



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НАБУХАНИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

**О. Р. ГОЛЛИ** – д-р техн. наук, старший научный сотрудник ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, г. Санкт-Петербург.

В дополнение к уже известным зависимостям между величинами давления и набухания (или влажностью набухания) приводится ряд связанных с ними и между собой закономерностей набухания глинистых грунтов, которые позволяют с большой степенью вероятности прогнозировать состояние грунтов основания в период эксплуатации после достижения конечного, равновесного, значения влажности и стабилизации всех процессов набухания. Рассматриваются проблемы неравномерности деформаций набухания и вызываемых ими дополнительных (неучтенных) нагрузок на конструкции и усилий в них. Предлагается подход к решению проблемы конструктивными методами.

Набухающие глинистые грунты распространены повсеместно. В Северо-Западном регионе встречается несколько их разновидностей: верхнепротерозойские глины и суглинки, нижнекембрийские глины и др. Однако особые свойства этих грунтов как оснований сооружений далеко не всегда учитываются изыскателями и проектировщиками, что приводит к нежелательным последствиям в период эксплуатации сооружений.

Набухающими называются глинистые грунты, которые при увеличении их влажности увеличиваются в объеме. Увеличение влажности и набухание могут быть вызваны инфильтрацией поверхностных вод (атмосферных осадков) или протечками из водопровода и канализации. Набухание обычно связано не столько с присоединением воды к поверхности глинистых частиц, сколько с ее присоединением к внутренним связям внутри кристаллической решетки глинистых минералов.

Явление набухания распространено достаточно широко, но далеко не всегда эти процессы учитываются при назначении расчетных характеристик глинистых грунтов для проектирования оснований и фундаментов зданий и сооружений. Как набухающие проя-

вили себя хвалынские, киммерийские, сарматские, мэотические, аральские, джезказганские глины и др. Достаточно часто набухающими оказываются четвертичные глины и суглинки, ледниковые и водно-ледниковые осадки, например валдайского оледенения. Четвертичные гидрослюдистые отложения с иллитом, монтмориллонитом и другими минералами, как правило, не рассматриваются изыскателями и проектировщиками как набухающие, хотя и обладают этими свойствами. Способностью набухать обладают также и материалы, которые иногда используются в качестве заменителей грунта: котельные и паровозные золы и шлаки – золошлаковые материалы (ЗШМ).

Некоторые глинистые грунты, не набухающие при замачивании водой, набухают при замачивании химическими растворами, например растворами кислот и щелочей. В этом случае набухание может быть даже более сильным. Протечки канализационных вод, насыщенных растворами органических веществ, также могут быть причиной сильного набухания.

Повышение температуры грунта, связанное с протечками горячих вод или с гипертермальными технологическими процессами, вызывает усиление набухания или приводит к

© О. Р. Голли, 2004

Internet: [www.georec.spb.ru](http://www.georec.spb.ru)

набуханию грунтов, не набухающих при естественных температурах. При этом в набухающих грунтах наблюдается миграция влаги в направлении источника повышенной температуры, аналогичная миграции влаги в пучинистых грунтах при промерзании к фронту промерзания.

Дополнительное (к природному) увлажнение в результате строительства зданий и сооружений различного назначения в их основаниях возникает всегда, даже в том случае, когда замачивание в результате протечек отсутствует. В этом случае дополнительное увлажнение обусловлено так называемым «эффектом экранирования» основания под сооружением в результате нарушения процессов естественной аэрации, «дыхания» основания. В таких случаях влажность грунта неизбежно повышается до некоторой установившейся, конечной влажности, которая находится в равновесии с весом сооружения.

Мы считаем чрезвычайно важным акцентировать внимание всех групп строителей на этих процессах.

*Состояние вопроса.* Согласно СНиП [1, п. 4.1], «Основания, сложенные набухающими грунтами, должны проектироваться с учетом способности таких грунтов при повышении влажности увеличиваться в объеме – набухать. При последующем понижении влажности у набухающих грунтов происходит обратный процесс – усадка». Далее (см. п. 4.2) указывается, что... «набухающие грунты характеризуются давлением набухания  $p_{sw}$ , влажностью набухания  $w_{sw}$ , относительным набуханием  $\varepsilon_{sw}$  при заданном давлении  $\sigma_{sw}$  и относительной усадкой при высыхании  $\varepsilon_{sh}$ ». В прил. 2 к [1] приводятся как характеристики набухающих грунтов – конечная (установившаяся, равновесная) влажность грунта  $w_{eq}$ , так и начальные значения влажности  $w_0$  и коэффициента пористости  $e_0$ .

Подъем основания при набухании грунта  $h_{sw}$  определяется согласно п. 18 прил. 2 [1]:

$$h_{sw} = \sum \varepsilon_{sw, i} h_i k_{sw, i}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{sw, i}$  – относительное набухание  $i$ -го слоя грунта, определяемое в соответствии с указаниями п. 19 прил. 2 [1] и ГОСТ [3]:

при инфильтрации влаги

$$\varepsilon_{sw} = (h_{sat} - h_n)/h_n, \quad (2)$$

при экранировании поверхности

$$\varepsilon_{sw} = k (w_{eq} - w_0) / (1 + w_0); \quad (3)$$

$h_i$  – толщина  $i$ -го слоя;  $k_{sw, i}$  – коэффициент, принимаемый в зависимости от суммарного вертикального напряжения  $\sigma_{z, tot}$  равным 0,8 при  $\sigma_{z, tot} = 50$  кПа и 0,6 при  $\sigma_{z, tot} = 300$  кПа;  $k$  – коэффициент, определяемый опытным путем или принимаемый  $k = 2$ ;  $i$  – порядковый номер слоя из  $N$  слоев, на которые разбита зона набухания.

*Дополнительная информация.* Этим основная информация, регламентируемая нормативными документами, исчерпывается. Однако в действительности все оказывается не совсем так просто, как это изложено в СНиП [1] и в «Пособии...» к нему [2]. Поэтому мы считаем необходимым опубликовать дополнительную полезную информацию.

Начнем с того, что, по предварительной оценке, к набухающим грунтам относятся глинистые грунты, для которых значение показателя

$$П = (e_L - e_0) / (1 + e_0) \geq 0,03, \quad (4)$$

где  $e_0$  – коэффициент пористости грунта природного сложения и влажности;  $e_L$  – коэффициент пористости при влажности на границе текучести.

В зависимости от величин свободного относительного набухания в соответствии с ГОСТ [4] глинистые грунты подразделяются следующим образом (табл. 1).

Таблица 1

Свободное относительное набухание $\varepsilon_{sw0}$	Степень набухания
$\varepsilon_{sw0} < 0,04$	Не набухающий
$0,04 \leq \varepsilon_{sw0} < 0,08$	Слабая
$0,08 \leq \varepsilon_{sw0} < 0,12$	Средняя
$\varepsilon_{sw0} \geq 0,12$	Сильная

При этом все характеристики набухающих глинистых (и других) грунтов рассматриваются в указанных документах как однозначные для каждой разновидности грунтов, в то время как в действительности они совсем не однозначны.

Во-первых, часто имеет место значительный разброс таких характеристик, как относительная деформация свободного (без нагрузки) набухания  $\varepsilon_{sw_0}$ , влажность набухания  $w_{sw_{max}}$  (конечная влажность при набухании без нагрузки) и давление набухания  $p_{sw}$  (при котором  $\varepsilon_{sw_0} = 0$ ).

Например, при анализе характеристик набухания залегающих в основании Крымской АЭС четвертичных глин и суглинков эолово-делювиального происхождения, представленных гидрослюдами с примесью каолинита и монтмориллонита, в пределах слоя мощностью около 6 м деформации свободного набухания  $\varepsilon_{sw_0}$  колебались от 0,04 до 0,14, а величины давления набухания  $p_{sw}$  – от 0,05 до 0,35 МПа при изменении исходной влажности испытуемых образцов от 0,13 до 0,21. С одной стороны, столь существенная разница характеристик в пределах слоя набухания грунтов сравнительно небольшой мощности и одного и того же генезиса и стратиграфического уровня требует применения методов математической статистики, но математический аппарат для этой цели должен быть разработан специально, так как в данном случае расчетными характеристиками являются, например, не среднеминимальные, а среднемаксимальные их величины.

Но такой существенный разброс значений основных характеристик набухания не может объясняться только неоднородностью минералогического состава грунта от «точки к точке» (Л. В. Иванов) и определяться только статистическими характеристиками.

Во-вторых, величина относительного набухания  $\varepsilon_{sw}$ , определяемая по (2) или (3), может оказаться практически одинаковой для 1-го, i-го или n-го слоя, хотя в действительности она зависит и от глубины расположения этого слоя, и от величины давления на него, и от начальной влажности, которая практически может незначительно меняться в пределах зоны набухания толщиной  $h_{sw}$  или некоторого слоя  $i$  толщиной  $h_i$ . Это происходит потому, что мы испытываем все образцы, изъятые из массива, по одинаковой методике и в одинаковых приборах, вследствие этого и результаты могут быть практически идентичными и не будут отображаться методами математической статистики. Однако определить разницу в

свойствах по глубине всего массива и возможно, и необходимо. Для этого следует использовать некоторые не известные в широкой практике *закономерности процессов набухания*.

Отметим, что давление набухания и влажность набухания являются многофункциональными характеристиками и однозначно определяться не могут. Для наглядности приведем графические иллюстрации многозначности основных характеристик и некоторых закономерностей набухания на примере одного из набухающих грунтов Северо-Западного региона – протерозойского суглинка, для которого давление набухания имеет величину  $p_{sw} = 0,10 \dots 0,25$  МПа при средней начальной влажности испытуемых образцов  $w_0 = 0,10$ , варьирующей от 0,07 до 0,15, а величина свободного набухания изменяется в широком диапазоне  $\varepsilon_{sw_0} = 0,04 \dots 0,43$ . Аналогичные результаты были зафиксированы в исследованиях Е. А. Сорочана [5], А. Л. Невзорова [6] в СПбГПУ (ЛПИ), В. Д. Ломтадзе [11], в трудах треста ГРИИ, «Фундаментпроект» [12, 13].

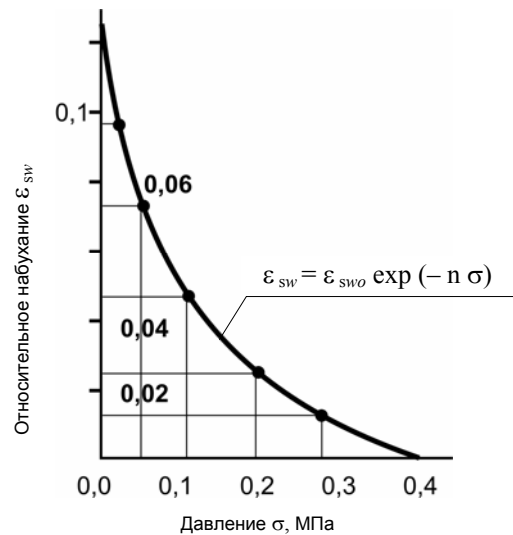


Рис. 1. Зависимость величины относительного набухания  $\varepsilon_{sw}$  от вертикального давления  $\sigma$

На рис. 1 представлена известная зависимость  $\varepsilon_{sw} = f(\sigma)$  между деформациями набухания  $\varepsilon_{sw}$  и давлением  $\sigma$ . Почему-то эта зависимость, столь необходимая проектировщику, обычно достаточно редко выдается

отделами изысканий. Из графика видно, что для одного и того же грунта существует бесконечное количество парных значений  $\varepsilon_{sw}$  и  $\sigma$ . Эта зависимость достаточно удовлетворительно аппроксимируется экспонентой

$$\varepsilon_{sw} = \varepsilon_{sw0} \exp(-n\sigma), \quad (5)$$

где параметр  $n$ , определяемый опытным путем, для протерозойских суглинков изменялся в диапазоне  $n = 3,0 \dots 4,0$ .

Пользуясь этим графиком, всегда можно установить нужную пару значений  $\varepsilon_{sw}$  и  $\sigma$ , в том числе величину свободного набухания  $\varepsilon_{sw0}$  при  $\sigma = 0,0$  и давление набухания  $p_{sw}$ , полностью подавляющее набухание ( $\varepsilon_{sw} = 0,0$ ).

На рис. 2 приведена зависимость влажности набухания  $w_{sw} = f(\sigma)$ , которая также оказывается совсем не однозначной величиной и аппроксимируется [8, 9]

$$w_{sw} = w_{sw \min} + (w_{sw} - w_{sw \min}) \exp(-\alpha\sigma). \quad (6)$$

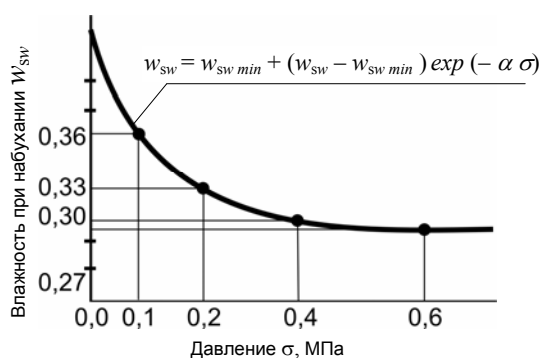


Рис. 2. Зависимость влажности набухания  $w_{sw}$  от вертикального давления  $\sigma$

Пользуясь графиком рис. 2, всегда можно установить ту конечную (установившуюся, равновесную) влажность  $w_{eq}$ , которая будет соответствовать заданному давлению и которой мы будем оперировать в дальнейших исследованиях и расчетах.

Статистический анализ позволил выявить на примере верхнепротерозойских суглинков достаточно четкую зависимость между величинами относительного набухания  $\varepsilon_{sw}$  и начальным состоянием грунта до его увлажнения и набухания, определяемым, главным образом, его начальной влажностью  $w_0$ .

Обработка результатов экспериментов методом наименьших квадратичных отклонений

позволила аппроксимировать зависимость величин свободного относительного набухания  $\varepsilon_{sw0}$  от начальной влажности экспонентой вида [8, 9]

$$\varepsilon_{sw} = \varepsilon_{sw0} \exp(-\psi w_0). \quad (7)$$

При этом  $\varepsilon_{sw0} = 0,45$ , а параметр  $\psi$  есть показатель затухания (уменьшения) набухания при увеличении начальной влажности  $w_0$  до величины, близкой к влажности набухания  $w_{sw}$ . При  $w_0$ , близкой к влажности набухания  $w_{sw}$ , параметр  $\psi$  оказался равным  $\psi = 15$  (рис. 3). Коэффициент корреляции  $r = 0,90$  указывает на достаточно высокую тесноту корреляционной связи между величинами  $w_0$  и  $w_{sw}$ .

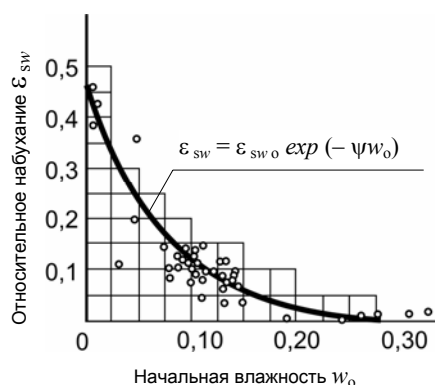


Рис. 3. Зависимость величины относительного набухания  $\varepsilon_{sw}$  от начальной влажности  $w_0$

Простой и определенной оказалась зависимость величины относительной деформации свободного набухания  $\varepsilon_{sw0}$  от приращения влажности  $\Delta w = w_{sw} - w_0$  (от начальной, природной, до влажности набухания) [8–10]. Эта зависимость выявлена также с использованием метода наименьших квадратичных отклонений и имеет вид линейной функции (рис. 4) [10]:

$$\varepsilon_{sw} = k_{sw} \Delta w, \quad (8)$$

где  $k_{sw}$  – параметр линейной зависимости. Для протерозойских суглинков  $k_{sw} = 1,15$  при коэффициенте корреляции  $r = 0,903$ .

Аналогичная зависимость может быть построена и для процесса усадки набухающих грунтов при высыхании:

$$\varepsilon_{sh} = k_{sh} \Delta w. \quad (9)$$

Для протерозойских суглинков  $k_{sh} = 0,45$ , т. е. имеет место неравенство деформаций набухания и усадки, своеобразный гистерезис набухания–усадки, что необходимо знать при оценке зависимости  $\varepsilon_{sw} = f(\sigma)$  (см. рис 3). Таким образом, в результате попеременно сменяющих друг друга процессов набухания и усадки набухающих грунтов дна котлована характеристики грунта могут со временем существенно изменяться.

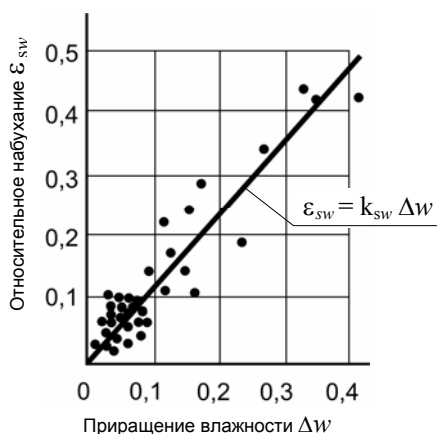
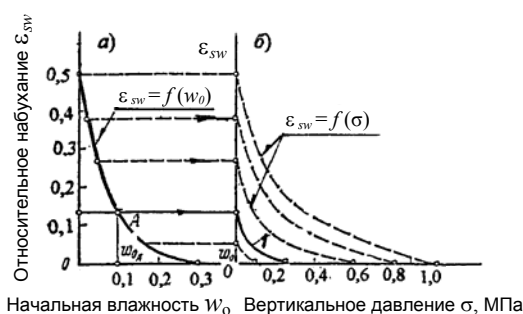


Рис. 4. Зависимость величины относительного набухания  $\varepsilon_{sw}$  от приращения влажности  $\Delta W$

Полученные зависимости позволяют прогнозировать величину набухания грунта, а при необходимости – определять поправку, например, при стоянии открытого котлована или в результате деформационных экспериментов, условия которых не соответствуют натурным.

При прогнозировании деформаций набухания следует иметь в виду, что зависимость, показанная на рис. 5, б, очевидно, соответствует только определенной начальной влажности  $w_{oA} = 0,10...0,12$ , т. е. точке *A* на кривой *l* (см. рис. 5, а). Другим значениям  $w_o$  будут соответствовать другие кривые  $\varepsilon_{sh} = f(\sigma)$  этого семейства аффинных кривых, обладающих свойством аффинного подобия. В первом приближении эти кривые могут быть построены методом графической экстраполяции, так как они обладают свойствами аффинного подобия (см. рис. 5, б). Такой прием был использован при анализе результатов исследований грунтов основания котлована С-1 Комплекса защиты Ленинграда от наводнений. При отмеченной закономерности началь-

ным влажностям, меньшим  $w_{oA}$  (в точке *A*), будут соответствовать на графике величины давления набухания  $p_{sh}$ , большие, чем  $p_{shA}$  (см. рис. 5, б). Это, в частности, означает, что, если вначале, после вскрытия котлована, грунт высыхает, а затем увлажняется атмосферными или техногенными водами, то набухание его будет больше, чем при отсутствии высыхания. И это обстоятельство следует иметь в виду при прогнозировании набухания грунтов и защите набухающих грунтов дна котлована от высыхания и замачивания.



Начальная влажность  $w_o$ . Вертикальное давление  $\sigma$ , МПа

Рис. 5. Прогнозирование характеристик набухания во всем возможном диапазоне их изменения по начальной влажности  $w_o$  и кривой зависимости  $\varepsilon_{sw} = f(\sigma)$  в узком интервале начальных влажностей  $w_o$

Последнее обстоятельство наглядно подтверждается существованием для протерозойских суглинков кривой зависимости величины влажности набухания  $w_{sh}$  от исходной, начальной, влажности  $w_o$  [8, 9]:

$$w_{sh} = f(w_o) = (A / k_{sh}) \exp(-\psi w_o) + w_o. \quad (10)$$

Формула (10) получена в результате совместного решения уравнений (7) и (8). На рис. 6 нанесены кривая (10) и совокупность опытных точек для протерозойских суглинков, свидетельствующая о достаточно удовлетворительной аппроксимации.

Представленные выше зависимости (5)...(10) отражают закономерности набухания грунтов применительно к некоторому одному *i*-му слою грунта, выделенному из общей зоны набухания. Но изменчивость характеристик наблюдается и в пределах всей толщины зоны набухания  $h_{sh}$ . В пределах всей толщи потенциально набухающих грунтов это будет зона в ее верхней части, мощность которой определится

$$d_{sh} = p_{sh} / \gamma_0, \quad (11)$$

где  $\gamma_0$  – среднестатистическое значение удельного веса грунта.

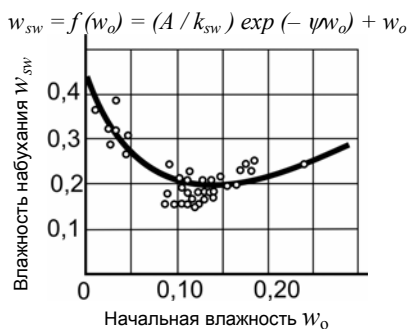


Рис. 6. Зависимость влажности набухания  $w_{sw}$  от начальной влажности  $w_0$

Отметим, что образец грунта, полученный из массива ниже глубины  $d_{sh}$ , в приборах для определения набухания (ПНГ) и в компрессионных приборах будет проявлять свои набухающие свойства в такой же степени, в какой и образец, изъятый из пределов зоны набухания. Это связано с тем, что набухание при замачивании распространяется не на весь массив, а только на глубину  $d_{sh}$  и в пределах этой глубины послойно распределяется так, как показано на рис. 7, а [5–9]:

$$h_{sh z} = h_{sh o} \exp(-m z), \quad (12)$$

или в нормализованном виде (в относительных координатах)

$$K_{sh z} = (h_{sh z} / h_{sh o}) \exp(-m z / d_{sh}), \quad (13)$$

где  $z$  – вертикальная координата глубины;  $h_{sh o}$  и  $h_{sh z}$  – вертикальные деформации поднятия слоя грунта на поверхности и с координатой  $z$  соответственно.

Продифференцировав уравнение (12) по переменной координате  $z$ , получим выражение для  $f_{sh z} = d h_{sh z} / dz$ , где  $f_{sh z} (\epsilon_{sh z})$  – интенсивность деформаций набухания на любой отметке  $z$  (см. рис.7, б):

$$f_{sh z} = -m f_{sh o} \exp(-m z), \quad (14)$$

где  $f_{sh o}$  – интенсивность набухания у поверхности ( $z \approx 0$ ), или, что то же,

$$\epsilon_{sh z} = -m \epsilon_{sh o} \exp(-m z). \quad (14')$$

Тогда уравнение (14) в нормализованном виде может быть представлено

$$f_{sh z} / f_{sh o} = -m \exp(-m z / d_{sh}). \quad (15)$$

Параметр  $m$  должен определяться экспериментально, но для киммерийских, сарматских, хвалынских, аральских и джезказганских глин он по абсолютной величине может приниматься в диапазоне значений  $m = 3,0 \dots 3,5$ .

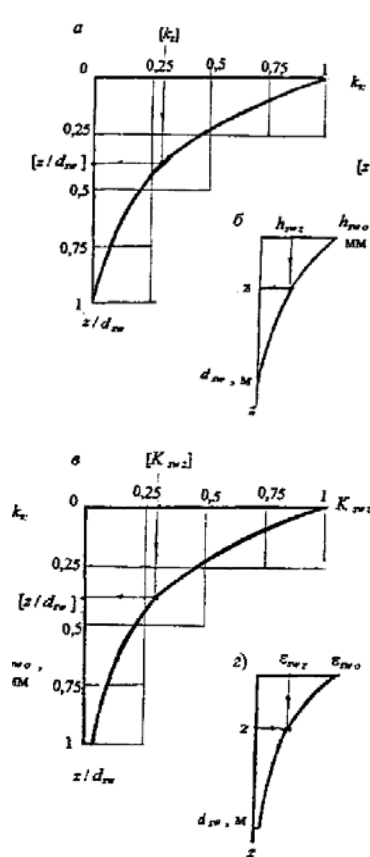


Рис. 7. Графики распределения послойных поднятий (а) и послойных относительных деформаций (б) набухающего при замачивании грунта в относительных (а, в) и абсолютных (б, г) координатах

Таким образом, относительная деформация набухания  $\epsilon_{sh z} = f_{sh z}$  (интенсивность набухания) не постоянна по глубине массива грунта in situ, а меняется по экспоненциальному закону. Однако образец, полученный с глубины  $z \geq d_{sh}$ , может в компрессионном приборе или в приборе ПНГ демонстрировать такие же характеристики набухания, как и образец, изъятый из слоя близ поверхности ( $z \approx 0$ ). И это

необходимо учитывать при назначении расчетных характеристик набухающих грунтов.

Так как влажность набухающих грунтов при набухании может существенно увеличиваться, необходимо помнить, что при увеличении влажности происходит разупрочнение этих грунтов. В табл. 2 приводятся ориентировочные значения коэффициентов разупрочнения  $K_{рупр}$  в зависимости от набухания и приращения влажности  $\Delta w$ .

Таблица 2

Характеристика грунта	Свободное относительное набухание $\varepsilon_{sho}$	Приращение влажности $\Delta w$	Коэффициент разупрочнения $K_{рупр}$
Не разупрочняющийся	$\leq 0,01$	$\leq 0,02$	$\leq 1,4$
Разупрочняющийся	$0,01 \dots 0,03$	$0,02 \dots 0,05$	$1,4 \dots 2,0$
Сильно разупрочняющийся	$0,03 \dots 0,10$	$0,05 \dots 0,15$	$2,0 \dots 4,0$
Очень сильно разупрочняющийся	$> 0,10$	$> 0,15$	$> 4,0$

Приращение влажности следует учитывать в интервале от начальной  $w_0$  до конечной, равновесной, установившейся влажности  $w_{eq}$ . При оценке коэффициента разупрочнения  $K_{рупр}$  можно использовать метод интерполяции.

Увеличение влажности глинистых грунтов (как набухающих, так и не набухающих) всегда связано с увеличением их деформируемости и уменьшением прочности. На рис. 8 и 9 приводятся графики зависимости предельного сопротивления сдвигу глинистых грунтов различного генезиса от их влажности, по данным Н. А. Цытовича и Хоу (Hough) [14] и Н. Н. Маслова [15], а на рис. 10 – зависимость от влажности составляющих сопротивления глины сдвигу угла внутреннего трения  $\varphi^0$  и сцепления  $c$ , кгс/см<sup>2</sup> [15]. Об этом же говорят и данные таблиц прил. 1 и 3 СНиП [1], где нормативные значения прочностных и деформационных характеристик грунтов даются в зависимости от показателя текучести  $I_L$ , т. е. с учетом их влажности.

Однако в изысканиях проектировщика едва ли найдет место прогноз изменения влажности грунта под сооружением и соответствующего ему изменения прочностных и деформационных характеристик на период эксплуатации сооружения. Тем не менее, этот прогноз дол-

жен быть выполнен, и проектирование сооружений должно вестись с учетом изменения прочностных и деформационных характеристик грунтов основания.

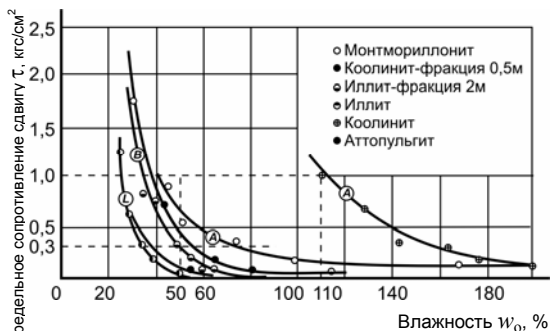


Рис. 8. Зависимость от влажности  $w$  сопротивления сдвигу мономинеральных глинистых грунтов

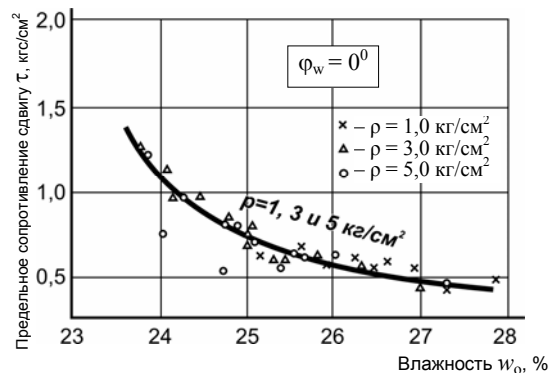


Рис. 9. Зависимость от влажности  $w$  сопротивления сдвигу тяжелых пластичных ириклинских суглинков

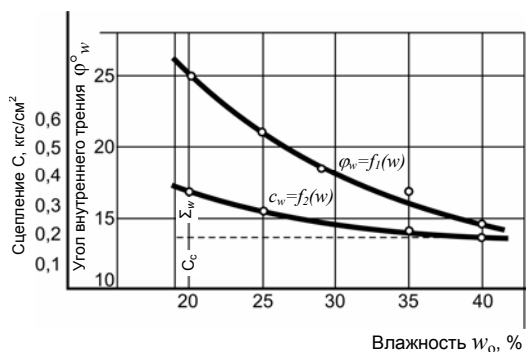


Рис. 10. Зависимости от влажности  $w$  составляющих сопротивления сдвигу  $\tau_w$  угла внутреннего трения  $\varphi_w^0$  и общего сцепления  $c_w$

С учетом разупрочнения грунта при набухании необходимо особо тщательно определять его прочность и деформируемость в



соответствии с приращением влажности до ее равновесной (конечной) величины и с условиями залегания исследуемого слоя по глубине массива грунта. Особую важность представляет правильный учет неравномерности деформаций набухания.

Основная концепция нового подхода к проектированию и строительству зданий и сооружений на набухающих глинистых грунтах, к учету и сбору дополнительных нагрузок, которые до этого никак не учитывались, заключается в *допущении равномерного* поступательного движения вверх этих сооружений в процессе набухания грунта основания. Для большинства сооружений равномерный подъем был бы совершенно безопасен, если бы не *неравномерность* деформаций набухания. Нежелательные деформации и разрушения сооружений вызываются именно неучтенными, непредусмотренными перемещениями отдельных элементов конструкций, вызванными *неравномерностью* деформаций набухания основания.

Влияние неравномерности набухания может компенсироваться конструктивными решениями, например армированием. Когда на одной площадке, под одним и тем же сооружением грунт, считающийся однородным, набухает и поднимается по-разному, в элементах конструкций возникают не предусмотренные расчетом и, следовательно, неучтенные дополнительные усилия. С позиций строительной механики воздействия на конструкцию перемещения  $\Delta h_{sw}$  и усилия или нагрузки  $\Delta \sigma_{sw}$  (рис. 11) эквивалентны, что соответствует известным принципам метода сил и метода возможных перемещений «статики сооружений». Максимальная ордината  $q_{sw}$  эпюры дополнительной неравномерно распределенной нагрузки (рис. 12), создаваемой локальной неравномерностью набухания на единицу площади контакта грунта и сооружения (на месте бугра набухания), может быть определена как разность  $\Delta \sigma_{sw}$  между ординатами  $\sigma_{sw1}$  и  $\sigma_{sw2}$ , соответствующими одному и тому же значению аргумента  $h_{sw}$  – средней величине реализовавшегося набухания по осредненной кривой 1 зависимости (1) при проектном давлении  $p_{доп} = \sigma_{sw1}$  (см. рис. 11):

$$q_{sw} = \Delta \sigma_{sw} = \sigma_{sw2} - \sigma_{sw1}, \quad (16)$$

где индексы 1 и 2 обозначают давления, соответствующие деформации набухания  $h_{sw}$  на кривых 1 (среднего набухания) и 2 (максимального подъема грунта при набухании).

Воздействие перемещения  $\Delta h_{sw}$  на конструкцию можно заменить напряжением (нагрузкой  $\Delta \sigma_{sw}$ ), соответствующим этому перемещению и способным его уравновесить. При этом, по существу, отпадает необходимость в привычном методе итераций, так как каждой точке кривой 1 (см. рис. 11) совершенно однозначно соответствует, кроме пары значений «перемещение  $h_{sw}$  – напряжение  $\sigma_{sw}$ », еще и пара значений  $\Delta h_{sw}$  и  $\Delta \sigma_{sw}$ . Такой подход позволяет решать задачи с учетом неравномерности деформаций набухания, не прибегая к методу итераций, если известны закономерности набухания и их параметры. Кроме того, при таком подходе возможно решение инженерных задач по разным предельным состояниям (по прочности и деформациям) как грунта, так и конструкций.

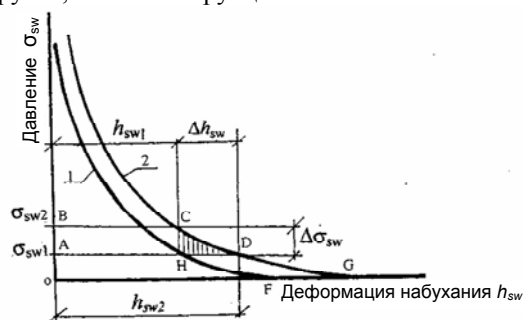


Рис. 11. К определению дополнительных нагрузок  $\Delta \sigma_{sw}$ , возникающих вследствие неравномерности набухания грунта, на конструкции сооружений

Настоящий подход к решению инженерных задач в строительстве запатентован [16] и был неоднократно и успешно использован при проектировании и строительстве зданий на фундаментах поверхностного заложения, при проектировании плит аэродромных покрытий при реконструкции крупных аэродромов, при ремонте и реконструкции зданий и сооружений самого различного назначения.

Кроме сказанного выше, необходимо учитывать, что набухающие глинистые грунты сильнее набухают при повышении температуры грунта и подвергаются промерзанию с проявлениями морозного пучения при пони-

жении ее ниже температуры начала замерзания. Этими вопросами в свое время занимался В. Л. Невечеря [17].

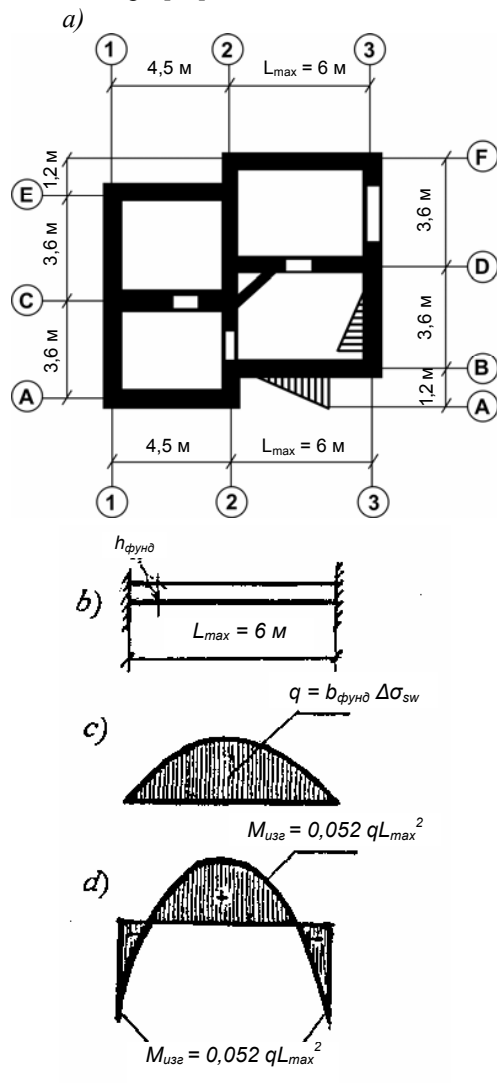


Рис. 12. К определению дополнительных усилий ( $M_{изг}$ ), возникающих в элементах конструкций (в фундаментных стенках) от дополнительных нагрузок  $\Delta\sigma_{sw}$  вследствие неравномерности набухания грунтов основания:  
 a – план фундаментов; b – статическая схема фундаментной стенки; c – эпюра нагрузок; d – эпюра изгибающих моментов

Однако в этом направлении требуются дополнительные исследования, так как В. Л. Невечеря была выполнена оценка способности набухших грунтов к морозному пучению формально, только по их влажности,

и, с нашей точки зрения, эта оценка является завышенной: набухающие грунты, набухая, включают влагу в состав своей кристаллической решетки (скелета), и эта влага при понижении температуры ниже температуры начала замерзания грунта не замерзает. В итоге увлажненный набухающий грунт будет пучиться при промерзании существенно меньше, чем не набухающий глинистый грунт даже с меньшей влажностью. Более точные характеристики пучения набухающих грунтов должны быть установлены специальными исследованиями.

### ВЫВОДЫ

Набухающие глинистые грунты представляют собой группу грунтов с изменяющимися при набухании свойствами и строительными характеристиками.

Набухание вызывается не только переувлажнением чистой водой, но и замачиванием химическими растворами (кислот, щелочей), канализационными водами с содержанием органики и др.

Причиной набухания при достаточной влажности может быть и повышение температуры грунта при гипертермальных технологических процессах, при этом в набухающих грунтах наблюдается миграция влаги в направлении источника повышенной температуры, аналогичная миграции влаги в пучинистых грунтах при промерзании к фронту промерзания.

Как и все увлажненные глинистые грунты, набухающие грунты проявляют способность к морозному пучению, степень которой следует правильно оценивать при назначении характеристик пучения.

Характеристики набухания и связанные с ними характеристики прочности и деформируемости не являются однозначными, а зависят от многих факторов (основным из них является изменение влажности).

Для статистической обработки результатов испытаний набухающих грунтов, относящихся к некоторому одному i-му слою зоны набухания, необходимо разработать и внедрить в практику специальный аппарат математической статистики, учитывающий, что в данном случае расчетные значения характеристик набухания должны быть больше норматив-

ных, а расчетные значения характеристик механических свойств – меньше нормативных.

Изысканиями должны устанавливаться, а проектировщиками – учитываться при расчетах значения влажности и характеристик прочности и деформируемости грунтов оснований не только на период изысканий и начала строительства, но и на период после завершения строительства, на период эксплуатации с учетом прогноза стабилизации их значений.

При работе с образцами из  $n$  разных слоев зоны набухания для правильной оценки свойств и поведения набухающих грунтов в совокупности с сооружением следует каждый раз численно аппроксимировать закономерности (5)–(15) и уже в таком виде использовать их в практической работе.

Влияние неравномерности набухания следует учитывать и компенсировать конструктивными решениями, например армированием.

### Список литературы

1. СНиП 2.02.01–83. Основания зданий и сооружений. М.: Стройиздат, 1985. 42 с.
2. *Пособие* по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01–83). М.: Стройиздат, 1986. 415 с.
3. ГОСТ 24143–80. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик набухания и усадки. М., 1980.
4. ГОСТ 25100–95. Грунты. Классификация. М., 1995.
5. *Сорочан Е. А.* Строительство сооружений на набухающих грунтах. М.: Стройиздат, 1974. 225 с.
6. *Невзоров А. Л.* Набухание глинистых грунтов и его учет при расчетах деформаций оснований зданий и сооружений: Автореф. дисс... канд. техн. наук / ЛПИ. Л., 1983. 19 с.
7. *Голли О. Р.* Рекомендации по проектированию оснований аэродромных покрытий в

особых инженерно-геологических условиях / МГА, АЭРОПРОЕКТ. М., 1980. 70 с.

8. *Исследование* грунтов основания судопропускных сооружений С-1 и С-2 защиты Ленинграда от наводнений: Промежут. отчет ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева по дог. 8-4439. Разд. III. О. Р. Голли и др. СПб., 1981. № ГР 80061661.

9. *Исследование* грунтов оснований судопропускных сооружений С-1 и С-2 защиты Ленинграда от наводнений: Заключит. отчет ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева по дог. № д. IV, ч. I / О. Р. Голли и др. СПб., 1982. № ГР 81052595.

10. *Голли О. Р.* Прогнозирование свойств глинистых грунтов при набухании в зависимости от их начальной влажности // Известия ВНИИГ. Т. 156. Л., С. 32–35.

11. *Ломтадзе В. Д.* Физико-механические свойства нижнекембрийских глин Северо-западной окраины Русской платформы // Записки ЛГИ. Т. XXXIV. Л., 1958. Вып. 2. С. 154–188.

12. *К изучению* физико-механических свойств верхнепротерозойских и нижнекембрийских глинистых грунтов: Информ. бюллетень № 1 (22) / В. И. Фурса, Н. Н. Сидоров и др. М., 1971. 17 с.

13. *Фурса В. И.* Строительные свойства грунтов района Ленинграда. Л.: Стройиздат, 1975. 143 с.

14. *Цытович Н. А.* Механика грунтов. М., 1963. 636 с.

15. *Маслов Н. Н.* Основы механики грунтов и инженерной геологии. М.: Науч.-техн. изд-во Мин. автомобильного транспорта и шоссейных дорог РСФСР, 1961. 707 с.

16. *Голли О. Р.* Фундамент мелкого заложения: Свид-во № 1697. ПМ. Российский патент. Бюлл. №2 от 16.02.96.

17. *Невечеря В. Л.* Методические рекомендации по проектированию земляного полотна железных дорог из набухающих грунтов / ЦНИИС Минтрансстрой СССР. М., 1973.