

СЫСОВ Ю.А.

*Заместитель главного инженера по инженерным изысканиям
ООО «Оренбург Проект Менеджмент», г.г.-м.в., г. Москва,
Yuriy.Sysoev@orenburgpm.ru*

SYSOEV YU. A.

*Deputy Chief Engineer For Engineering surveys of the «Orenburg Project
Management» LLC, PhD. (candidate of science in Geology and
Mineralogy), Moscow; Yuriy.Sysoev@orenburgpm.ru*

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ПОРИСТОСТИ ПЕСКОВ ПРИ ИНЖЕНЕРНО- ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ

THEORY AND PRACTICE OF SAND VOID RATIO ESTIMATION FOR ENGINEERING-GEOLOGICAL SURVEYS

Ключевые слова: песок; коэффициент пористости; критический коэффициент пористости; плотность; максимальная плотность; степень плотности; статическое зондирование.

Key words: sand; void ratio; critical void ratio; density; maximal density; density degree; cone penetration testing.

Аннотация: в статье рассматриваются теоретические и практические аспекты оценки коэффициента пористости песков в естественном залегании. Приводится методика определения коэффициента пористости песков *in situ* на основе параметра максимальной плотности скелета грунта и эмпирических зависимостей степени плотности от сопротивления под конусом статического зонда. Приводятся методы оценки максимальной плотности, в том числе региональные зависимости. Рассматривается сходимость результатов определения коэффициента пористости песка, полученных по разработанной методике и стандартным способом по ГОСТ 5180. Предлагаются критерии разделения песков по степени плотности относительно характеристик статической прочности.

Abstract: the article discusses theoretical and practical aspects of void ratio estimation of sands *in situ*. A technique of determining the void ratio of sands *in situ* on the basis of the parameter of the maximal dry soil density and empirical dependencies of the density index on the cone penetration test resistance is presented. Methods of the maximal density estimation including regional dependencies are presented. Coincidence of the results of determining void ratio using the developed technique and the standard technique according to the GOST 5180 is considered. Classification criteria of sands by their density degrees relative to their statical strength characteristics are suggested.



Наиболее точными и надежными методами оценки пористости песка в естественном залегании остаются методы, применяемые при работе в естественных или искусственных обнажениях и открытых горных выработках. Но только в строительных котлованах доступны относительно глубокие горизонты, представляющие практический интерес. На стадии инженерно-исследовательских работ в большинстве случаев нет возможности изучить этими методами песок, залегающий ниже подошвы деятельного слоя, а отбор качественных проб песков ненарушенной структуры из буровых скважин — весьма трудоемкое мероприятие, даже если речь идет об отложениях, залегающих выше уровня грунтовых вод.

При работе в скважинах с песками в отличие от работы с глинистыми грунтами в большинстве случаев нет возможности получить явные визуальные подтверждения того, что структура удерживающего форму песка нарушена настолько, что к ней нельзя, хотя бы и с оговорками, отнести как к природной структуре [4, 32]. В результате при массовом отборе образцов подтверждение их сохранности обеспечивается лишь самим фактом применения в скважине специальных приспособлений. Но, даже методично следуя нормативным требованиям к отбору проб, нельзя уверенно утверждать, какого рода образец извлекается с глубины на самом деле. Внедрение любого инструмента в сыпучую среду не проходит бесследно для ее структуры и сопровождается сдвигом частиц на границе «грунт — оборудование». Степень нарушения структуры песка в образце связана с его критической пористостью, зависит от начального состояния грунта и напряжений в той или иной точке массива. Определенное влияние имеет скорость приложения нагрузки.

Исследования поведения песка в зонах сдвига технически затруднены. Известны опыты с применением радиоактивных источников малого размера, методы микротомографии, фотофиксации, наблюдений за поведением окрашенных сегментов опытных образцов. Последние показали, что при сдвиге образца песка основные структурные изменения возникают в зоне, средняя толщина которой не превышает 3–5 мм. Частные значения могут достигать 6–7 мм, а отдельные — 20–30 мм. Интенсивность структурных изменений постепенно затухает в обе стороны от зоны сдвига [19]. Данные о толщине

зоны сдвига получены в условиях исследовательской лаборатории при тщательном наблюдении и фиксации любых изменений в поведении образцов. Что происходит с пробой грунта, отбираемой грунтоносом с глубины в каждом конкретном случае, когда визуальный контроль отсутствует, а степень воздействия инструмента на среду в связи с общей нестабильностью операций существенна, и в какой степени размер нарушенной периферийной зоны образца отличается от стандартных размеров, остается неизвестным. Тем не менее тщательная подготовка к отбору ненарушенной пробы песка из скважины при отношении к процессу как к серьезной полевой операции, видимо, позволяет добиться приемлемого качества образцов для слоев, залегающих выше уровня грунтовых вод. Из водонасыщенных песков без специализированных методик отбора, применение которых в подавляющем большинстве случаев нерентабельно, отобрать пробу ненарушенной структуры практически невозможно. Мнение авторитетных исследователей на этот счет на протяжении многих десятилетий остается неизменным [4, 28, 29, 32, 34].

В литературе [1, 17, 22, 26, 29] периодически предлагаются различные способы определения коэффициента пористости песка, не предполагающие обязательного наличия в распоряжении инженера образца ненарушенной структуры. Некоторые из них требуют дополнительного обоснования, другие — привлечения прямых эмпирических данных, но ни один из методов не использует известные фундаментальные зависимости, предложенные К. Терцаги еще в первой половине прошлого века и обладающие огромным научно-практическим потенциалом, который до настоящего времени и в методической, и в нормативной базе до конца не оценен:

$$I_d = \frac{e^{\max} - e}{e^{\max} - e^{\min}}; \quad (1)$$

$$I_d = \frac{\rho_d^{\max} - \rho_d^{\min}}{\rho_d^{\max} - \rho_d^{\min}}; \quad (2)$$

где I_d — степень плотности; e — коэффициент пористости песка при естественном сложении; e^{\max} — коэффициент пористости песка при предельно рыхлом сложении; e^{\min} — коэффициент пористости песка при предельно плотном сложении; ρ_d — плотность скелета песка при естественном сложении; ρ_d^{\max} — плотность скелета песка при

предельно плотном сложении; ρ_d^{\min} — плотность скелета песка при предельно рыхлом сложении.

Комплексный параметр, представляющий собой пару значений (ρ_d^{\max} ; ρ_d^{\min}), можно было бы назвать предельной плотностью скелета грунта. Теоретически имеется бесконечное множество значений предельной плотности, соответствующих той или иной влажности и используемому методу укладки грунта в условиях необходимой работы, затрачиваемой на его предельное уплотнение, или необходимых усилий, если речь идет о получении наиболее рыхлой структуры. Принимая величину такой работы (усилий) максимальной, с практических позиций наибольший интерес представляют сами методы укладки, в первую очередь условия, при которых реализуются эти методы [13]: укладка грунта может быть выполнена при его влажном состоянии (M^w), при его воздушно-сухом состоянии при гигроскопической влажности (D) и в условиях водной седиментации (S)¹.

Сравнение значений предельной плотности одного и того же песка, уложенного максимально плотно и максимально рыхло различными методами, показывает [13, 28], что максимальные и минимальные коэффициенты пористости, входящие в формулу определения степени плотности $I_d(1)$, следует оценивать через соответствующие значения плотности скелета грунта, полученные на увлажненных образцах. Несмотря на это, в подавляющем большинстве случаев предельную плотность песков определяют при их гигроскопической влажности. При таком положении дел становится ясно, почему в результате получаются не совсем те значения I_d (нередко существенно превышающие единицу), какие имел в виду К. Терцаги, впервые предложивший классифицировать пески, используя этот показатель. Часто в качестве причин определения значений I_d , лежащих за пределами «классического» диапазона, называются различные процессы, в том числе процессы диагенеза, протекающие в массиве [12, 15]. Методы определения предельной плотности скелета песка,

¹ Буквенные символы M^w , D , S , заимствованные из работы [13], соответствуют различным способам лабораторной укладки песка и далее в тексте используются для обозначения в аббревиатурах отдельных физических параметров того или иного способа лабораторного определения их значений.

которые могут быть разнообразны для решения задач физического моделирования образцов, но которые должны быть едиными для ответов на вопросы, касающиеся определения его плотности в естественных или искусственных массивах, как правило, не рассматриваются.

Именно отсутствие системы целевых унифицированных методов определения параметра (ρ_d^{\max} ; ρ_d^{\min}) в начале 50-х годов прошлого века сформировало в отечественной среде специалистов-изыскателей мнение о том, что степень плотности песка не может служить характеристикой, отражающей его состояние. Среди доводов против использования показателя I_d назывались также формальный подход к разделению песков по различным группам состояний и отсутствие связи между классификацией песков по степени плотности и их механическими свойствами.

В 1954 году, проведя в лабораторных условиях 400 определений предельной плотности песков различных номенклатурных видов, возраста и генезиса, С.И. Синельщиков [25] пришел к выводу, что каждая разновидность песчаного грунта по гранулометрическому составу имеет свою, присущую только ей, предельную плотность сложения и эту величину можно считать практически постоянной. Основываясь на этих соображениях, С.И. Синельщиков предложил отказаться от такого показателя, как степень плотности I_d , и пользоваться таблицей граничных значений коэффициентов пористости для песков различной плотности сложения, которая впервые появилась в нормах НИТУ 127-55 [18] и со временем приобрела вид таблицы Б.2.5 из ГОСТ 25100-2011 [8].

После введения в действие НИТУ 127-55 [18] многие пески, которые по факту обустройства, например, свайных фундаментов относились к плотным разностям, стали считаться песками средней плотности и рыхлыми. Наметившийся приоритет оценки плотности песков по абсолютному значению коэффициента пористости по сравнению с другими методами ее определения приводил к ошибкам в выборе типов фундаментов, а применительно к вопросам обустройства свайного основания — к задержкам сроков производства свайных работ, массовому недопогружению свай, разрушению их голов [14].

Все это, а также полученные С.И. Синельщиковым [25] погрешности опре-

деления границ между различными группами состояний песка, примеры из работ [14, 15] и собственный опыт изысканий говорят о том, что к таблице Б.2.5 из ГОСТ 25100-2011 [8] следует относиться как минимум осторожно. Ранее на это указывал М.Н. Гольдштейн [4]. Оценивая практическое применение результатов работ С.И. Синельщикова, М.Н. Гольдштейн отмечал, что их использование приемлемо для однородных и окатанных песков, но для неоднородных и плохо окатанных разностей границы между группами их состояний требуют существенной корректировки [4]. В связи с этим следует вновь обратиться к показателю относительной плотности I_d с целью ревизии физического смысла и оценки методов получения этого параметра, ссылаясь на глубокие убеждения К. Терцаги в том, что механические свойства несвязных грунтов почти целиком зависят от величины I_d [21]. Сделать это тем более необходимо, поскольку со вступлением в силу ГОСТ 25100-2011 [8] показатель I_d оказался практически на обочине инженерно-изыскательского процесса.

Структура песка, как и любого другого грунта, есть система морфологических, геометрических и энергетических признаков [9]. Степень плотности I_d относится к показателям, характеризующим энергию структуры. Установление ее потенциала — важная проблема инженерно-геологических изысканий оснований, сложенных песками. При этом исследование изменения энергии структуры в направлении ее минимальных значений (в направлении ρ_d^{\max} и e^{\min}) — задача строго контролируемая в отличие от исследований в направлении максимальных значений энергии (в направлении ρ_d^{\min} и e^{\max}), потенциал которой уже частично реализован под воздействием природных факторов.

К настоящему времени отсутствуют унифицированные методы определения параметра ρ_d^{\min} , притом что наиболее рыхлый песок может быть получен только методом влажной отсыпки. Создание очень рыхлых структур влажного песка происходит благодаря возникновению капиллярного эффекта между частицами. Явление, представляющее собой увеличение объема влажного песка по отношению к объему сухого, Г.П. Чеботарев [32] называл разбуханием. По мнению Г.П. Чеботарева, в лабораторных условиях при создании наиболее рыхлой структуры песок должен быть совершенно сухим.

В противном случае необоснованно возрастает значение e^{\max} , а это, в свою очередь, в недопустимой степени увеличивает значение относительной плотности [32]. Главным аргументом в этом вопросе Г.П. Чеботарев считал невозможность разбухания песка в природных условиях, поскольку пески в естественном состоянии откладываются или из текущей воды, когда они полностью водонасыщенные, или под действием ветра, когда они абсолютно сухие.

Принимая во внимание мнение Г.П. Чеботарева, все же представляется, что среда образования природной структуры песка не имеет отношения к оценке его предельных состояний. Условия укладки песка в сухом состоянии или с использованием водной седиментации важны при физическом моделировании структуры образца, когда генезис и плотность отложений известны. Но при создании рыхлой структуры этими методами нельзя утверждать, что потенциальная энергия таких структур будет максимальной.

Образовываясь из флюидов или газа, осадок в процессе своего преобразования, начиная с установления контактов соударения между частицами, проходит различные стадии в направлении к своему устойчивому равновесному состоянию. Этот процесс сопровождается созданием организованных локально равновесных структур с минимумом энтропии внутри системы. Термин «локальное равновесие» у И. Пригожина [3, 19] означает принадлежность динамической системы к пространству неравновесных состояний, в котором локальная энтропия (в каждом малом элементе объема среды) является той же функцией локальных макроскопических переменных, что и для равновесной системы. Таким образом, теорема о минимуме производства энтропии выполняется только в окрестностях состояния равновесия — области линейных неравновесных явлений, для которой скорости необратимых процессов являются линейными функциями вызывающих их сил. На внешней границе такой области и следует определять предельные максимальные энергетические признаки структуры грунта. За ее пределами поведение динамической системы «может быть совершенно иным, более того, даже прямо противоположным тому, которое предсказывает теорема о минимуме производства энтропии» [3]. То есть за пределами области линей-

ных неравновесных явлений грунта как системы, морфологических, геометрических и энергетических признаков, не существует.

В связи с этим представляется, что подобрать лабораторный аналог структуры грунта, обладающей максимальной энергией сложения, используя различные методы укладки, — задача практически неосуществимая. Тогда как теоретический эквивалент такой структуры был исследован М.Н. Гольдштейном. Он основан на имеющемся сходстве между молекулярными и дисперсными системами: если для первых мерой свободной энергии и объема может служить температура, то для вторых такой мерой служит коэффициент пористости, в своем максимуме соответствующий температуре кипения молекулярных тел [4].

Определяя предельные значения коэффициентов пористости, М.Н. Гольдштейн ссылается на исследования Х. Винтеркорна, показавшего практическую неизменность относительных изменений объема вещества в зависимости от его критических температур. Рассматривая пористость песков в термодинамическом аспекте, М.Н. Гольдштейн приводит определения предельных состояний грунта, эквивалентных состояниям молекулярного вещества Винтеркорна, которые оно приобретает при температурах, равных абсолютному нулю, температурам плавления и кипения. Переходя от молекул вещества к частицам грунта и определяя коэффициенты его пористости, соответствующие таким предельным состояниям при различной укладке частиц, М.Н. Гольдштейн [4] приводит данные, которые после ряда преобразований можно представить следующим образом:

$$e^{\max} = 1,42 \cdot (1 + e^{\min}) - 1; \quad (3)$$

$$e' = 1,21 \cdot (1 + e^{\min}) - 1, \quad (4)$$

где e' — критический коэффициент пористости при нулевой нормальной нагрузке ($\sigma_n = 0$) или нулевых сжимающих напряжениях ($\sigma_3 = 0$).

Критический коэффициент пористости песка при $\sigma_n = \sigma_3 = 0$ соответствует, таким образом, песку со степенью плотности I_d , равной 0,5. Поскольку критическая пористость увеличивается с уменьшением сжимающих напряжений, при $I_d = 0,5$ критический коэффициент пористости песка является максимально возможным. Такое его мак-

симальное значение (e'_{\max}) с дальнейшим соотношением этого значения с минимальным предельным (остаточным) углом внутреннего трения (φ'_{\min}) следует принять за критерий разделения состояния песка на две основные группы — *рыхлое* ($e > e'_{\max}$; $\varphi < \varphi'_{\min}$ при $I_d < 0,5$) и *плотное* ($e < e'_{\max}$; $\varphi > \varphi'_{\min}$ при $I_d > 0,5$).

В статических условиях при наличии в основании сооружения песков с $I_d < 0,5$ следует говорить об имеющейся вероятности перехода системы «сооружение — основание» в неустойчивое состояние, в том числе для водонасыщенного грунта в недренированных условиях за счет приобретенного «течения» или «ограниченного течения» [2]. Такая вероятность при определенных воздействиях с учетом напряженного состояния [16] тем больше, чем ближе параметр I_d к своему минимальному значению в диапазоне от 0 до 0,5, тогда как при $I_d > 0,5$ песок практически всегда будет надежным основанием сооружения при статических нагрузках [30].

Классификация водонасыщенных песков по степени плотности при динамических воздействиях более сложна и разнообразна в части физической сущности протекающих в системе процессов. Е.А. Вознесенский [2], основываясь на результатах работ зарубежных исследователей, предлагает по форме реакции на динамические воздействия относить к рыхлым пески со степенью плотности до 0,45, а к плотным — имеющие I_d больше 0,60. Диапазоном значений I_d от 0,45 до 0,60, таким образом, характеризуются пески средней плотности [2].

Подобным образом можно разработать еще несколько классификационных рамок для различных значений параметра I_d . Однако представляется, что приведенное выше разделение песков по степени плотности относительно характеристик статической и динамической прочности является наиболее важным.

Далее с учетом выражения (3) представим формулу (1) в следующем виде:

$$e = M_e - I_d \cdot (M_e - e^{\min}), \quad (5)$$

где $M_e = (1,42 \cdot (1 + e^{\min}) - 1)$ — параметр, соответствующий значению коэффициента пористости песка с максимальной энергией структуры.

Коэффициент пористости песка в предельно плотном сложении e^{\min} в

этом случае рассчитывается по формуле:

$$e^{\min} = \frac{\rho_s - \rho_d^{\max}(M^W)}{\rho_d^{\max}(M^W)}, \quad (6)$$

где ρ_s — плотность частиц грунта; $\rho_d^{\max}(M^W)$ — максимальная плотность скелета грунта, полученная методом его укладки во влажном состоянии.

Рассмотрим параметр $\rho_d^{\max}(M^W)$ более подробно. В трехкомпонентной системе «влажность — плотность скелета грунта — работа уплотнения» величина этого параметра представляет собой предел функции $\rho_d(M^W) = f(A)$, где A — работа уплотнения. При фиксированном значении A систему можно рассматривать как двухкомпонентную и график зависимости $\rho_d(M^W) = f(W)$ приобретает эвтектическую форму с максимумом функции $\rho_d(M^W)$ при определенном значении аргумента (влажности). Это значение влажности принято называть оптимальным (W_{opt}). Величина $\rho_d^{\max}(M^{W_{\text{opt}}})$ является пределом функции $\rho_d(M^{W_{\text{opt}}}) = f(A)$, в связи с чем не существует возможности определить истинное значение $\rho_d^{\max}(M^{W_{\text{opt}}})$, поскольку геометрически любое значение $\rho_d(M^{W_{\text{opt}}})$ всегда будет оставаться меньше горизонтальной асимптоты $\rho_d(M^{W_{\text{opt}}}) = \rho_d^{\max}(M^{W_{\text{opt}}})$ графика функции $\rho_d(M^{W_{\text{opt}}}) = f(A)$. Поэтому основными становятся вопросы: что следует принимать за максимальную работу уплотнения и, в более широком смысле, какой методики следует придерживаться при определении $\rho_d^{\max}(M^W)$ для подстановки этого значения в формулу (6)?

К. Терцаги [28] и вслед за ним Г.П. Чеботарев [32] в качестве метода определения e^{\min} называют метод Проктора: минимальный коэффициент пористости должен отвечать структуре песка, находящегося в самом плотном состоянии, «какое только может быть получено лабораторным путем» [28]. Методика Р. Проктора предусматривает последовательное уплотнение в стандартном цилиндре трех слоев грунта грузом массой 2,5 кг, падающим 25 раз с высоты 30 см. Опыт проводится при разных значениях влажности. Методика Проктора для песков соответствует методу ГОСТ 22733 [7]. Если увеличить количество уплотняемых слоев в цилиндре до пяти, вес груза — до 4,5 кг, а высоту его падения — до 40 см, то максимальное значение плотности скелета грунта также увеличится. Указанные параметры применяются при

испытаниях грунта методом, разработанным Американской ассоциацией государственных автомобильных дорог и транспорта (AASHTO), который в ГОСТ 22733 [7] назван модифицированным методом Проктора. Значения максимальной плотности скелета песчаного грунта, полученные по методике AASHTO, следует принимать на 2% больше величины $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$, определенной по стандартной методике ГОСТ 22733 [7].

Дальнейшее изменение основных условий проведения опыта — увеличение веса груза, высоты его падения и количества уплотняемых слоев — приведет к росту величины $\rho_d^{\max}(M^W)$, но в какой-то момент такой рост станет не существенным и его дальнейшее уточнение потеряет смысл при определенных значениях коэффициента работы уплотнения k_A в формуле:

$$\rho_d^{\max}(M^W) = k_A \cdot \rho_d^{\max}(M^{Wopt}). \quad (7)$$

Определение величины коэффициента k_A , которую следует принимать при расчетах $\rho_d^{\max}(M^W)$ по формуле (7), требует дополнительного объема лабораторных исследований. На текущем этапе разработки этого вопроса было бы обоснованным установить его значение равным 1,035 (за счет перехода от стандартной методики испытаний к методу AASHTO и 1,5% предельной погрешности определения максимальной плотности, допускаемой ГОСТ 22733 [7] в параллельных опытах).

Принимая описанную выше методику оценки ρ_d^{\max} , далее необходимо определить, насколько она применима

в практике инженерных изысканий с учетом тех требований, которые предъявляются в первую очередь к обработке числовых данных.

ГОСТ 20522 [6] предписывает рассчитывать нормативные значения характеристик, определенных в результате различного рода испытаний, как среднестатистические (путем прямого осреднения их частных значений) или как отвечающие осреднению по частным значениям аппроксимирующих зависимостей функционально с ними связанных величин [6]. Нормативные значения характеристик грунтов, вычисляемые по формулам, устанавливаются на основании использования в этих формулах нормативных величин, полученных экспериментальным путем. Таким образом, для того чтобы в отношении какого-либо выделенного инженерно-геологического элемента (ИГЭ) определить нормативный минимальный коэффициент пористости e^{\min} по формуле (6), необходимо рассчитать нормативные величины плотности частиц грунта ρ_s и параметра $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$, используя частные значения этих характеристик, полученные прямыми лабораторными методами.

Поскольку метод стандартного уплотнения по причинам специальных требований к количеству опытных циклов и объему испытываемого грунта достаточно ограниченно используется в практике лабораторных работ при инженерно-геологических изысканиях и более востребован при анализе свойств строительных материалов, оптимизация определения нормативных значений $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$ видится в создании из нескольких частных проб, относящих-

ся к одному инженерно-геологическому слою, объединенной пробы песка для дальнейшей подготовки из нее нормативного образца методом квартования и испытания этого образца единичным циклом стандартного уплотнения.

В ходе изысканий песков, слагающих разрез косы Чайво (Северный Сахалин), были выполнены сравнения значений $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$, полученных в лаборатории двумя способами. В первом случае величина $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$ была определена статистическими методами по ГОСТ 20522 [6] на основе шести частных лабораторных измерений. Во втором случае значение $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$ было получено для нормативного образца, подготовленного методом квартования по ГОСТ 22733 [7] из объединенной пробы тех же шести образцов, которые использовались в первом случае. Разница между полученными величинами плотности влажного грунта не превысила допустимых погрешностей 0,03–0,04 г/см³ [10, 33], а для плотности скелета грунта $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$ она составила в абсолютном выражении 0,017 г/см³, что существенно меньше относительного расхождения 1,5%, допускаемого при оценке максимальной плотности скелета грунта между параллельными и повторными определениями [7].

Таким образом, еще до массового подтверждения производственных данных способ подготовки объединенной пробы в методе стандартного уплотнения может быть использован в практике изысканий для определения нормативных значений $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$.

Тем не менее даже в таком оптимизированном варианте применение метода стандартного уплотнения интуитивно представляется достаточно громоздкой процедурой, в первую очередь по причине относительно повышенного объема точечных проб песка, который необходим для создания корректной объединенной пробы. Кроме того, если песок содержит частицы, легко разрушаемые при уплотнении, проведение опытного цикла на одной объединенной пробе невозможно. При таких характеристиках песка необходимо иметь в распоряжении минимум 5 образцов [7]. Такой объем работ может быть обоснован при изысканиях в особо ответственной в геотехническом отношении обстановке. Для прочих условий при определении $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$ рациональнее задействовать результаты сопоставительных испытаний, принцип возможности использования которых заложен в ГОСТ 22733 [7].

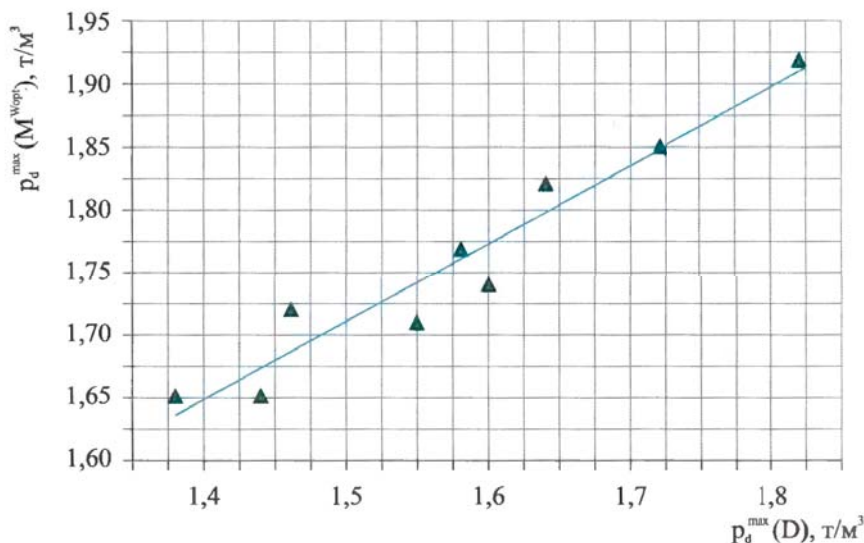


Рис. 1. Корреляционная зависимость между нормативными значениями $\rho_d^{\max}(D)$ и $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$, полученными соответственно по методикам РСН 51-84 [24] и ГОСТ 22733 [5] для четвертичных неоднородных песков водного генезиса Северо-Сахалинского региона

На рисунке 1 показана корреляционная зависимость между нормативным значением предельной максимальной плотности скелета песка выделенного инженерно-геологического элемента $\rho_d^{\max}(D)$, определенным по методике РСН 51-84 [24] для способа укладки в воздушно-сухом состоянии, и нормативной величиной $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$, полученной по методике ГОСТ 22733 [7]. Это соотношение описывается уравнением:

$$\rho_d^{\max}(M^{Wopt}) = B \cdot \rho_d^{\max}(D) + C, \quad (8)$$

где $B = 0,630$; $C = 0,766$ — коэффициенты.

Зависимость (8) имеет коэффициент корреляции $R = 0,96$ и получена для неоднородных четвертичных пылеватых, мелких, средней крупности и крупных песков морского, аллювиально-морского и лагунно-морского генезиса, слагающих разрезы периферийной части Северо-Сахалинской равнины. Для создания корреляционной модели использованы нормативные значения максимальных плотностей песков, выделенных в качестве ИГЭ в ходе реальных инженерно-геологических изысканий различных объектов строительства. Таким образом, модель построена на основании анализа 57 частных проб песка, что отражает достаточную для выполнения инженерных изысканий надежность полученных коэффициентов B и C . Последние подобраны таким образом, что значения $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$, рассчитанные по уравнению (8), отличаются от величин, полученных прямыми лабораторными методами, не более чем на 1,5% (величину, допускаемую ГОСТ 22733 [7]). Это, с учетом региональных аналогий, позволяет широко использовать зависимость (8) для оценки нормативных значений $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$ для неоднородных песков водного генезиса. Для анализа корреляционной зависимости между параметрами $\rho_d^{\max}(D)$ и $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$ однородных разностей экспериментальных данных недостаточно.

В отличие от сравнения максимальных плотностей, полученных различными методами укладки ($\rho_d^{\max}(D)$ и $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$), прямое сопоставление значений минимальной плотности скелета песка $\rho_d^{\min}(D)$, определенной по РСН 51-84 [24], и его максимальной плотности $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$, определенной по ГОСТ 22733 [7], представляется методологически не совсем корректным. Поскольку в данном конкретном слу-

чае отсутствуют достаточные теоретические основания, устанавливающие максимум косвенных связей для сравнения плотного состояния грунта с его рыхлым состоянием. Кроме того, исследования в области создания рыхлых структур песка вообще намного более сложны.

Еще в работе 1960 года, посвященной изучению относительной плотности песков, в том числе диапазону возможных колебаний плотности скелета этих грунтов в их предельных состояниях при использовании методов сухой укладки и осадения в воде, В.В. Радина [21] определила, что расхождения чаще наблюдаются именно между результатами, полученными для песков предельно рыхлого сложения. Для однородных окатанных песков результаты, полученные при использовании различных способов и приемов укладки, имели хорошую сходимость. Но если песок был неоднороден, а тем более если состоял из фракций, сильно различавшихся по крупности, то его предельно рыхлое сложение достигалось только в воздушно-сухом состоянии при отсыпке в виде непрерывно нарастающего конуса, когда зерна, без удара высыпаясь на вершину конуса, скатывались по его образующей под действием своего веса [21]. Только при таком способе отсыпки, по глубокому убеждению В.В. Радиной, частицы песка находятся в неустойчивом положении — на грани предельного равновесия, а коэффициент пористости приобретает максимальное значение. Именно эти значения, соответствующие, по мнению В.В. Радиной, степени плотности песка I_d , равной нулю, должны прини-

маться за критический коэффициент пористости при нулевой нормальной нагрузке ($\sigma_n = 0$) [20].

Такая точка зрения, несомненно, заслуживает отдельного анализа в части ее сопоставления с результатами теоретических исследований М.Н. Гольдштейна [4]. На основании этих исследований критический коэффициент пористости песка при $\sigma_n = 0$ был определен формулой (4) только как отвечающий степени плотности $I_d = 0,5$. Если с некоторой долей допущения принять значение $e^{\max}(D)$, полученное по методике РСН 51-84 [24], соответствующим минимальной плотности скелета грунта, свободно отсыпанного в сухом состоянии, и сравнить его с максимальным критическим коэффициентом пористости e'_{\max} песков, определенным по формуле (4), то можно сделать вывод, что только для грубодисперсных разностей значения $e^{\max}(D)$ и e'_{\max} могут быть хоть как-то сопоставимы (рис. 2). С уменьшением $\rho_d^{\min}(D)$ и дисперсности материала значение $e^{\max}(D)$ стремится к абсолютному максимуму пористости, определяемому выражением (3). Повсеместное использование для установления максимального коэффициента пористости метода сухой отсыпки приводит к существенному занижению величины e^{\max} и уменьшению значений относительной плотности, по крайней мере, для неоднородных песков средней крупности, крупных и гравелистых.

Лабораторные опыты показали, что между величинами параметров ($e^{\max}(D) — e'_{\max}$) и $\rho_d^{\min}(D)$ имеется обратная (отрицательная) корреляция (см. рис. 2).

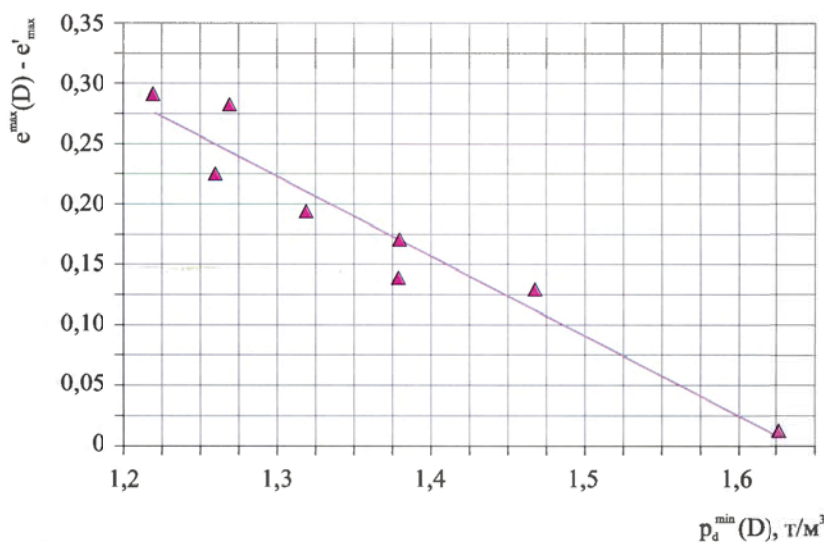


Рис. 2. Корреляционная зависимость между нормативными величинами параметров $\rho_d^{\min}(D)$ и $(e^{\max}(D) — e'^{\max})$ для четвертичных неоднородных песков водного генезиса Северо-Сахалинского региона

Комбинируя полученную и представленную на рис. 2 линейную зависимость с формулами (4), (7) и стандартным соотношением (А.5) из ГОСТ 25100-2011 [8] между коэффициентом пористости, плотностью частиц и плотностью скелета грунта, можно получить следующую формулу для определения нормативного значения $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$:

$$\rho_d^{\max}(M^{Wopt}) = \frac{\rho_s \cdot 1,21 \cdot \rho_d^{\min}(D)}{k_A \cdot [\rho_s - B \cdot \rho_d^{\min}(D) - C \cdot \rho_d^{\min}(D)]}, \quad (9)$$

где B, C — корреляционные коэффициенты, $B = -0,656, C = 1,08; k_A$ — коэффициент работы уплотнения, $k_A = 1,035; \rho_s$ — нормативное значение плотности частиц грунта выделенного ИГЭ; $\rho_d^{\min}(D)$ — нормативное значение предельной минимальной плотности скелета грунта выделенного ИГЭ, определенное по методике РСН 51-84 [24] для способа укладки в воздушно-сухом состоянии.

Зависимость (9) получена для тех же песков, что и уравнение (8). Идентичность формул (8) и (9) по точности и надежности достигнута путем соответствующего подбора коэффициентов B и C и «масштабирования» зависимости между параметрами ($e^{\max}(D) - e'_{\max}$) и $\rho_d^{\min}(D)$ до достижения значения коэффициента корреляции $R = -0,96$ путем поэтапного исключения из аналитической модели данных по той или иной нормативной пробе. Такой подход хоть и повышает текущую погрешность определений величины $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$, но в перспективе при использовании уравнения (9) снижает как внутри-, так и межлабораторную ошибку [11]. Кроме того, он позволяет корректно оценивать нормативное значение величины $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$ как среднее между результатами расчетов, полученными по формулам (8) и (9).

Итак, величина e^{\min} , входящая в выражение (6), может быть определена двумя способами. Первый — через экспериментальные значения оптимальной плотности по ГОСТ 22733 [7] с использованием метода объединенной нормативной пробы. Второй — по формулам (8) и (9) через максимальную и минимальную плотность скелета образца песка, полученного способом сухой отсыпки по методике РСН 54-81 [24]. Наиболее универсальным является первый способ определения e^{\min} , поскольку он применим для всех разно-

видностей песка. Зависимости (8) и (9) для возможности их использования без ограничений не только для региональных аналогов, но и на территориальном уровне требуют дополнительного экспериментального наполнения по результатам изучения различных пространственно-генетических типов песков, их разновидностей по гранулометрическому и минералогическому составу, степени окатанности, форме зерен, показателям однородности. Это позволит на практике повсеместно избежать применения метода стандартного уплотнения и повысит достоверность сопоставления предельных плотностей, полученных при различных способах укладки для расчетов предельных минимальных коэффициентов пористости. Определив их, останется найти последнюю неизвестную величину из формулы (5), необходимую для оценки коэффициента пористости песка в естественном залегании. Это степень плотности I_d .

Предложено множество зависимостей степени плотности песков I_d от удельного сопротивления грунта под конусом статического зонда q_c . Разработанные в основном зарубежными авторами соотношения между I_d и q_c , тем не менее, не в состоянии учесть и описать множество природных и методических факторов, влияющих на их значения. Это не означает, что статус статического зондирования как метода изучения плотности песков следует понизить до приближенного. В работе [29] Ю.Г. Трофименков справедливо замечает, что такая «приближенность» относится не только к статическому зондированию, но и к любым другим, в том числе и лабораторным, методам. Поэтому, применяя для оценки плотности песков статическое зондирование, как и в любом другом случае, важно оценить влияние на полученные количественные характеристики условий проведения опыта и специфических свойств дисперсного материала [29].

Достаточно полные обзоры, посвященные количественной оценке степени плотности песков методом статического зондирования, анализу влияния на результаты экспериментов тех или иных методических и природных факторов, приводятся в работах [23, 29]. Там же представлены эмпирические уравнения и таблицы, применяемые при определении параметра I_d . Из всего их перечня для решения большого круга практических задач целесообразно воспользоваться наиболее простой и надежной зависимостью, рекомендо-

ванной рядом отечественных и зарубежных исследователей [12, 13, 23]:

$$I_d = a + b \cdot \lg \left(\frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_{vo}}} \right), \quad (10)$$

где a, b — коэффициенты уравнения, $a = -98, b = 66; I_d(\%), q_c(\text{т/м}^2), \sigma'_{vo}(\text{т/м}^2)$ — соответственно степень плотности, удельное сопротивление грунта под конусом зонда и эффективное вертикальное напряжение на рассматриваемой глубине Z (м).

Зависимость (10) была получена в 1983 году Р. Ланцелоттой для нормально уплотненных песков на основании обработки результатов 144 экспериментов, выполненных разными исследователями на песках различных видов. Впервые она была широко представлена в совместной статье этого автора с М. Ямиолковским и другими в 1985 году [33].

Достоверность расчетов по формуле (10), имеющей коэффициент корреляции $R = 0,96$, достаточно высока. Тем не менее в более поздних работах Р. Ланцелотты предложены другие, хотя и весьма близкие, значения коэффициентов a и b . К. Ишихара [13], ссылаясь на экспериментальные источники, также указывает на иные постоянные параметры уравнения, но уже существенно отличающиеся от оригинальных значений. Собственная практика применения выражения (10) показала хорошую сходимость между результатами оценки пористости песков, полученными расчетом с применением приведенных выше коэффициентов, и результатами опытов на образцах, отобранных из скважины грунтоносом. Поэтому альтернативные значения параметров a и b в настоящей статье не рассматриваются. Более актуальной задачей является корректная оценка эффективного вертикального напряжения σ'_{vo} .

В работе [33] необходимость оценки σ'_{vo} для анализа различных характеристик грунтов отмечена особо. Тем не менее вклад этого параметра в определение I_d незначителен по сравнению с вкладом других составляющих рассматриваемой зависимости. Кроме того, корректная оценка величины σ'_{vo} представляет собой относительно сложную техническую задачу для большинства изыскательских организаций, функционирующих на территории РФ и СНГ и не имеющих дорогостоящего СРТ-оборудования, необходимых датчиков и программных про-

дуктов. Поэтому формулу Р. Ланселотты (10) без какого-либо практического ущерба можно представить в следующем виде:

$$I_d = a + b \cdot \lg \left(\frac{q_c}{\left(a_r \cdot \sum_{i=1}^{i=n} r_i \cdot h_i \right)^{0.5}} \right), \quad (11)$$

где a_r — коэффициент размерности, равный 1 т/м^3 ; r_i — безразмерный параметр, зависящий от разновидности грунта i -го слоя и положения i -го слоя относительно уровня подземных вод; h_i — мощность i -го слоя (м), n — количество расчетных слоев в интервале глубин 0-Z м.

Неизвестным в формуле (11) является параметр r_i . Для песков, плотность сложения которых определена, например, по рекомендациям СП 47.13330.2012 [27], значение r_i (см. таблицу) может быть получено при фиксированных средних значениях степени водонасыщения на основании общих результатов работы С.И. Синельщикова [25] и данных таблицы Б.2.5 из ГОСТ 25100-2011 [8].

Для глинистых прослоев в толще песчаных отложений, параметр r_i грунтов, залегающих выше уровня грунтовых вод, определяется по зависимости:

$$r_i = \frac{\rho}{a_r}; \quad (12)$$

где ρ — природная плотность глинистого грунта.

Для полностью насыщенных глинистых разностей, способных к гидростатическому взвешиванию, залегающих ниже пьезометрического уровня и испытывающих гидродинамическое давление нижележащих обводненных прослоев, значение параметра r_i рассчитывается по формуле:

$$r_i = \frac{\rho_s - 1}{a_r \cdot (1 + e)}. \quad (13)$$

Частные значения степени плотности I_d с использованием полученных по таблице и формулам (12), (13) значений параметра r_i рассчитываются по уравнению (11) в два этапа. На первом расчет ведется на основании значений q_c , определенных непосредственно по результатам статического зондирования. Второй этап предусматривает учет изменений условий проведения опыта по сравнению с условиями калибровочной камеры, для кото-

Значения параметра r_i из формулы (11) для песков с учетом их положения относительно уровня грунтовых вод (УГВ)

Вид песка по плотности сложения	Виды песков по гранулометрическому составу			
	гравелистые, крупные, средней крупности		мелкие, пылеватые	
	ниже УГВ	выше УГВ	ниже УГВ	выше УГВ
Плотный	1,13	1,89	1,09	1,84
Средней плотности	1,02	1,75	0,99	1,71
Рыхлый	0,96	1,68	0,89	1,59

рых получена зависимость (10). Для такого учета сначала определяется коэффициент K_I [33]:

$$K_I = 1 + \frac{0,2 \cdot (I_{d,0} - 30)}{60}, \quad (14)$$

где $I_{d,0}$ — первичное частное значение степени плотности песка на рассматриваемой глубине Z, рассчитанное по формуле (11), %.

Затем исходная величина удельного сопротивления грунта под конусом статического зонда q_c уменьшается в K_I раз ($q_c' = q_c / K_I$). Полученное в результате такого пересчета значение q_c' используется для повторного расчета степени плотности по формуле (11). Определенные таким образом частные значения I_d на глубине Z используются при расчете нормативных значений этой характеристики, которые затем подставляется в формулу (5) в долях единицы для оценки нормативного значения коэффициента пористости песка выделенного инженерно-геологического слоя.

Расчеты степени плотности по формулам (11, 14) и представленная методика оценки коэффициента пористости песков в целом были опробованы при изысканиях сооружений различного уровня ответственности на объектах компаний «Роснефть», «Шлюмберже-Восток», «Эксон Нефтегаз Лимитед».

В ходе практического применения данной методики в различных геоморфологических районах Северного Сахалина с глубины 1,8–8,6 м с особой тщательностью были отобраны 32 пробы залегающих выше уровня грунтовых вод песков ненарушенной структуры с целью дальнейшего сравнения их коэффициентов пористости, полученных расчетным и опытным путем. В качестве первичных инструментов отбора использовались грунтоносы различных типов. Каждый опытный образец отбирался методом режущего кольца по ГОСТ 5180 [9] из центральной части основной пробы после

ее извлечения. Опытные образцы песка имели следующие физические показатели: плотность частиц грунта $\rho_s = 2,61 \div 2,66 \text{ г/см}^3$; плотность грунта $\rho = 1,40 \div 1,94 \text{ г/см}^3$; влажность $W = 1,9 \div 13,9\%$.

Для разработки количественных критериев сравнения использовались значения допустимой относительной погрешности параллельных определений основных физических характеристик, использовавшихся при расчете коэффициента пористости [10]. Максимальная допустимая разница между результатами параллельных определений коэффициентов пористости (Δe), рассчитанная для каждой пробы, составила 0,05–0,11. Параметр $\rho_d^{\max}(M^{Wopt})$ определялся как по ГОСТ 22733 [7], так и с использованием зависимостей (8) и (9).

В результате для 28 точек из 32 разница между коэффициентами пористости, определенными расчетным и опытным путем, не превысила допустимую величину, притом что эти определения лишь весьма условно можно было назвать параллельными. В силу объективных причин, связанных с пространственным фактором получения данных [5, 28], сравнению должны подвергаться не пары значений, а статистические характеристики сравнимых выборок, в частности, если речь идет об изысканиях, их нормативные показатели в рамках выделенных инженерно-геологических элементов. Разница между такими показателями при всех возможных расчетах в абсолютном выражении оказалась меньше нормативных допустимых значений.

Таким образом, результаты определения коэффициента пористости песков по представленной методике и по ГОСТ 5180 [10] дали хорошую сходимость, показав возможность использования этой методики при инженерных изысканиях объектов различного уровня ответственности и, соответственно, целесообразность ее дальнейшего развития.

Список литературы

1. *Архангельский И.В.* Пути повышения качества исследований деформационных свойств грунтов // Инженерная геология. 2008. № 2. С. 58–64.
2. *Вознесенский Е.А.* Поведение грунтов при динамических нагрузках. М.: МГУ, 1997. 288 с.
3. *Гленсдорф П., Пригожин И.* Термодинамическая теория структуры, устойчивости, флуктуаций. М.: Мир, 1973. 280 с.
4. *Гольдштейн М.Н.* Механические свойства грунтов (основные компоненты грунта и их взаимодействие). М.: Стройиздат, 1973. 375 с.
5. ГОСТ 19912-2012. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием. М.: Стандартинформ, 2013.
6. ГОСТ 20522-2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. М.: Стандартинформ, 2013.
7. ГОСТ 22733-2002. Грунты. Методы лабораторного определения максимальной плотности. М.: МНТКС, 2002.
8. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2013.
9. ГОСТ 25100-95. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 1995.
10. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартинформ, 2005.
11. *Дмитриев В.В., Ярз Л.А.* Методы и качество лабораторного изучения грунтов. М.: КДУ, 2008. 542 с.
12. *Зиангиров Р.С., Каширский В.И.* Статическое зондирование в инженерно-геологических изысканиях // Инженерная геология. 2006. № 3. 2006. С. 13-20.
13. *Ишихара К.* Поведение грунтов при землетрясениях. СПб.: НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2006. 384 с.
14. *Козаков Ю.Н., Буланкин Н.Ф., Шишканов Г.Ф., Король В.А.* Особенности применения свай в Восточной Сибири. Красноярск: Стройиздат, 1992. 268 с.
15. *Кошелев А.Г., Зиангиров Р.С.* Плотность песков в естественном залегании // Инженерная геология и охрана геологической среды. Современное состояние и перспективы развития: Сергеевские чтения. Выпуск 6. М.: ГЕОС, 2004. С. 61-65.
16. *Кулинаруева Е.С.* Устойчивость водонасыщенных песков при динамическом воздействии: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 2008.
17. *Мариупольский Л.Г.* Исследования грунтов для проектирования и строительства свайных фундаментов. М.: Стройиздат, 1989. 199 с.
18. НИТУ 127-55. Нормы и технические условия проектирования естественных оснований зданий и промышленных сооружений. М.: Гос. изд-во по строительству и архитектуре, 1955.
19. *Пригожин И.* От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках. М.: Наука, 1985. 327 с.
20. *Радина В.В.* Критическая пористость песка и методы ее определения на сдвижных приборах // Вопросы геотехники. 1953. № 1. С. 59-79.
21. *Радина В.В.* Об относительной плотности песков // Труды Гидропроекта. 1960. № 3. С. 163–170.
22. РД-91.020.00-КТН-173-10. Инженерные изыскания для строительства магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. М.: ОАО «АК «Транснефть»», 2009.
23. *Рожков И.Б., Исаев О.Н.* Статическое зондирование грунтов. М.: АСВ, 2010. 496 с.
24. РСН 51-84. Производство лабораторных исследований физико-механических свойств грунтов. М.: Госстрой РСФСР, 1984.
25. *Синельников С.И.* О предельных плотностях песчаных грунтов // Отчетное совещание по научно-исследовательским работам 1954 г. М.: НИИОСП, 1956. С. 159-161.
26. СП 11-114-2004. Инженерные изыскания на континентальном шельфе. М.: Госстрой России, 2004.
27. СП 47.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 11-02-96). Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. М.: Госстрой России, 2013.
28. *Терцаги К., Пек Р.* Механика грунтов в инженерной практике. М.: Гос. изд-во по строительству, архитектуре и строительным материалам. 1958. 608 с.
29. *Трофименков Ю.Г., Воробков Л.Н.* Полевые методы исследования строительных свойств грунтов. М.: Стройиздат, 1981. 215 с.
30. *Фадеев П.И.* Пески СССР. Часть I. М.: Изд-во МГУ, 1951. 290 с.
31. *Чановский Е.Г.* Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. М.: Недра, 1966. 303 с.
32. *Чеботарев Г.П.* Механика грунтов, основания и земляные сооружения. М.: ЛИБРОКОМ, 2009. 616 с.
33. *Jamiolkowski M., Ladd C.C., Germaine J.T., Lancellotta R.* New developments in field and laboratory testing of soils // Proceedings of the 11-th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1985, San Francisco. Rotterdam: Balkema, 1985. V. 1. P. 57–153.
34. *Youd T.L., Idriss I.M., Andrus R.D. et al.* Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE, 2001. V. 127. № 10. P. 817–833.