

К. Терцаги

**Строительная механика грунта на основе
его физических свойств**

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 55
ББК 26.3
К11

К11 **К. Терцаги**
Строительная механика грунта на основе его физических свойств / К. Терцаги – М.: Книга по Требованию, 2024. – 392 с.

ISBN 978-5-458-53991-3

ISBN 978-5-458-53991-3

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ния. Этим фактом для строительной механики грунта открывается громадная область применения.

Книга предназначается прежде всего для практически работающих инженеров и студентов высших технических школ. Но она имеет в виду также и научных консультантов инженерно-подземного строительства, геологов, так как содержание книги образует связующее звено между геологией и технической практикой. Книга достигнет своей цели лишь в том случае, если ее действие отразится на качестве технических изысканий в подземном строительстве и отчетов о них. Автор просит своих товарищей, работающих на практике, помочь ему в дальнейшем построении этой отрасли знания соответственными сообщениями из области своей деятельности.

Автор

Константинополь

12 апреля 1924 г.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи строительной механики грунта (Erdbaumechanik) состоят в предсказании действия данной системы сил на грунт и в определении давления, производимого грунтом на подпертые сооружения. Сведения о видах грунта, с которыми должен считаться инженер земляных работ, даются технической геологией. Строительную механику грунта и техническую геологию следует считать вспомогательными по отношению к строительному искусству. Обе науки служат инженеру неудовлетворительно и, как известно, изменяют именно там, где их помощь особенно нужна. Вследствие этого суждение в деле грунтового строительства опирается главным образом на техническое чутье, вышколенное практическим опытом.

Опытный инженер не усомнится в важности роли, которую играет в строительной практике техническое чутье. Но порождаемой техническим чутьем интуиции нельзя требовать от всех.

Правильность суждений может быть проверена только опытом. Техническая интуиция может в некоторых случаях изменить и изменяет часто. В лучшем случае опыт дает углубление технического чутья тем, кто этот опыт приобретает, и техник по земляным сооружениям в настоящее время едва ли лучше вооружен в области возведения таких сооружений, чем строитель мостов того времени, когда техническая механика как наука еще не существовала. Наши проекты частью рискованы, частью дают чрезмерную прочность, и прогресс идет медленно, потому что преобладающее большинство случаев практического опыта не ведет к обобщающим положениям.¹

При этих обстоятельствах чувствуется необходимость научных опытов, которые вскрыли бы недостатки во вспомогательных науках грунтового строительства и указали бы средства преодоления этих недостатков. Недостатки состоят прежде всего в отсутствии связи между геологией и строительной механикой грунта и в догматическом характере предпосылок, на которых покоится классическая строительная механика грунта.

а) Отсутствие связующего звена между геологией и строительной механикой грунта. Порядок сложения и мощность слоев грунта могут быть установлены инженерами-геологами безупречно на основании естественных или искусственных обнажений. Однако при попытке недвусмысленно обозначить имеющиеся виды грунта наталкиваемся на затруднения.

Положим, что мы берем пробу из основания строения. Состоит ли эта проба из грунтов выветривания или глинистого осадения, из тонкого песка или ила, необходимо данный вид грунта отнести к определенному классу, принятому в геологии или земляном деле. Эти классы основаны на всех возможных признаках отличия, только не на тех, которые важны

¹ Terzaghi, Die Unzulänglichkeit veröffentlichter Baubeschreibungen, Z. d. Öst. L.-u. A.-V., 1917.

строителю в первую очередь, не на фактических. Каждый класс охватывает виды грунта с весьма различными физическими свойствами, потому что один и тот же вид грунта может показать весьма различные свойства в зависимости от плотности набивки и влажности, содержания извести или гумуса (см. отд. 7). Поэтому даваемое инженерами-геологами при современном состоянии науки описание имеющегося в основании строений грунта не гарантирует нас от смешения двух видов грунта, существенно различных по своему техническому характеру.

б) Основные предпосылки классической теории давления грунта. Теория давления грунта порождена практической потребностью иметь исходные положения при определении размеров подпорных стенок. Развитие этой ветви механики относится ко второй половине XVIII и первой половине XIX вв., т. е. к тому времени, когда техническая механика произвела переворот в области строительного дела. Так же как и в теории сопротивления материалов, в теории давления грунта исходили из некоторых предпосылок, упрощающих расчет. Этими предпосылками были следующие: нарушение равновесия в грунте тождественно со сдвигом грунта по плоскости скольжения и сопротивление грунта сдвигу для каждого вида грунта точно определяется коэффициентом внутреннего трения и давлением, производимым на плоскость скольжения. Позже сюда прибавилось допущение, что коэффициент внутреннего трения выражается тангенсом угла естественного откоса. На основе этих предпосылок проблемы давления грунта разрабатывались как статически определимые задачи и ставились в связь либо с деформациями грунта, либо с деформациями частей сооружения, испытывающих напряжение благодаря давлению грунта. Однако имеется множество явлений давления грунта, при которых плоскостей скольжения не образуется. Опыты показывают, что коэффициент внутреннего трения, который определяет в этих случаях пределы равновесия, не идентичен с вышеуказанным коэффициентом трения по плоскости. Далее выяснено, что коэффициенты трения в песках зависят от плотности набивки, а в суглинках и глинах — от содержания воды и от предыдущей истории загрузки. Если влажность суглинка или глины изменится под влиянием добавочного давления, то коэффициент внутреннего трения либо остается неизменным, либо уменьшается в зависимости от скорости, с которой накладывается добавочная нагрузка. В силу этих важных фактов, не предусмотренных классической теорией давления грунта, эта теория отказывается служить при разработке большинства задач, встречающихся в грунтовом строительстве. Поэтому, чтобы подготовить решение этих задач, необходимо прежде всего отказаться от вышеупомянутых основных предпосылок классической теории давления грунта и опереться на физические свойства грунта в большей мере, чем это было до сих пор. Создается необходимость построения строительной механики грунта на основе физики грунта.

Некоторые из технически важных свойств грунтов уже исследованы представителями почвоведения, прежде чем еще сумели оценить значение этих свойств для механики грунта. Стремясь классифицировать почвы в агрикультурных целях, изучили связь между величиной и формой почвенных зерен, с одной стороны, и пластичностью и прочностью почв — с другой, а также влияние, которое производят на эти свойства растворенные соли и некоторые почвенные кислоты. Особенного внимания заслуживают работы Аттерберга (Atterberg), который предложил метод для установления пределов консистенции вяжких грунтов и определил те составные части, которым обязаны суглинки и глины своей пластичностью и вязкостью.

с) Исследования Американской комиссии по основаниям. Первый активный почин планомерного изучения физических свойств грунта в целях техники земляных работ сделан Американским обществом гражданских

инженеров в 1913 г. Это общество образовало комиссию „для кодификации употребительных допустимых нагрузок на основания сооружений и для изучения технически важных физических свойств грунта“ (ниже эта комиссия именуется кратко „Американская комиссия оснований“). Комиссия начала свою деятельность с рассылки анкеты членам общества и надеялась этим путем получить ценные сведения о провалах фундаментов и их причинах.

Анкета заключала 59 вопросов, касающихся способов и результатов пробных нагрузок, топографии и геологии места постройки, результатов разведочного бурения, свойств вида грунта, деталей основания, наблюдаемых осадок и допустимых нагрузок грунта в районе постройки. В течение 9 лет удовлетворительных ответов не поступило, и анкета кончилась неудачей.

Сообщение о работе комиссии 1915 и 1916 гг. содержит описание аппаратов и порядка испытаний, сообщение о попытке классифицировать виды грунта только по крупности зерен и данные о сжимаемости нормального песка. В 1917 г. появились библиографические литературные данные по содержащимся в библиотеке Карнеджи (Питтсбург, Пенсильвания) книгам и журнальным статьям о пробных нагрузках, провалах оснований, рамных основаниях и т. д., а также сообщение о результатах опытов по трению, которые были поставлены с сухим и мокрым песком при различных давлениях. Эти и большое число последующих опытов были проведены Вашингтонским бюро стандартизации. В 1920 г. комиссия опубликовала проект нормального аппарата для пробного нагружения и результаты работы по вопросу о распределении давления в песчаных насыпях, нагруженных в отдельных точках. Последние совпадают с выводами, полученными Штрошнейдером (Strocschneider) в 1912 г. Сообщение 1922 г. содержит краткое описание физических свойств коллоидов грунтов и диаграмму: напряжение-расширение для кубиков глины, которые были вырезаны из растительного грунта. Об опытах комиссии на моделях для изучения трения свай и сопротивления погружению свай еще ничего не напечатано.

д) Исследования автора. В 1917 г. автор начал изучение технически важных свойств грунтов. Первая работа состояла в теоретическом исследовании внутреннего трения в насыпи из шаров и в опытах по изучению давления грунта на поддающиеся сдвигу подпорные стенки. Определено опытом и боковое давление песка на неподатливые стенки. Оказалось, что следует различать два вида внутреннего трения: сопротивление трения против относительного движения по поверхности и сопротивление трения сдвигу зерен в пространстве. Ни один из этих двух коэффициентов трения не идентичен с тангенсом угла естественного откоса, так как оба зависят от плотности сложения песка. Сверх того найдено, что величина бокового давления на поддающуюся сдвигу подпорную стенку по мере смещения уменьшается; следовательно подпорная стенка вместе с засыпкой за нею представляет статически неопределимую систему.

Затем последовали теоретические исследования распределения напряжений в пластичных и зернистых массах, нагруженных в отдельных точках. В таких массах образуются зоны, в которых сопротивление материала используется гораздо совершеннее, чем это происходит в телах, которые следуют закону Гука. Эти зоны названы „несущими телами“ (Tragkörper).

Изучение статического действия текущей грунтовой воды на фильтруемые слои песка в связи с теорией Forchheimer'a о движении грунтовых вод по семейству изотермических кривых привело к различению обрушений грунта у подпорных сооружений в одних случаях вследствие эрозии, в других случаях вследствие давления грунта. Вычисление сил давления грунта, вызванных текучими грунтовыми водами в основании

подпорных сооружений, дало основу для конструктивных мероприятий, предотвращающих обрушение грунта.

Переходом от изучения песка к изучению глины послужили исследования причины того факта, что вода в песке при нормальных условиях действует как противосмазка, в глине же, наоборот, всегда как смазка. Эти исследования привели к понятию нулевого или начального трения, которое имеет определенное значение для каждой пары соприкасающихся поверхностей внутри осадка, находящегося под водой. В крупном зернистом осадке (песок) вследствие малого числа точек соприкосновения на единицу объема оно исчезающе мало. В Мо и иле (Silt) оно при процессе осаднения ведет к неустойчивому состоянию слоения ячеистой структуры, чем создает причины явления плывуна. В суглинке и глине оно вызывает истинное сцепление. Это истинное сцепление оказывается однако незначительным в сравнении со сцеплением встречающихся в природе пластичных или жестких масс. Спрашивалось, каким силам обязаны эти массы их сцеплением. Вычисления позволили предположить, что это кажущееся сцепление можно объяснить действием капиллярных сил заключенной в грунте воды, и опыт подтвердил правильность предположения. Когда силы, связывающие частицы глинистых масс, их природа и величина стали известны, явилась возможность изучения связи между влажностью, напряжением и расширением. Исследования показали, что свойства прочности грунтов (песков, суглинков, глин) совпадают со свойствами прочности твердых, зернистых, не подчиняющихся закону Гука тел. Сходство распространяется даже на гистерезис и упругие последствия. Числовые характеристики свойств прочности глины оказались средством оценки опасности оползания материала.

Проницаемость глины может определяться прямыми и косвенными методами. Зависимость между коэффициентом фильтрации и влажностью глины привела к открытию, что вязкость воды в очень узких капиллярах очень быстро увеличивается при уменьшении диаметра капилляра. Из этого факта выведено физическое определение понятия предела пластичности. Результаты более широких наблюдений можно объяснить при допущении, что увеличение вязкости воды в очень узких капиллярах связано с увеличением поверхностного натяжения и уменьшением скорости испарения.

Замедления, которые испытывают в глине вызванные внешними силами напряжения в силу сопротивления против отдачи выдавливаемой воды в порах, обозначены как явления гидродинамических напряжений. При математической формулировке относящихся сюда задач оказалось, что течение во времени явлений гидродинамических напряжений выражается основными уравнениями теории линейных нестационарных тепловых токов. Для решения более трудных задач этого вида был выработан приближенный метод.

е) Методы исследований в строительной механике грунта. Благодаря вышеупомянутым исследованиям Американской комиссии оснований и автора были созданы основы более отвечающей целям практики научной разработки проблем строительной механики грунта. Десять лет в истории развития новой отрасли науки — короткий срок, и некоторые взгляды, изложенные в предлагаемой книге, с развитием знания окажутся нуждающимися в поправках. Но можно уже теперь предсказать будущее развитие строительной механики грунта в главных чертах.

Математическая трактовка большинства проблем земляных работ натолкнется на чрезвычайные затруднения даже в том случае, когда серия грунтов подчиняется закону Гука. Но, как будет указано в этом труде, свойства прочности грунтов так сильно уклоняются от закона Гука, что о строго математической трактовке этих проблем нельзя думать, и строительная механика грунта поневоле должна принять характер опи-

сательной науки. Это однако не умаляет ее значения. Знание физических свойств грунта дает нам возможность устанавливать причинную связь между физическими причинами и техническим действием в грунтовом строительстве (оползание, осадка, провал основания и т. д.) и тогда, когда мы не в состоянии представить эту связь полностью в математической форме. Подобным образом поступают в геологии, физиологии и других неточных естественных науках.

Поэтому разработка опытного материала в области техники грунтового строительства должна производиться так, чтобы в каждом достойном внимания отдельном случае численно устанавливались определяющие физические свойства вида грунта и как можно подробнее описывались наблюдения над техническим действием этих свойств. Теория и опыты с моделями должны давать только ключ к пониманию причинных зависимостей. Эта отрасль знания в процессе развития составляет из систематически изложенного описания отдельных случаев, которые в своей совокупности дадут картину зависимости между физическими свойствами видов грунта и их поведением в деле грунтового строительства. При проектировании и расчете важных в технике грунтового строительства сооружений надо прежде всего установить в лаборатории физические свойства подлежащих сортов грунта и затем, по аналогии с сделанными и научно обработанными опытами с видами грунта подобных же свойств, заключать о действии намеченных сооружений.

Поэтому первая задача развития строительной механики грунта состоит в том, чтобы найти лабораторные методы для исследования проб строительного грунта и наиболее рациональные формулы для выражения в числовых значениях физических свойств. Вторая задача обнимает планомерную обработку сделанных на месте построек изысканий наблюдением в поле и испытанием грунта в лаборатории. К выработке методов эксперимента должны приступить и лаборатории высших школ и лаборатории государственные, как это уже произошло в САСШ (Бюро стандартизации в Вашингтоне и лаборатории грунтового строительства в крупнейших высших школах). Обработка опыта техники грунтового строительства требует сотрудничества инженеров, производящих постройки, с инженерно-геологическими отделами геологических учреждений страны.

Тенденция к созданию инженерно-геологических отделов уже имеется в геологических институтах многих культурных государств: Бельгийское геологическое управление уже в 1896 г. открыло отделение инженерной геологии при *Administration des mines*.

Этот отдел владеет собственным буровым инвентарем и занимается технически-геологическими изысканиями для важных государственных и частных подземных и водоснабжающих сооружений. Хотя институт со стороны частной индустрии глубокого бурения часто встречался как нежелательный конкурент, он сослужил полезную службу. Италия имеет подобный сектор в экспериментальном институте итальянских дорог. В САСШ Строительное управление государственных оросительных предприятий подчинено общегосударственному геологическому комитету. В Германии 25 лет назад строительным конторам важных земляных и водных строений циркуляром правительства было приказано в случае важных работ по раскрытию месторождений и выемок приглашать геологические учреждения. В Австрии производителями работ важнейших тоннельных сооружений назначаются специалисты-геологи государственного геологического учреждения. Вследствие уже отмеченного отсутствия связи между технической геологией и строительной механикой грунта выводы большинства поставленных до сих пор перечисленными институтами технических геологических наблюдений не введены в систему строительной механики грунта. Физические константы видов грунта, на которых поставлены наблюдения, не изучаются и недостающие данные лишь в не-

многих случаях могут быть получены дополнительно. Поэтому собранный до сих пор материал с точки зрения техники земляных работ имеет ничтожное значение, несмотря на время и старание, которые были затрачены на его собирание. По тем же основаниям, несмотря на сорокалетнее усилие, еще не пришли к созданию технической геологии, которая также лишь наполовину отвечает запросам инженера-строителя. Положение однако глубоко изменится, когда лаборатории официальных учреждений разрешат свою задачу. Подлежащая выполнению работа чрезвычайно обширна. Она должна однако быть выполнена, так как вспомогательные науки грунтового строительства уже целое столетие остаются позади других технических наук, и вырастающая отсюда трата народного достояния много тяжелее, чем нагрузка государственного бюджета расходами по научной организации умеренного размера.

г) **Расчленение материала.** Предлагаемый труд представляет собой первую попытку трактовки строительной механики грунта на основе физики грунта. Многие вопросы остаются еще открытыми, другие получили ответ только из экспериментов. Издание труда необходимо, чтобы наглядно показать вдумчивому инженеру, каким путем можно дать первый толчок углублению в существо проблем грунтового строительства.

Отдел I трактует технически важные свойства видов грунта, не входя в рассмотрение физических причин этих свойств.

Во II отделе рассматриваются действующие между грунтовыми зернами силы трения и влияние, которое производит вода на значение коэффициентов трения.

В отделе III выражаются формулами прочность и упругость грунтов по обычным в технической механике точкам зрения и сводятся к их физическим причинам.

Отдел IV занимается замедлениями, которые испытывает развитие действий сил в суглинках и глинах вследствие сильного в этих грунтах сопротивления движению порозной воды, и изменением во времени соответствующих напряжений.

В отделе V трактуются важнейшие проблемы строительной механики грунта на основе физических свойств грунтов.

Отдел VI содержит сжатое изложение связи строительной механики грунта с практикой грунтового строительства, а равно перечисление физических свойств, определяющих различные важные явления в грунтовом строительстве.

ОТДЕЛ ПЕРВЫЙ СВОЙСТВА ГРУНТА

ГЛАВА I

ВЕЛИЧИНА И ФОРМА ЗЕРЕН ГРУНТА

Приведенная в табл. 1 номенклатура зерен грунта по их крупности служит примером приемов, господствующих в почвоведении.

Таблица 1²

Величина зерна в мм	> 5	5 — 2	2 — 1	1 — 0,5	0,5 — 0,2	0,2 — 0,1	< 0,1
Наименование	Камень (гравий), хрящ, щебень	Гравий, хрящ	Очень крупный песок	Крупный песок	Средне- зерни- стый песок	Тонкий песок	Отмучи- ваемые частицы

Американская комиссия оснований предлагает номенклатуру, приведенную в табл. 2.

Таблица 2³

Наименование	Ширина отверстия сита в мм		Методы механиче- ского анализа
	проходит	удерживается	
Камни, щебень, булыжник	Крупный 32,0 Средний 16,0 Мелкий 8,0	16,0 8,0 4,0	Сито из пробитой металлической пластинки
Гравий и песок	Крупный 4,0 Средний 2,0 Мелкий 1,0	2,0 1,0 0,5	Проволочное сито
Пыль	Крупный 0,5 Средний 0,25 Мелкий 0,125	0,25 0,125 0,0625	Проволочное сито
Мука	Крупный 0,0625 Средний 0,03125 Мелкий 0,015625	0,03125 0,015625 0,0078125	Отмучивание

² По R a t h a n n, Bodenkunde, 3 Aufl., 1911, S. 281. Устав ассоциации сельскохозяйственных опытных станций в Германии.

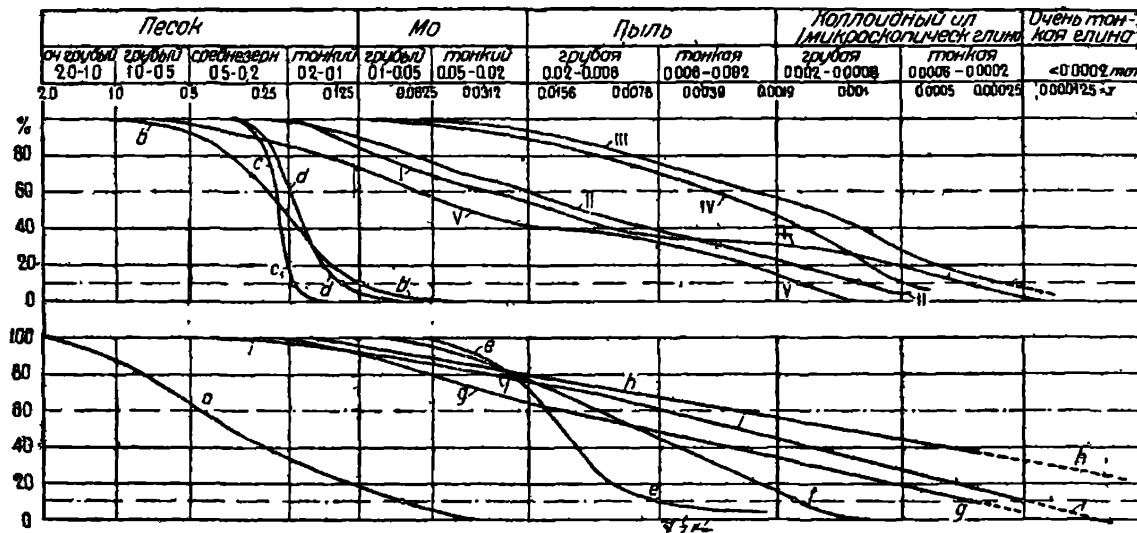
³ Rogers a. Disc., Am. Soc., 21, January, 1920.

В бетонном деле гравием (Kies) называется материал с зернами величиной от 7 до 70 мм, а песком — материал, зерна которого меньше 7 мм.⁴

Ввиду многозначности общеупотребительных наименований автор предлагает пользоваться номенклатурой, которая основана на графиках состава грунта (фиг. 1). Номенклатура зерен отмучиваемых тонких частей (Мо, пыль и ил) сделана по Аттербергу (табл. 14), а более крупных составных частей — применительно к табл. 1.

Самые крупные зерна каждой фракции крупнее самых мелких в ней не больше, чем в 3,33 раза.

При графическом представлении результатов механического анализа (ситам или отмучиванием) рекомендуется в качестве абсциссы наносить не величины зерен, а их логарифмы. Логарифм единицы равен нулю, и поэтому зерно диаметром $d=1$ соответствует абсциссе, равной нулю.



Фиг. 1.

Масштаб выбирается так, что между абсциссами x и соответствующими им диаметрами зерен d соблюдается зависимость:

$$d = 2^{-x}. \quad (1)$$

Абсциссе $x+1$ соответствует диаметр зерна:

$$d_1 = 2^{-(x+1)},$$

отсюда

$$d : d_1 = 2.$$

Поэтому диаграмма обладает тем свойством, что удвоение крупности зерна независимо от величины зерна выражается в разности абсцисс, равной единице. Абсциссы вычисляются из равенства (1):

$$x = -\frac{\ln d}{\ln 2} = -1,441 \ln d. \quad (2)$$

Если ординатами для каждой абсциссы нанести значения массы зерен (в процентах от общего веса), диаметр которых меньше диаметра, соответствующего данной абсциссе, то получим кривую распределения.

Крутизна кривой распределения служит мерой однородности материала.

⁴ Bestimmungen für die Ausführung von Bauwerken aus Beton. Aufgestellt vom deutschen Ausschuss für Eisenbeton, Oktober 1915.