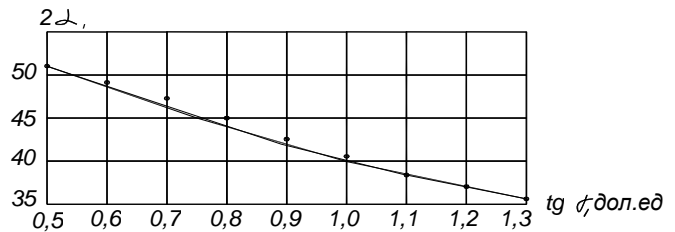
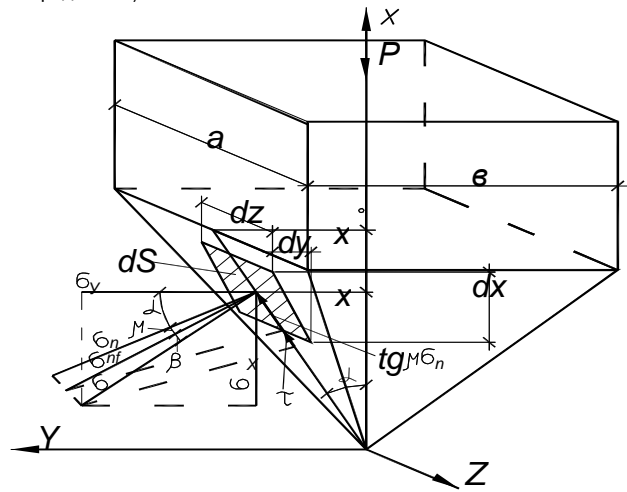


Рис. 1. Расчетная схема раскладки напряжений при минимальном сопротивлении грунта под сваями (а) и график зависимости оптимальных углов заострения сваи 2α в зависимости от $tg \gamma$ (б)

Анализ большого количества отечественных и зарубежных теоретических и экспериментальных исследований в области свайного фундаментостроения, механики грунтов, землеройно-транспортных машин, машиноведения и др. показывает, что при забивке сваи или их моделей в грунт наблюдаются следующие явления: непосредственно под острием сваи в грунте при $2\alpha > 50^\circ$ образуется ядро повышенного давления; слишком тупое острие восполняется ядром повышенного давления; вся масса грунта внутри уплотненного ядра имеет максимальную при данном давлении грунта плотность; формы изобар и линии, ограничивающие уплотненное ядро под острием сваи, близки к сфере; в некоторых случаях (при оптимальных углах заострения сваи, при определенном виде, влажности, плотности и т.д.) под наконечником сваи наблюдается образование опережающих трещин разрыва грунта, идущих перед острием или лезвием.

Попробуем определить условия и конкретные углы заострения наконечника, приводящие к образованию трещин в грунте под сваями. С целью упрощения рассуждений ограничимся цилиндрической формой боковой поверхности сваи и конической формой наконечника.

Распределение давлений в грунте при приложении точечной нагрузки (рис. 2, а), к которой может быть приравнена забивка сваи из-за значительно меньших размеров поперечного сечения по сравнению с длиной, определяется из выражения:

$$\sigma_{z,y} = \frac{3}{2\pi} \frac{P}{z^2} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{y}{z}\right)^2\right]^{\frac{5}{2}}} \quad (6)$$

где $\sigma_{z,y}$ – давление в грунте на расстоянии y, z от сваи;

y, z – текущие координаты точек изобар в плоскости погружения сваи;

P – величина приложенной нагрузки к наконечнику сваи.

Так как $\sigma_c = P / \pi r^2$, где σ_c – напряжение сжатия (смятия) грунта под торцом сваи при её погружении в грунт, r – наружный радиус сваи, распределение напряжений в грунте под острием наконечника сваи при $y=0$ будет определяться из упрощённого выражения:

$$\sigma_z = \frac{3}{2} \sigma_c \frac{r^2}{z^2} \quad (7)$$

или

$$z = r \sqrt{\frac{3\sigma_c}{2\sigma_z}} \quad (8)$$

Выясним, при каких условиях произойдёт образование лидирующей трещины разрыва в напряжённом грунте впереди сваи. Как наиболее благоприятный, будем считать случай при $2\alpha = 2\alpha_{OPT}$. Наиболее вероятно это произойдёт на границе напряжённого состояния грунта с давлением $\sigma_z = \sigma_p$ вдоль продольной оси сваи, где σ_p – предельные напряжения разрыва грунта. В этом случае лезвие или острие наконечника сваи при приложении нагрузки раскроет трещину. При этом в грунте должен возникнуть клиновидный эффект, образующий трещины, который и наблюдали некоторые исследователи, например, А.Н. Зеленин и др. [3, 4]. При $2\alpha > 2\alpha_{OPT}$ свая будет продавливаться в грунте без образования трещин, но с возникновением уплотнённых ядер, а при $2\alpha < 2\alpha_{OPT}$ – без образования трещин и уплотнённых ядер, но с наличием больших касательных сил сцепления грунта с гранями наконечника. Поэтому в двух последних случаях энергоёмкость погружения будет выше, чем при $2\alpha = 2\alpha_{OPT}$.

На рис. 2, б представлены три случая погружения сваи при различных углах заострения наконечника.

Исходя из этих предпосылок, значение оптимального угла заострения наконечника сваи может быть получено из выражения (8)

$$2\alpha_{opt} = 2 \arctg \frac{r}{z} = 2 \arctg \sqrt{\frac{2\sigma_p}{3\sigma_c}} \quad (9)$$

Учитывая большой разброс предельных значений напряжений сжатия и растяжения грунта σ_c и σ_p для различных грунтов, и даже в пределах одного вида грунта, проведён литературный анализ по различным источникам с целью выявления максимальных и минимальных значений (предельных) соотношения σ_c / σ_p , входящего в формулу (9), как для мёрзлых, так и для немерзлых грунтов.

Результаты этого анализа и подсчётов по формуле (9) углов заострения наконечников сваи приведены в таблице 2.

Таблица 2. Значения оптимальных углов заострения наконечников сваи $2\alpha_{OPT}$ для различных видов грунтов

№ п/п	Грунты	σ_c / σ_p	$2\alpha_{OPT}$, град
Мёрзлые			
1	Пески	3...7	50...36
2	Супеси	2,4...4	52...45
3	Суглинки	2,5...5	52...40
4	Глины	3...5,5	50...39
Немерзлые			
1	Пески	30...40	17...15
2	Супеси	10...30	30...17
3	Суглинки	4...10	45...30
4	Глины	2,5...7	52...36

Как видно из представленных в таблице значений, оптимальными являются углы заострения наконечников сваи для мёрзлых и связных немерзлых грунтов $2\alpha_{opt} = 36...52^\circ$, что достаточно точно совпадает с предыдущими теоретическими исследованиями при минимальном усилии погружения сваи.

Для сыпучих немерзлых грунтов (песков и супесей), в особенности рыхлых, обладающих мизерными значениями напряжений разрыва грунта, угол заострения наконечников сваи должен уменьшаться до минимальных значений, что подтверждается реальными практическими данными (табл. 2).

Преимуществом данного метода расчёта, наряду с простотой, является то, что оптимальный угол заострения наконечников сваи определяется расчётным путём из аналитического выражения в зависимости от предельных величин напряжений сжатия и разрыва, являющихся важными нормативными характеристиками всех видов грунтов.

Определённые теоретическим путём значения оптимальных углов заострения сваи $2\alpha_{OPT} = 36...52^\circ$ неплохо согласуются с опытными данными, проведёнными в различных грунтовых условиях – на обычных и мёрзлых грунтах, на песках и глинах (см. табл. 3).

Опыты выполнялись с помощью лабораторной копровой установки на моделях сваи площадью поперечного сечения 4 см² с различной формой заострения наконечников – пирамидальной, ножевой, клиновидной, конической с разными углами заострения наконечников $2\alpha = 20, 25, 30, 45, 90, 180^\circ$ (в отдельных опытах 60°). Погружение моделей в обычных и мёрзлых грунтах выполнялось грузами массой 1, 2, 3 кг. Проведение опытов осуществлялось в соответствии с требованиями действующих нормативных документов. Часть результатов этих опытов представлена на рис. 3 (на графиках изображены графики зависимости числа ударов C , приходящихся на 1 см погружения сваи в мёрзлые и на 5 см в обычные грунты).

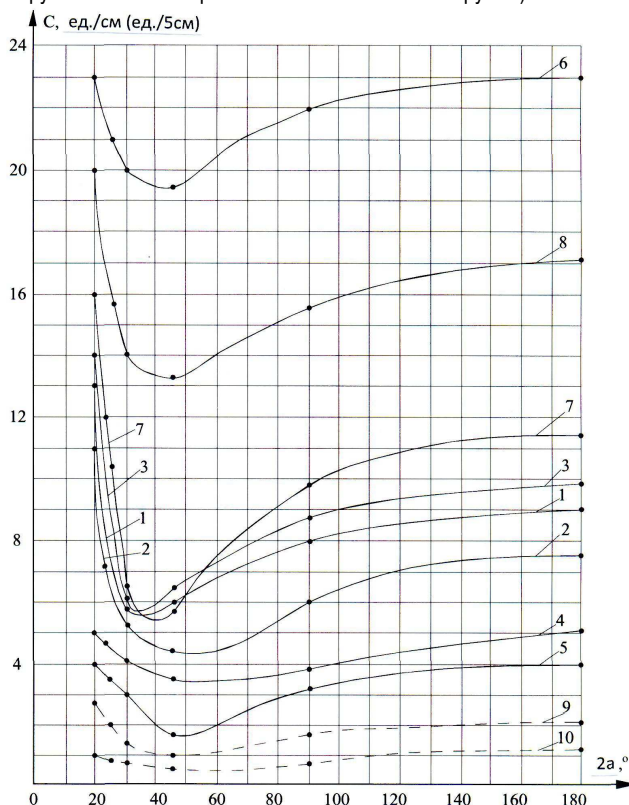


Рис. 3. Графики зависимости числа ударов (C) от угла заострения моделей сваи (2α):

ножевого (1, 2), клиновидного (3, 4, 9, 10), пирамидального (5, 6) и конического (7, 8) профилей в мёрзлые грунты массой 2 кг (1-8) и немерзлые – массой 1 кг (9, 10) с высоты падения 1 м в глинистые (1, 3, 5, 7, 9) и мелкозернистые песчаные (2, 4, 6, 8, 10) грунты

Таблица 3. Инженерно-геологические и мерзлотно-грунтовые условия, моделируемые при анализе $2\alpha_{\text{ОПТ}}$, а также результаты математической обработки экспериментальных данных

№ опыта	Вид грунта	$t, ^\circ\text{C}$	$W\%$	$\rho, \text{г/см}^3$	$2\alpha_{\text{ОПТ}}, ^\circ\text{C}$	Коэффициент корреляции $K_{\text{ТЭ}}$, дол. ед.
1	Глина	-11,0	12,0	2,0	$34^{\circ}20'$	0,64
2	Песок мелкозернистый	-7,5	10,7	1,88	$40^{\circ}30'$	0,95
3	Глина	-10	29,9	1,78	$39^{\circ}20'$	0,94
4	Песок мелкозернистый	-9,0	23,0	1,78	$51^{\circ}40'$	0,99
5	Глина	-3,0	36,4	1,81	$38^{\circ}00'$	0,96
6	Песок мелкозернистый	-8,0	11,7	1,82	$48^{\circ}10'$	0,68
7	Глина	-15,0	23,8	1,84	$37^{\circ}40'$	0,99
8	Песок мелкозернистый	-18,0	8,7	1,88	$43^{\circ}10'$	0,99
9	Глина	20,0	29,9	1,78	$46^{\circ}10'$	0,85
10	Песок мелкозернистый	20,0	23,0	1,78	$55^{\circ}00'$	0,91

Нетрудно видеть, что даже без специальной математической обработки результатов экспериментов, для каждого опыта и вида грунта существует оптимальный угол заострения наконечника, определяющий минимальные энергоресурсы на погружение, который колеблется в пределах от $35...36^{\circ}$ до $50...52^{\circ}$. Математическая обработка результатов (см. табл. 3) показала, что при коэффициенте корреляции 0,64...0,99 оптимальные углы заострения свай составляют диапазон $2\alpha_{\text{опт}} = 36...52^{\circ}$. Неоптимальные углы заострения свай и режущих профилей увеличивают энергоёмкость их погружения или резания грунта на 10...50%, а слишком острые или тупые – в 1,5...2,5 раза.

Заключение. Представленные теоретические и экспериментальные исследования и данные позволяют судить о необходимости соблюдения и выполнения углов заострения наконечников и режущих профилей свай в пределах $36...52^{\circ}$ (в среднем 45°) для минимизации энергетических затрат при их погружении в грунт.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Спиридонов, В.В. Определение оптимальной формы заострения наконечника сваи при погружении в грунт / В.В. Спиридонов, В.П. Чернюк, В.Н. Пчелин // Научно-технический реферативный сборник. Проектирование и строительство трубопроводов и газонефтепромысловых сооружений. – М.: Информнефтегазострой, 1982. – Вып. 9. – С. 28–32.
2. Тимошенко, В.К. Определение формы заострения вертикального ножа при минимальном усилии резания грунта // Строительные и дорожные машины. – М. – №1. – 1971. – С. 16–17.
3. Зеленин, А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. – М.: Машиностроение, 1968. – 376 с.
4. Зеленин, А.Н. Машины для земляных работ / А.Н. Зеленин, В.Н. Баловнев, И.П. Керов // Основы разрушения грунтов, моделирование процессов, прогнозирование параметров. – М.: Машиностроение, 1975. – 424 с.
5. Чернюк, В.П. Расчёт, проектирование и устройство свайных фундаментов / В.П. Чернюк, П.С. Пойта. – Брест: Облтипография, 1998. – 215 с.
6. Цытович, Н.А. Механика грунтов: учебн. пособие. – М.: Высшая школа. – 280 с.

Материал поступил в редакцию 14.11.12

CHERNIUK V.P., SIEMIENIUK S.M. Determination of an optimum form and angle of sharpening of a tip of pile in dipping in the soil

Theoretical calculation of an angle of pile's sharpening under two conditions: minimum of power-consuming in dipping in the soil and possibility of forming leading cracks of breaking before pile in the process of dipping is presented in this article. Optimum angles are the angles of sharpening of tips of piles and cutting profiles $36...52^{\circ}$ (in average 45°), they are proved by experimental data and theoretical researches made by other authors.

УДК 624.15+624.131.6:561.5

Шведовский П.В., Пойта П.С., Клебанюк Д.Н.

ВЛИЯНИЕ И УЧЕТ НЕОДНОРОДНОСТИ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ ТЯЖЕЛЫМИ ТРАМБОВКАМИ НА УРОВЕНЬ НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМЫ «ОСНОВАНИЕ-СООРУЖЕНИЕ»

Введение. Общепринято меру надёжности системы «основание-сооружение» (H) определять как вероятность (P_H) ненаступления ни одного из возможных предельных состояний в заданных условиях эксплуатации в течение заданного срока, т.е. $H=P_H$ [1].

Исходя из этого, все соотношения расчета надёжности системы «основание-сооружение» можно свести к двум неравенствам:

$$\left. \begin{aligned} Y &\geq Y_2; \\ Y &= Y_1 - Y_2 \geq 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где Y_1 и Y_2 – соответственно факторы системы – внутренний, определяющий несущую способность (предельно допустимую деформацию), и внешний – характеризующий действующие нагрузки при их наиболее невыгодном сочетании; Y – совокупный фактор

Шведовский Петр Владимирович, кандидат технических наук, зав. кафедрой геотехники и транспортных коммуникаций Брестского государственного технического университета.

Клебанюк Дмитрий Николаевич, ассистент кафедры геотехники и транспортных коммуникаций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.