

#### Список цитированных источников

1. СНБ 5.01.01-99. Основания и фундаменты зданий и сооружений. – Минстройархитектуры РБ. – Минск, 1999. – 36 с.
2. Пособие П 4-2000 к СНБ 5.01.01-99. Проектирование забивных свай. — Минск: Минстройархитектуры РБ, 2001. – 68 с.
3. Пособие П 13-01 к СНБ 5.01.01-99. Проектирование и устройство буронабивных свай. – Минск: Минстройархитектуры РБ, 2002. – 43 с.
4. Пособие П 18-04 к СНБ 5.01.01-99. Проектирование и устройство буронаблюдательных анкеров и свай. – Минск: Минстройархитектуры РБ, 2005. – 79 с.
5. Пособие П 19-04 к СНБ 5.01.01-99. Проектирование и устройство фундаментов из свай с уплотненным основанием. – Минск: Минстройархитектуры РБ, 2006. – 88 с.
6. ГОСТ 5686-94. Грунты. Методы полевых испытаний сваями. МНТКС. – Минск, 1995. – 36 с.
7. Никитенко, М.И. Некоторые проблемы свайных фундаментов в геотехнической практике Беларуси / М.И. Никитенко, В.Ю. Журавский // Строительная наука и техника. – Минск, 2008. – № 4 (19). – С. 44–51.
8. Никитенко, М.И. Буронаблюдательные анкеры и сваи при возведении и реконструкции зданий и сооружений / М.И. Никитенко. – Минск: БНТУ, 2007. – 580 с.

УДК 624.131

## ТЕОРИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ГУКОВСКИХ МОДУЛЕЙ ДЕФОРМАЦИИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ ПО ДАННЫМ КОМПРЕССИОННЫХ И ШТАМПОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ГРУНТОВ

Костюкович П.Н., Крошнер И.П.

**Введение.** Модули общей деформации грунтов широко используются в геотехнических прогнозах осадок геосознаний и потому относятся к важнейшим физико-механическим характеристикам геологических сред. Их экспериментальное определение осуществляется двумя основными методами: путем компрессионного сжатия образцов в одометрах и штамповыми испытаниями грунтовых массивов в скважинах, шурфах, дудках и других горных выработках [1–4]. Теоретической базой обоих методов являются линейные законы Гука – первый или прямо пропорциональный  $h_1$  и второй или обобщенный (кусочно-линейный)  $h_2$  [5, 6]. Поскольку опытные деформативные функции при компрессионных  $\varepsilon(\sigma)$  и штамповых  $s(\sigma)$  испытаниях часто являются нелинейными и всегда аппроксимируются моделью  $h_2$  без оценки ее начальных отрезков  $\varepsilon^*$  и  $\sigma_{0y}$ , то данный фактор требует отдельного исследования функций  $\varepsilon(\sigma)$  и  $s(\sigma)$  и вытекающей из них динамики поведения "гукоских" модулей деформации. Это тем более необходимо, что до сих пор не установлены как главные факторы, формирующие практически несовместимые ареолы существования компрессионных и штамповых параметров, так и закономерности, отображающие характер взаимоотношений между ними.

**Методика исследований.** Рассматриваемая проблема вызывает большой интерес, и во многих работах справедливо отмечается, что расчетные модули деформации, определяемые по данным компрессионных опытов, являются *заниженными* по сравнению с их аналогами в штамповых испытаниях. При этом делается вывод, что "испытания грунтов штампами дают наиболее достоверные значения модуля общей деформации" [3]. В новейшей публикации по этой проблеме отмечается, что, к примеру, в ледниковых глинистых отложениях естест-

венной структуры и влажности значения *переходного коэффициента*  $m = E_{600}/E_{0K}$  между штамповыми  $E_{600}$  и компрессионными  $E_{0K}$  модулями деформации изменяются от 5,2 до 0,5 [7]. Здесь же указывается, что "сопоставление результатов компрессионных и штамповых испытаний предусмотрено нормативными документами, и переходные коэффициенты от компрессионного модуля деформации к штамповому модулю широко используются на практике".

Данная ситуация порождает множество вопросов теоретического и прикладного характера, касающихся причин и диапазонов расхождений между компрессионными ( $E_K, E_{0K}, E_K(\sigma)$ ) и штамповыми ( $E_S, E_{0S}, E_S(\sigma)$ ) модулями деформации, особенностей изменения ( $E_K, E_K(\sigma), E_{0K}$ ) и ( $E_S, E_S(\sigma), E_{0S}$ ) в разных деформативных моделях, методики учета отмеченного расхождения в геотехническом проектировании, решения "эталонной" проблемы деформирования грунтов – теоретического обоснования модулей деформации, которые могут быть приняты за истинные для тех или иных ИГЭ при инженерно-геологических изысканиях, и др. Исследуем некоторые из поставленных задач. При этом под неустойчивостью *гуковских механических параметров грунтов* будем понимать закономерное изменение их расчетных величин  $E_x$  и  $E_S$ , определяемых по методологии первого закона Гука  $h_1$ , при изменении нагрузки на грунт  $\sigma$ . Причиной, порождающей данную неустойчивость, является разнотипность или нестыковка опытных деформативных моделей  $\epsilon(\sigma)$  и  $s(\sigma)$  с расчетными, по которым производится определение механических параметров [5, 6].

Для сопоставления деформативных характеристик грунта, получаемых в отдельности по компрессионным и штамповым испытаниям, наряду с понятием "абсолютная деформация", или вертикальная осадка грунта  $S$ , рассмотрим две относительные, порождаемые различными условиями уплотнения грунта при его компрессионном и штамповом сжатии и потому принципиально отличающиеся между собой. Первая из них используется в компрессионных опытах и называется *относительной деформацией* слоя или образца грунта мощностью  $h_0 = const$  и площадью поперечного сечения  $A = const$  [1, 4, 8]:

$$\epsilon(S) = S/h_0 = V_S/V_0 = \lambda_1 S, \quad (1)$$

$$\text{где } \lambda_1 = \epsilon_1/S_1 = \epsilon_2/S_2 = \dots = \epsilon/S = V_S/SV_0 = 1/h_0 = const - \quad (2)$$

угловой коэффициент прямой  $\epsilon(S)$ , исходящей из начала координат;  $V_S = SA$  – объем уплотнения грунта;  $V_0 = h_0 A$  – первоначальный (до сжатия) объем образца высотой  $h_0 = h_n + h_1$ ;  $h_n = V_n/A = (V_0 + V_1)/A$  – высота "порового столбика" в образце;  $h_1 = V_1/A$  – то же, столбика из твердых частиц;  $V_1 = V_0 - V_n$  – объем этих частиц;  $V_n$  – объем пор [8].

В качестве второй характеристики относительной деформации, необходимой для более достоверной оценки степени уплотненности грунта при его сжатии штампом в полубесконечном грунтовом массиве, может служить отношение

$$\eta(S) = S/h_n = V_S/V_n = \lambda_2 S, \quad (3)$$

$$\text{где } \lambda_2 = \eta_1/S_1 = \eta_2/S_2 = \dots = \eta/S = V_S/SV_n = 1/h_n = const - \quad (4)$$

угловой коэффициент прямой  $\eta(S)$ .

Будем исходить из теории К. Терцаги, согласно которой уплотнение грунтов происходит за счет уменьшения объема пор [8]. В этом случае относительные деформации  $\epsilon(S)$  и  $\eta(S)$  обладают пределами:

$$\varepsilon_{\max} = \lim_{s \rightarrow h_n} \varepsilon(S_{\max}) = h_n/h_0 = V_n/V_0 = n_0 = \varepsilon_0 ; \quad (5)$$

$$\eta_{\max} = \lim_{s \rightarrow h_n} \eta(S_{\max}) = S_{\max} / h_n = h_n/h_n = V_n/V_n = 1 , \quad (6)$$

где  $n_0 = V_n/V_0$  – начальная пористость грунта.

Разделив равенство (1) на (3), получим

$$\varepsilon / \eta = \lambda_1 / \lambda_2 = h_n / h_0 = V_n / V_0 = n_0 , \quad (7)$$

откуда имеем функциональную связь между относительными деформациями  $\varepsilon$  и  $\eta$ :

$$s(\eta) = (h_n/n_0 h_0) s(\varepsilon) . \quad (8)$$

Используя приведенные зависимости, отметим наиболее существенные различия в условиях сжатия грунта при компрессионных и штамповых испытаниях. Эти отличия формируют альтернативные закономерности уплотнения грунтов  $\varepsilon(\sigma)$  и грунтовых толщ  $s(\sigma)$  соответственно в компрессионных и штамповых условиях и потому играют важную роль в раскрытии данных закономерностей.

Компрессионное сжатие грунта происходит при соблюдении следующих основных условий: 1) постоянстве площади поперечного сечения сжимаемого образца:  $A = const \neq f(\sigma)$ ; 2) неподвижности "подошвы" (нижней границы) сжимаемого слоя начальной высоты  $h_0$ ; 3) отсутствии бокового и глубинного расширения сжимаемого объема грунта и соответственно рассеивания сжимающего давления в этих направлениях; 4) постоянстве сжимающего давления  $\sigma = const \neq f(h)$  и степени уплотненности грунта  $\eta = const \neq f(h)$  по всей его глубине  $h$ ; 5) перечисленные факторы приводят к тому, что с ростом уплотняющего давления  $\sigma$  сопротивление грунта компрессионному сжатию принимает две основные формы [8]: может быть *постоянным*, и тогда формируются *гуковские деформативные прямые*  $h_1$  или  $h_2$ , но в большинстве случаев (60...90% из 500 обследованных нами опытов [9]) *возрастает*, а темп сжатия грунта  $\Delta\varepsilon = f(\Delta\sigma)$ , численно равный угловым коэффициентам касательных к графику  $\varepsilon(\sigma)$ , уменьшается, благодаря чему формируются *выпуклые* (по отношению к *гуковской прямой*  $h_1$ ) *деформативные кривые*  $\varepsilon(\sigma)$ , и *модуль общей деформации по Гуку*  $E_x = \beta_0 \sigma / \varepsilon(\sigma)$  *закономерно возрастает с ростом*  $\sigma$ .

Осадка штампов происходит в полубесконечном грунтовом массиве и по многим показателям существенно отличается от условий компрессионного сжатия образца грунта в неизменном микрообъеме. Из этих показателей важнейшими являются: 1) наличие глубинного и бокового расширения эпюры избыточных давлений  $\sigma$ , создаваемых штампом, и соответственно увеличение объема уплотняемого грунта в этих направлениях; 2) уменьшение в стороны и с глубиной (рассеивание) сжимающего давления и соответственно степени уплотненности грунта  $\eta(\sigma, h)$ ; 3) боковое и глубинное расширение сжимаемой зоны грунтового массива, а также рассеивание по этим направлениям избыточного давления  $\sigma$  и создаваемых ими деформаций  $\eta(\sigma, h)$  приводят к тому, что с ростом  $\sigma$  сопротивление грунтового массива напряжениям и сжатию *ослабевает*, и темп осадки штампа  $\Delta S(\sigma, h) / \Delta\sigma$  *начинает возрастать*; под действием этих процессов деформативные кривые  $S(\sigma)$  *становятся вогнутыми* (относительно *гуковской прямой*  $h_1$ ), а *рассчитываемый по ним модуль общей деформации по Гуку*  $E_S = f(K, D)\sigma / S(\sigma)$  *закономерно уменьшается с ростом*  $\sigma$ .

Данные закономерности представим аналитически. В процессе анализа косвенные компрессионные функции сжимаемости грунтов  $\rho_d(\epsilon)$ ,  $n(\epsilon)$ ,  $e(\epsilon)$  использовать не будем с целью исключения дополнительно возникающих при этом погрешностей в оценке деформативных характеристик грунтов, особенно биогенных и глинистых [8, 9].

При постоянном темпе компрессионного сжатия и отсутствии "разгонного или ускоряющегося" участка на графике  $\epsilon(\sigma)$  в области малых давлений процесс деформации образца подчиняется *первому или прямо пропорциональному закону Гука*  $h_1$  - прямой

$$\epsilon(\sigma) = a_k \sigma = (\beta_0 / E_k) \sigma = \sigma / tg\alpha_1, \quad (9)$$

исходящей из начала координат ( $\epsilon = \sigma = 0$ ) и обладающей угловым коэффициентом

$$tg\alpha_1 = \sigma_1 / \epsilon_1 = \sigma_2 / \epsilon_2 = \dots = \sigma / \epsilon(\sigma) = 1 / a_k = E_k / \beta_0 = const, \quad (10)$$

где  $a_k = \epsilon(\sigma) / \sigma = \beta_0 / E_k = 1 / tg\alpha_1 = const - \quad (11)$

коэффициент относительной сжимаемости грунта в деформативной модели  $h_1$ ;  $\beta_0$  - функция влияния бокового расширения грунта на величину его "гуковского" модуля деформации

$$E_k = \beta_0 [\sigma / \epsilon(\sigma)] = \beta_0 / a_k = \beta_0 tg\alpha_1 = const. \quad (12)$$

Во многих опытах деформативные функции  $\epsilon(\sigma)$  сначала являются нелинейными, а затем, по мере роста  $\sigma$  становятся линейными и подчиняются *второму или обобщенному закону Гука*  $h_2$  - прямой [8, 9]

$$\epsilon(\sigma) = \epsilon^* + a_{0k} \sigma = \epsilon^* + (\beta_0 / E_{0k}) \sigma = \epsilon^* + (1 / tg\alpha_{2k}) \sigma \quad (13)$$

с начальным отрезком  $\epsilon^*$  и угловым коэффициентом

$$tg\alpha_{2k} = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\epsilon_2 - \epsilon_1) = \sigma / (\epsilon - \epsilon^*) = E_{0k} / \beta_0 = 1 / a_{0k} = const, \quad (14)$$

где  $a_{0k} = (\epsilon - \epsilon^*) / \sigma = \beta_0 / E_{0k} = 1 / tg\alpha_{2k} = const - \quad (15)$

коэффициент относительной сжимаемости грунта в деформативной модели  $h_2$ ;

$$E_{0k} = \beta_0 \sigma / (\epsilon - \epsilon^*) = \beta_0 / a_{0k} = \beta_0 / tg\alpha_{2k} = const - \quad (16)$$

модуль общей деформации грунта в этой же модели  $h_2$ .

Второй закон Гука  $h_2$  впервые введен в работах [5, 6]. Поэтому в нормативной и учебной литературе [1-4, ГОСТ 20276-85 и др.] определение начального отрезка  $\epsilon^*$  не предусматривается, и оценка модуля деформации модели  $h_2$  сводится к его расчету по первому закону Гука  $h_1$ . В этом случае происходит накладка совершенно различных линейных моделей и константа  $E_k$  модели  $h_1$  преобразуется в функцию  $E_k(\sigma)$  модели  $h_2$ . Чтобы установить ее, равенство (13) делим на  $\sigma$  и находим, что в модели  $h_2$

$$\epsilon / \sigma = \beta_0 / E_{0k} + \epsilon^* / \sigma. \quad (17)$$

В то же время из (9) имеем

$$\epsilon / \sigma = \beta_0 / E_k. \quad (18)$$

Сопоставляя (17) и (18), окончательно получаем, что при определении "гуковского" модуля деформации  $E_k = \beta_0 \sigma / \epsilon$  в грунтах, подчиняющихся модели  $h_2$ , величина этого модуля становится нелинейно-возрастающей функцией  $\sigma$

$$E_K(\sigma) = \beta_0 \sigma / \varepsilon = \beta_0 / (\beta_0 / E_{0K} + \varepsilon^* / \sigma), \quad (19)$$

которая обладает пределом

$$\lim_{\sigma \rightarrow \infty} E_K(\sigma) = \lim_{\sigma \rightarrow \infty} \beta_0 \sigma / (\beta_0 / E_{0K} + \varepsilon^* / \sigma) = E_{0K}, \quad (20)$$

равным модулю деформации в модели  $h_2$ .

Результаты компрессионных испытаний грунтов Беларуси показывают [9], что линейные гукоские модели  $h_1$  и  $h_2$  встречаются в 10...40% обследованных опытов. Большой частью компрессионное сжатие грунтов с высокой степенью точности характеризуется такими функциями  $\varepsilon(\sigma)$ , что рассчитанный по ним модуль деформации по Гуку  $E_K$  линейно возрастает с ростом  $\sigma$ :

$$E_K(\sigma) = \beta_0 \sigma / \varepsilon(\sigma) = E_x^* + a_x^* \sigma, \quad (21)$$

где  $E_x^*$  – начальный отрезок прямой  $E_K(\sigma)$  на оси  $E_K(\sigma)$ ;  $a_x^*$  – угловой коэффициент этой прямой.

Из (21) имеем, что компрессионное сжатие таких грунтов подчиняется нелинейно-затухающей модели ("nz")

$$\varepsilon(\sigma) = \beta_0 \sigma / (E_x^* + a_x^* \sigma), \quad (22)$$

асимптота которой

$$\varepsilon_{\max} = \lim_{\sigma \rightarrow \infty} \varepsilon(\sigma) = \lim_{\sigma \rightarrow \infty} \beta_0 \sigma / (E_x^* + a_x^* \sigma) = \beta_0 / a_x^* \quad (23)$$

принципиально отличается от своего теоретического аналога  $\varepsilon_{\max} = n_0$  в линейной фазовой модели [8,9].

Применительно к штамповым испытаниям грунтовых толщ в полевых условиях первый закон Гука  $h_1$  имеет вид:

$$S(\sigma) = a_S \sigma = (1 / \operatorname{tg} \alpha_{1S}) \sigma = [f(K, D) / E_S] \sigma, \quad (24)$$

откуда следует известная формула по расчету "штампового" модуля деформации  $E_S$  в деформативной модели  $h_1$ :

$$E_S = f(K, D) [S(\sigma) / \sigma] = f(K, D) / a_S = f(K, D) \operatorname{tg} \alpha_{1S} = \text{const}, \quad (25)$$

где

$$a_S = S(\sigma) / \sigma = 1 / \operatorname{tg} \alpha_{1S} = f(K, D) / E_S = \text{const} - \quad (26)$$

"штамповый" коэффициент относительной сжимаемости грунтовой толщи в гукоской модели  $h_1$ ;

$$\operatorname{tg} \alpha_{1S} = \sigma / S(\sigma) = 1 / a_S = E_S / f(K, D) = \text{const} - \quad (27)$$

угловой коэффициент прямой  $S(S)$ , исходящей из начала координат;  $f(K, D)$  – функция бокового расширения грунта, формы и размеров штампа, не учитывающая пока естественной влажности  $W$  – важнейшего фактора, существенно влияющего на модули деформации – главных показателей сопротивления грунтов (особенно глинистых и биогенных [5, 8]) сжатию и вдавливанию штампов, зондов и других твердых тел.

**Заключение.** Выполненные исследования приводят к следующим выводам, имеющим важное теоретическое и методологическое значение:

– Установлено принципиальное графоаналитическое различие между деформативными кривыми  $\varepsilon(\sigma)$  и  $S(\sigma)$ , имеющими широкое распространение соответственно при компрессионных и штамповых испытаниях. Это различие является главной причиной расхождений в поведении "компрессионных" и "штамповых" характеристик грунтов при изменении избыточного давления  $\sigma$  и сводится к правилу: относительно первого (прямо пропорционального) закона Гука  $h_1$  компрессионные кривые  $\varepsilon(\sigma)$  являются *выпуклыми и нелинейно-затухающими*,

у которых к конечному пределу стремится деформация  $\lim_{\sigma \rightarrow \infty} \varepsilon(\sigma) = n_0$ , а штамповые кривые осадок  $S(\sigma)$ , наоборот, являются *вогнутыми и нелинейно-возрастающими*, у которых к конечному пределу стремится избыточное давление  $\lim_{S \rightarrow \infty} \sigma(S) = \sigma_{\max}$ , а величины осадок  $S$  могут неограниченно возрастать.

– Доказано, что "гостовские" величины компрессионного  $E_{0K}$  и штампового  $E_{0S}$  модулей деформации составляют некоторую долю угловых коэффициентов второго (обобщенного или кусочно-линейного) закона Гука  $h_2$  – прямой в отрезках  $(\varepsilon^*$  и  $\sigma_{0S})$ , проходящей через крайние опытные точки на компрессионной  $\varepsilon(\sigma)$  и штамповой  $S(\sigma)$  деформативных кривых; при этом аппроксимационные отрезки  $\varepsilon^*$  и  $\sigma_{0S}$ , отсекаемые прямыми соответственно  $AB$  на  $\varepsilon(\sigma)$  и  $CD$  на  $S(\sigma)$ , не определяются. Данный факт говорит о том, что с теоретической и методологической точек зрения в нормативных документах допускается существенная некорректность: для явно нелинейных моделей деформации рассчитываются по угловому коэффициенту второго закона Гука  $h_2$ , обладающего начальными отрезками, а рекомендуются использовать для геотехнических прогнозов осадок линейно-деформируемой среды – по первому закону Гука  $h_1$ , в котором начальные отрезки отсутствуют. Известно [10], что в этих случаях погрешность может быть самой различной и часто непредсказуемой. Это во-первых. А, во-вторых, определение деформативных характеристик грунтов (обратная задача) и геотехнические прогнозы осадок геосостояний (прямая задача) должны вестись в рамках одного закона (*принцип единства обратных и прямых задач геомеханики*).

– Сопоставление механических характеристик грунтов, определяемых по данным компрессионных и штамповых испытаний, выполнено на примере гуковских модулей деформации  $E_K$  и  $E_S$ , вытекающих из первого закона Гука  $h_1$ . Анализ функций неустойчивости  $E_K(\sigma)$  и  $E_S(\sigma)$  произведен для двух типов деформативных моделей – кусочно-линейных  $h_2$  и нелинейных "nz" и "nv". В результате установлено, что из-за различного характера компрессионных  $\varepsilon(\sigma)$  и штамповых  $S(\sigma)$  законов деформации в *кусочно-линейных  $h_2$  и нелинейных моделях деформации с ростом  $\sigma$  величины гуковского модуля деформации  $E_K$  закономерно возрастают, а штампового  $E_S$  – уменьшаются*; поэтому максимальное расхождение между ними имеет место при незначительных и средних давлениях (в интервале  $0 < \sigma \leq 0,2 - 0,3$  МПа), а минимальное – при значительных. Эту закономерность следует признать одним из главных положений теории неустойчивости гуковских модулей деформации  $E_K(\sigma)$  и  $E_S(\sigma)$  в кусочно-линейных и нелинейных моделях деформирования грунтов.

– Осреднению и последующему приведению к аппроксимационным константам тех ли иных компрессионных и штамповых моделей деформирования подлежат только модули  $E_K$ ,  $E_{0K}$ ,  $E_S$ ,  $E_{0S}$ ; неустойчивые функции  $E_K(\sigma)$  и  $E_S(\sigma)$  несовместимы и могут осредняться по отдельности с целью последующего приближения их к соответствующим корреляционным зависимостям в рамках тех деформативных моделей, по которым они изначально определялись; осреднять в совокупности компрессионные ( $E_K$ ,  $E_{0K}$ ,  $E_K(\sigma)$ ) и штамповые ( $E_S$ ,  $E_{0S}$ ,  $E_S(\sigma)$ ) модули деформации как однородные равноценные величины единого ареала и общие модули ИГЭ в принципе не корректно ввиду принадлежности этих характеристик к совершенно различным, практически альтернативным физико-

механическим процессам деформирования образцов грунта в замкнутом объеме и грунтовых толщ бесконечной глубины.

– Основной причиной, порождающей неустойчивость грунтовых модулей деформации и переходного коэффициента  $m(\sigma) = E_S(\sigma)/E_K(\sigma)$ , является несоответствие напряженного состояния и деформативных моделей грунтов в разных опытах – компрессионных, штамповых и т.д. Поэтому модули деформации будут объективными и корректно сопоставимы только при условии, когда напряженное состояние грунта и характер его деформации в опытах и производственных условиях будут адекватными или близкими к ним. Очевидно, во всех случаях влажность грунтов должна учитываться в качестве важнейшего фактора, оказывающего существенное влияние на аналитический вид деформативной модели и соответственно величины модулей деформации ИГЭ [11].

#### Список цитированных источников

1. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости: ГОСТ 12248-96. – 64 с.
2. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости: ГОСТ 20276-99. – 54 с.
3. Кириллов, В.С. Основания и фундаменты. – М.: Транспорт, 1980. – 392 с.
4. Бартоломей, А.А. Механика грунтов. – М.: АСВ, 2004. – 304 с.
5. Костюкович, П.Н. Теория взаимосвязей между деформацией уплотнения  $\varepsilon(\sigma)$  и сдвиговой прочностью  $\tau(\sigma)$  дисперсных грунтов // Геотехника Беларуси: наука и практика: сборник статей Межд. научно-технич. конф. – Минск: БНТУ, 2008. – С. 142–162.
6. Костюкович, П.Н. Теория функциональных связей между деформативными и прочностными характеристиками дисперсных грунтов // Многообразие современных геологических процессов и их инженерно-геологическая оценка: труды Межд. научн. конф. – М.: МГУ, 2009. – С. 44–46.
7. Архангельский, И.В. Пути повышения качества исследований деформационных свойств грунтов // Инженерная геология. – 2008. – № 2. – 58–64.
8. Костюкович, П.Н. Деформативные и компрессионные функции сжимаемости грунтов // Геотехника Беларуси: наука и практика: сборник статей Межд. научно-технич. конф. – Минск: БНТУ, 2008. – С. 163–173.
9. Костюкович, П.Н., Крошнер, И.П. Нелинейно-затухающая модель компрессионного уплотнения грунтов и осадок геоснований // Актуальные научно-технические проблемы современной геотехники: междуз. тематич. сб. тр. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2009. – Т. 2. – С. 192–201.
10. Костюкович, П.Н. Теоретические основы определения гидрогеологических параметров в условиях перетекания подземных вод и при формировании разрыва уровня на стенке возмущающей скважины: автореф. дис. ... д.т.н. – Минск: БПИ, 1996. – 37 с.
11. Костюкович, П.Н. Основные положения теории нелинейных и комбинированных фазовых моделей дисперсных грунтов // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сборник статей XIV Междунард. научно-практич. семинара: в 2 т. – Минск: БНТУ, 2006. – Т. 2. – С. 229–235.

УДК 624.154.04:624.156.04]:624.131.213

## ЭФФЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ С НЕСУЩИМИ РОСТВЕРКАМИ

Сернов В.А.

**Введение.** В настоящее время наметилась тенденция увеличения этажности зданий. В связи с этим, возрастают и нагрузки, передаваемые на основание. Эти