

ОБ АППРОКСИМАЦИИ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА СДВИГУ ОТ НОРМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ

А.Ю. Виноградов^{1,2}, В.А. Обязов^{1,3}

¹ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай,
Россия; ²ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский
государственный лесотехнический
университет имени С.М. Кирова», г. Санкт-
Петербург, Россия;

³ФГБОУ ВО «Российский государственный
гидрометеорологический университет»,
г. Санкт-Петербург, Россия

gd@npogtp.ru

Аннотация. Сопротивление грунтов сдвигу, зависит от их физического и напряженного состояния, и относится к основным прочностным характеристикам, определяющим мероприятия по защите от таких опасных процессов, как сели, размыв и разрушение коренных и аллювиальных пород берегов под воздействием прибоя и руслового потока, оползней и обвалов, а также используется при проектировании любых зданий и сооружений. В связи с этим получение расчетных величин прочностных свойств грунтов имеет весьма важное значение. Определение предельных нагрузок базируется на экспериментальной зависимости между давлением и сопротивлением грунтов сдвигу. Согласно нормативной документации, эта зависимость принята линейной, а определение касательного сопротивления сдвигу используемых при лабораторных исследованиях грунтов выполняется при нормальном давлении, чаще всего принимаемом равным 0,1, 0,2 и 0,3 МПа. Учитывая, что большинство существующих и проектируемых зданий и сооружений, в том числе сооружений инженерной защиты, имеют невысокую нагрузку на основание (менее 0,1 МПа), исследование образцов грунта было проведено не только в рекомендованном диапазоне нормального давления 0,1–0,3 МПа, но и при меньших его значениях. В случае

ABOUT THE APPROXIMATION OF THE DEPENDENCE OF SOIL SHEAR RESISTANCE ON NORMAL PRESSURE

Alexey Yu. Vinogradov^{1,2}, Viktor A. Obyazov^{1,3}

¹Scientific and Industrial Research Association
“Gidrotehproekt”, Valday, Russia;

² Saint Petersburg State Forest Technical
University, St. Petersburg, Russia;

³Russian State Hydrometeorological University,
St. Petersburg, Russia

gd@npogtp.ru

Abstract. Soil shear resistance, depending on their physical and stressed state, is characterized by basic strength characteristics. These characteristics determine measures to protect against such dangerous processes as mudflows, erosion and destruction of indigenous and alluvial rocks of the shores under the influence of surf and channel flow, landslides, as well as during the construction of any buildings and structures. In this regard, obtaining calculated values of the strength properties of soils is crucial. The determination of limit loads is based on the experimental relationship between pressure and soil shear resistance. According to the regulatory documentation, this dependence is assumed to be linear, and the determination of the shear resistance of soils used in laboratory studies is performed at normal pressure, most often assumed to be 0.1, 0.2 and 0.3 MPa. Considering that most existing and projected buildings and structures, including engineering protection structures, have a low load on the base (less than 0.1 MPa), the study of soil samples was carried out not only in the recommended range of normal pressure of 0.1–0.3 MPa, but also at lower values. In the case of standard loads recommended by GOST, the dependence of soil shear resistance on normal pressure can be approximated by a straight line. But in the area of relatively low pressures, this dependence is nonlinear. This pattern was

стандартных, рекомендованных ГОСТ, нагрузок зависимость сопротивления грунта сдвигу от нормального давления вполне можно аппроксимировать прямой линией. Но в области относительно малых давлений эта зависимость является нелинейной. Указанная закономерность подтвердилась при всех многочисленных лабораторных испытаниях на образцах как связных, так и несвязных грунтов, подготовленных согласно соответствующей нормативной документации, а также на пробах монолитов связного грунта, отобранного непосредственно из береговых обнажений. Подобные результаты ранее получал и один из основоположников отечественного грунтоведения Н.А. Цытович. Однако в более поздних работах он перевел акцент именно на линейную составляющую исследуемой зависимости. Подбор наиболее подходящей функции для ее аппроксимации, выполненный в данной работе, показал, что она является степенной.

Ключевые слова: грунты; связные грунты; несвязные грунты; сопротивление сдвигу; нормальное давление; сцепление; внутреннее трение.

Введение

При проектировании сооружений инженерной защиты от таких опасных процессов как сели – в случае транспортно-сдвигового процесса [Виноградов, 1980], размыв и разрушение коренных и аллювиальных пород берегов под воздействием прибоя и руслового потока, оползней и обвалов существенное значение приобретает получение расчетных величин прочностных свойств грунтов^{1,2}. Эти свойства важно знать при возведении любых зданий и сооружений³. Основным прочностным показателем грунтов является сопротивление

сдвигу, подтвержденное во всех многочисленных лабораторных испытаниях на образцах как связных, так и несвязных грунтов, подготовленных в соответствии с соответствующей нормативной документацией, а также на образцах монолитов связного грунта, отобранного непосредственно из береговых обнажений. Подобные результаты ранее получал и один из основоположников отечественного грунтоведения Н.А. Цытович. Однако в более поздних работах он перевел акцент именно на линейную составляющую исследуемой зависимости. Подбор наиболее подходящей функции для ее аппроксимации, выполненный в данной работе, показал, что она является степенной.

Keywords: soils; cohesive soils; non-cohesive soils; shear resistance; normal pressure; adhesion; internal friction.

сдвигу, зависящее от физического и напряженного состояния [Цытович, 1963].

Критичной ситуацией для грунтов при нагружении является сдвиг по поверхности с наименьшей несущей способностью. Разрушение грунта происходит при преодолении тангенциальным напряжением предела прочности на сдвиг, обусловленного внутренним трением и сцеплением грунта.

«Единственная причина разрушения грунта – образование сдвига. Осадки в этой фазе нагрузок становятся неравномерными и порывистыми, эпюра осадок приобретает неправильный характер. Кроме вертикальных осадок появляются сдвиги фундаментов в

¹ СП 116.13330.2012 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения.

² СП 436.1325800.2018. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от оползней и обвалов. Правила проектирования.

³ СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений.

сторону» [Герсевич, 1948]. Следовательно, характеристиками, определяющими величину деформации грунтов, в том числе при нагрузках, превышающих критические, являются сцепление и внутреннее трение.

Определение предельных нагрузок в основаниях сооружений, прогноз устойчивости откосов при оползнях природных склонов и устойчивости земляных сооружений – все это базируется на экспериментальной зависимости между давлением и сопротивлением грунтов сдвигу [Цытович, 1963.]. Эта зависимость принята линейной^{4,5}. Согласно ГОСТ, коэффициент при функции – традиционно определяемый как угол внутреннего трения ($tg\varphi$) и свободный член уравнения (c) – как сцепление, увязаны между собой в тангенциальное напряжение: $\tau = \sigma \cdot tg\varphi + c$, где σ – нормальное, а τ – тангенциальное давления. Данное уравнение известно как закон Кулона для сыпучих и связных грунтов: сопротивление грунтов сдвигу есть функция первой степени от нормального давления [Цытович, 1983]. С физической точки зрения данное напряжение является напряжением, **удерживающим** грунтовое тело от сдвига. Чем выше значения сцепления и угла внутреннего трения, тем более устойчивым является грунт [Виноградов Ю.Б., 1980].

Параметры механических свойств грунтов, (угол внутреннего трения φ , удельное сцепление c) необходимо оценивать согласно требованиям всех основных регламентирующих документов: СП 22.13330.2016³ (п. 2.10), СП 50-101-2004⁶ (п. 5.3.1), СП 23.13330.2018⁷ (п. 2.3).

Материалы и методы

При проведении исследований использованы пробы грунта различного гранулометрического состава как связные (супеси), так и несвязные (песок среднезернистый), подготовленные согласно ГОСТ 12248.1-2020⁴. Кроме того, лабораторным исследованиям были подвержены пробы

монолитов связного грунта (супесь), отобранного непосредственно из береговых обнажений безымянного притока р. Порусья. Всего проведено 67 исследований специально подготовленных грунтов и 28 исследований монолитов. Все образцы по показателям текучести $I_L < 1,0$.

Согласно п. 3.3 ГОСТ 12248.1-2020⁴ испытания на срез грунта проводится методом только консолидированно-дренированного среза. В предыдущем ГОСТ 12248-2010⁸, согласно п. 5.1.1.4, предложены к использованию два метода:

- консолидированно-дренированный (медленный) срез – для песков, глинистых и органоминеральных грунтов независимо от их коэффициента водонасыщения для определения эффективных значений φ^I и c^I ;

- неконсолидированный быстрый срез – для водонасыщенных глинистых и органоминеральных грунтов, имеющих показатель текучести 0,5, и просадочных грунтов, приведенных в водонасыщенное состояние замачиванием без приложения нагрузки, для определения φ и c в нестабилизированном состоянии.

Сравнительный анализ прочностных характеристик грунтов, полученных этими методами, остается за рамками настоящей статьи. Один из основоположников отечественного грунтоведения – Н.А. Цытович – считал заслуживающими доверия именно результаты консолидированно-дренированного среза. В данной работе использовался метод консолидированно-дренированного среза.

При быстром срезе влажность и плотность грунта не успевают измениться, при медленном – каждому шагу нормального давления соответствуют свои плотность и влажность грунта, т.е. испытаниям подвергается априори различный грунт. В качестве варианта решения этой проблемы Н.А. Цытович предложил вначале загрузить грунт максимально возможным давлением при планируемых испытаниях, потом

⁴ ГОСТ 30416-2020. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения.

⁵ ГОСТ 12248.1-2020. ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза.

⁶ СП 50-101-2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений.

⁷ СП 23.13330.2018. Основания гидротехнических сооружений.

⁸ ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.

разгрузить его и в дальнейшем подвергать испытаниям полученную заготовку [Цытович, 1963]. Таким образом, грунт для испытаний будет действительно однородным, но он будет иметь мало общего с первоначальным грунтом, следовательно, результаты испытаний можно будет использовать только после соответствующей интерпретации. К сожалению, подобной интерпретации нет, и дискуссия на эту тему отсутствует.

Согласно ГОСТ 12248.1—2020⁴ определение касательного сопротивления сдвигу используемых нами при лабораторных исследованиях грунтов выполняется при нормальном давлении, равном 0,1, 0,2 и 0,3 МПа. Однако, большинство существующих и проектируемых зданий и сооружений имеют малую этажность и невысокую нагрузку на основание (таблица 1).

Таблица 1. Средняя нагрузка на грунт, создаваемая различными зданиями и сооружениями

Table 1. Average ground load generated by various buildings and structures

№	Наименование	Тип сооружения	Проект	Расчетное давление, МПа
1	Котельная	Типовой проект блочно-модульной котельной 4,0 МВт	903-1-312.96	0,05
2	Школа	Типовой проект средней образовательной школы	225-1-413	0,052
3	Канализационные очистные сооружения	Типовой проект канализационных очистных сооружений 25 м ³ /сут	402-22-61.86	0,038
4	Производственный корпус по изготовлению железобетонных изделий	Типовой проект завода железобетонных изделий мощностью 50 тыс. м ³ /год	409-10-44	0,033 (0,068*)
5	9 этажный кирпичный жилой дом	Типовой проект жилого дома 9 этажей	85-012/1.2	0,122

* давление наиболее нагруженной части сооружения

Усредненный вес 1 м³ зданий и сооружений с учетом полезной загрузки составляет 6,5 кН, т.е. давление, оказываемое 1 м³ условного здания на

1 м² составляет 0,0065 МПа, следовательно, усредненное давление шестизэтажного здания на грунт не превышает 0,1 МПа.

Таблица 2. Средняя этажность по городам РФ [<https://info.2gis.ru/ufa/company/news/2gis-podschital-srednyuyu-etazhnost-gorodov>]

Table 2. Average number of floors by cities of the Russian Federation

Город	Этажность
Москва	6
Санкт-Петербург, Уфа, Екатеринбург, Казань, Воронеж, Челябинск, Красноярск	5
Новосибирск, Липецк, Пермь, Нижний Новгород, Саратов, Рязань, Самара, Владивосток, Волгоград, Иркутск	4
Краснодар, Астрахань	3

Поскольку средняя этажность по городам РФ не превышает 6 этажей ни в одном городе (таблица 2), можно сделать вывод, что большинство построенных и проектируемых зданий и сооружений в стране создают давление на грунт меньшее, чем рекомендованная ГОСТ величина 0,1 МПа. Все сооружения инженерной

защиты, водопропускные и водоотводные попадают в диапазон 0,01–0,02 МПа.

Учитывая данное обстоятельство, проведенное нами исследование образцов грунта выполнялось не только в рекомендованном диапазоне нормального давления 0,1–0,3 Мпа, но и при его значениях, меньших 0,1 Мпа.

Результаты

В случае стандартных, рекомендованных ГОСТ, нагрузок зависимость $\tau = f(\sigma)$ вполне можно аппроксимировать прямой линией (рисунок 1а). Но в области относительно малых

давлений эта зависимость становится нелинейной. Наиболее подходящей функцией для ее аппроксимации является степенная (рисунок 1б).

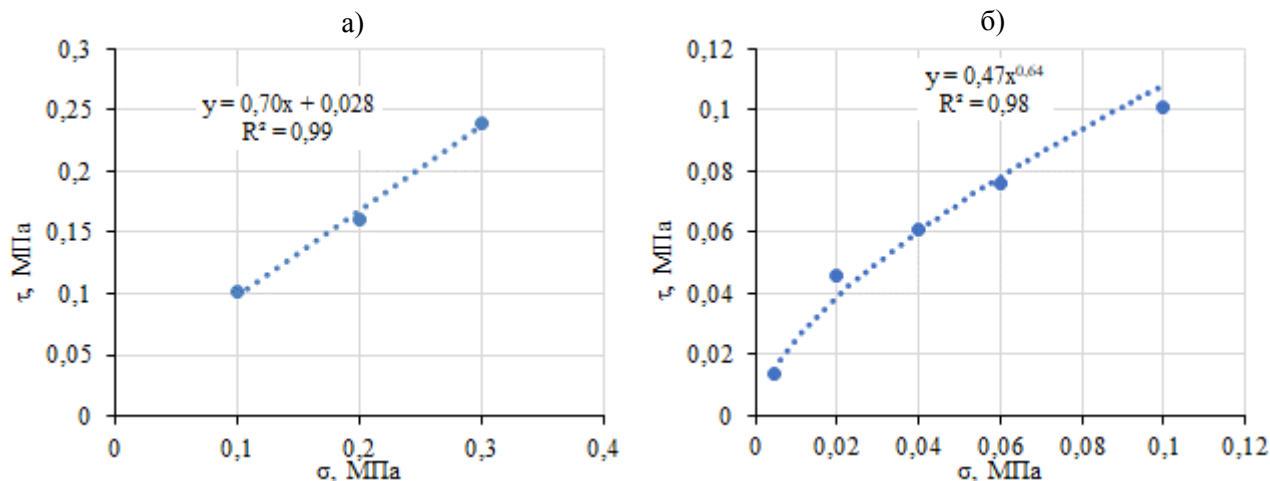


Рисунок 1. Диаграммы сопротивления сдвигу крупнозернистого песка при нормальном давлении 0,1–0,5 МПа (а) и меньше 0,1 МПа (б)

Figure 1. Diagrams of shear resistance of coarse-grained sand at normal pressure of 0.1–0.5 MPa (a) and less than 0.1 MPa (b)

На основании наших множественных испытаний несвязных грунтов на плоскостной сдвиг можно сделать вывод, что при нормальных нагрузках 0,1 МПа и менее диаграмма имеет ярко выраженную степенную зависимость и *не* представляет собой прямой, исходящей из начала координат (рисунок 2).

Обсуждение

В рамках нашего рассмотрения интересна трансформация интерпретации результатов зависимости сопротивления сдвигу от нормального давления σ в ранних [Цытович, 1940] (рисунок 3а) и поздних трудах Н.А. Цытовича [Цытович, 1963; Цытович, 1983] (рисунок 3б).

Н. А. Цытович [Цытович, 1940] предлагает рассматривать полученную диаграмму как состоящую из двух частей: с большей кривизной от 0 до σ_ϕ , и прямолинейной: от σ_ϕ до нормального давления 0,5–1,0 МПа. В указанной работе величина σ_ϕ принята для глин 0,05–0,07 МПа, для песков – 0,1 МПа и выше.

В свою очередь, сопротивление грунта сдвигу на криволинейном участке складывается

также из двух частей – первой, соответствующей нулевому давлению (с) – молекулярное сцепление грунта и второй, изменяющейся по криволинейному закону.

Для криволинейного участка тангенс угла является величиной переменной. Для линейного, с достаточной для практических целей точностью, по мнению Н. А. Цытовича, тангенс считается величиной постоянной [Цытович, 1940]. Данное утверждение является спорным, поскольку автор не обозначил критериев, на основании которых он его выдвинул и обосновал.

В последующей своей фундаментальной работе [Цытович, 1963], Н. А. Цытович указывал, что коэффициент внутреннего трения связных грунтов может считаться величиной постоянной только при полном уплотнении грунта во время испытания.

Загружая грунт максимально возможным давлением с последующей разгрузкой, мы имеем дело с новым образцом, возможно, кардинально отличающимся от первоначального. Понимания у проектировщика, как будет вести себя естественный грунт при планируемых воздействиях априори быть не может.

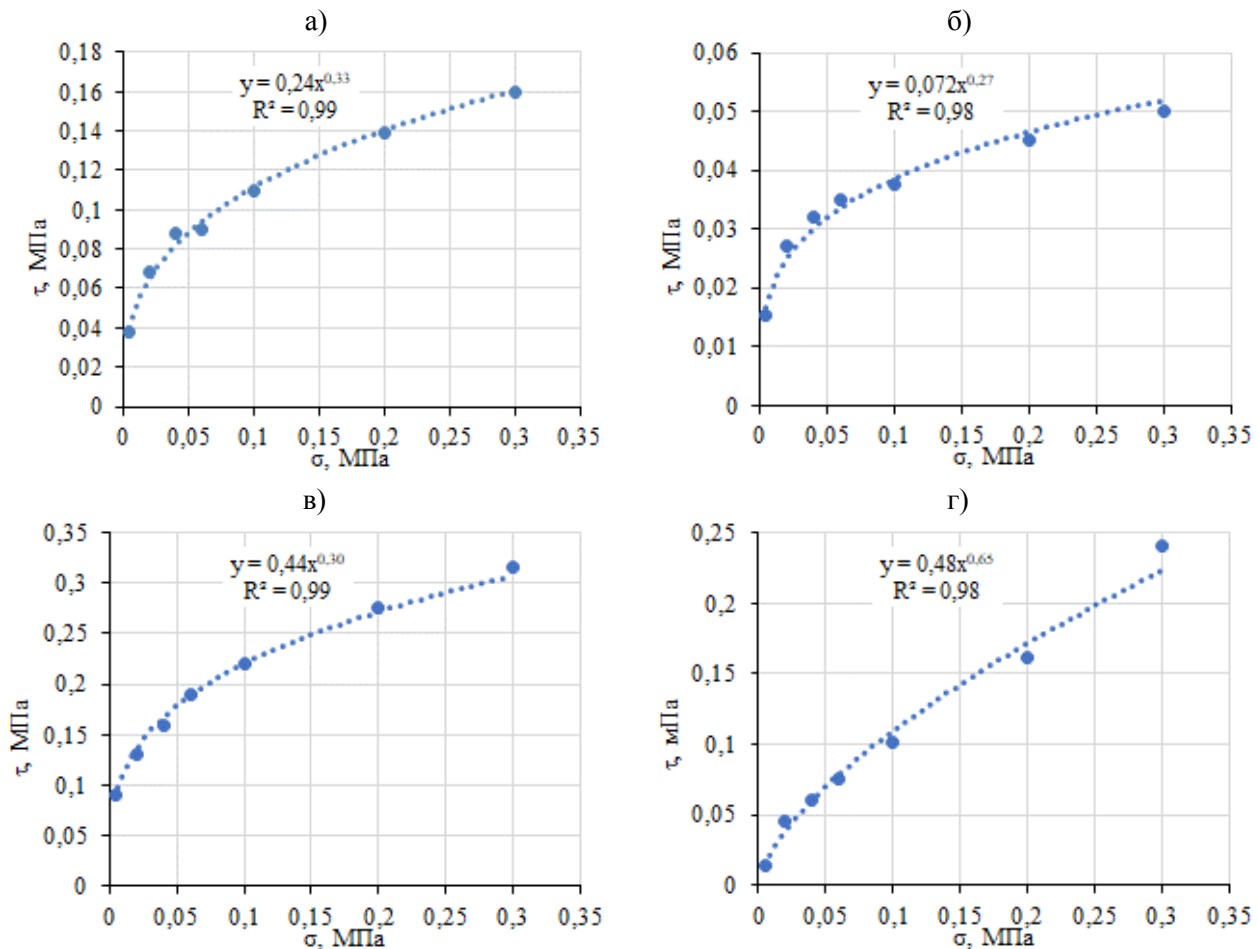
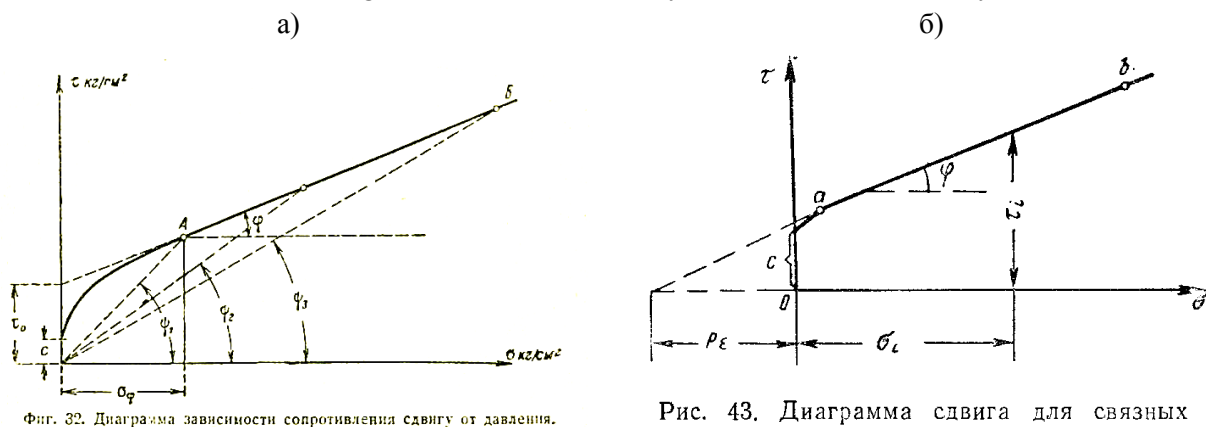


Рисунок 2. Диаграммы сопротивления сдвигу для связных и несвязных грунтов:

а – супесь с плотностью 1,96 т/м³ и влажностью 0,2; б – супесь с плотностью 2,04 т/м³ и влажностью 0,2; в – супесь (моноклит) с плотностью 2,08 т/м³ и влажностью 0,23; г – песок среднезернистый с плотностью 2,12 т/м³ и влажностью 0,14

Figure 2. Shear resistance diagrams for cohesive and non-cohesive soils:

а – sandy loam with a density of 1.96 t/m³ and a humidity of 0.2; б – sandy loam with a density of 2.04 t/m³ and a humidity of 0.2; в – sandy loam (monolith) with a density of 2.08 t/m³ and a humidity of 0.23; д – medium-grained sand with a density of 2.12 t/m³ and humidity 0.14



Фиг. 32. Диаграмма зависимости сопротивления сдвигу от давления.

Рис. 43. Диаграмма сдвига для связных грунтов при консолидированно-дренированном испытании

Рисунок 3. Диаграмма зависимости касательного сопротивления сдвигу τ от нормального напряжения σ : а – [Цытович, 1940]; б – [Цытович, 1963]

Figure 3. Diagram of the dependence of the tangential shear resistance τ on the normal voltage σ : а – [Cytovich, 1940]; б – [Cytovich, 1963]

Для несвязных грунтов (пески), при нормальном давлении в диапазоне 0,1–0,5 МПа [Цытович, 1963] изменениями плотности можно пренебречь. Как показывают результаты многочисленных испытаний, для сыпучих грунтов, диаграмма сопротивления сдвигу представляет собой строго прямую, исходящую из начала координат под углом φ к оси нормальных давлений [Цытович, 1963]. Сопротивление сыпучих грунтов сдвигу есть сопротивление их трению, прямо пропорциональное нормальному давлению.

По Н. А. Цытовичу, практике необходимо значение максимально возможного сопротивления грунтов сдвигу. На наш взгляд, как практикующих инженеров, это утверждение спорно. Для сооружений инженерной защиты важно знать **минимально** возможное сопротивление **ненагруженного** грунта, поскольку именно оно определяет начальную устойчивость массива грунта.

Далее по Н. А. Цытовичу – «многочисленные испытания связных грунтов на сопротивление их прямому сдвигу показывают, что все экспериментальные точки (при давлениях меньших 0,7 МПа) весьма точно укладываются на прямую линию» [Цытович, 1963, с. 172]. Криволинейная часть диаграммы в поздней монографии практически вышла из рассмотрения

и на соответствующем рисунке почти не видна (рисунок 3б).

Наш опыт подсказывает, что все диаграммы $\tau = f(\sigma)$ имеют ярко выраженную степенную зависимость (см. рисунок 2). Функциональная зависимость сопротивления сдвигу от нормального давления по раннему Н.А. Цытовичу также представляет собой степенную функцию вида $\tau = a \cdot \sigma^b$ (см. рисунок 3а).

Основная часть грунтоведения, построенная на оценке прочностных свойств грунтов по принципу линейности уравнения Кулона, имеет область интересов за пределами реальной жизни. Значения касательного напряжения большинства связных грунтов при нормальных нагрузках 0,05–0,25 МПа так же неплохо аппроксимируются степенной зависимостью.

По сути, задача сводится к подбору уравнения, наилучшим образом аппроксимирующего полученные эмпирическим путем значения тангенциальных сдвиговых напряжений в зависимости от нормальной нагрузки, приложенной к образцу. Простой оценкой величины достоверности аппроксимации является сравнительное значение R^2 (таблица 3).

Таблица 3. Аппроксимация различными зависимостями функции сопротивления сдвигу от нормального давления. Суглинок полутвердый, Тверская обл., данные 2002, 2020 гг.

Table 3. Approximation of the shear resistance function by various dependencies on normal pressure. Semi-solid loam, Tver region, data for years 2002, 2020

Скважина №	Глубина, м	Зависимость		
		линейная	степенная	логарифмическая
6338	17,2	1,000	0,999	0,978
	17,5	0,977	0,990	1,000
6339	20,2	0,999	1,000	0,987
	20,8	0,999	1,000	0,986
3	16,5	0,998	0,992	0,962
	14,6	0,999	0,995	0,974
14	22	0,935	0,883	0,842
15	22,2	0,994	0,970	0,949
	22,8	1,000	0,992	0,978

Действительно, прямая зависимость ($y = ax + b$), в среднем, неплохо аппроксимирует три эмпирические значения τ , полученные по

заданным, согласно требованиям ГОСТ, нормальным значениям σ , хотя полученные результаты чаще всего и выходят за область

практического интереса. Как отметил еще Терцаги [Терцаги, 1961], результаты испытаний грунтов на сдвиг могут быть с *некоторой* точностью выражены зависимостью Кулона. Однако, если мы изучаем реальный грунт и хотим оценить его поведение в природных условиях или при обычных нагрузках – мы должны провести испытания при нормальных напряжениях в диапазоне 0–0,3 МПа не менее, чем в 6–7 точках. В этом случае, сомнений в правильности выбора степенной зависимости у нас не будет.

Литература

- Виноградов Ю.Б. Этюды о селевых потоках. Гидрометеиздат, 1980. 144 с.
- Герсеванов Н.М. Свайные основания и расчет фундаментов сооружений. М.: Стройвоенмориздат, 1948. 270 с.
- Терцаги К. Теория механики грунтов. М.: Гостройиздат, 1961. 507 с.
- Цытович Н.А. Механика грунтов. Л.–М.: Государственное издательство строительной литературы, 1940. 389 с.
- Цытович Н.А. Механика грунтов: [Учеб. пособие для гидротехн. и строит. специальностей вузов]. 4-е изд., вновь перераб. и доп. М.: Госстройиздат, 1963. 636 с.
- Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс): Учебник для строит. вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.

Выводы

1. Линейный вид уравнения сопротивления сдвигу вида $\tau_i = a\sigma_i + b$ с учетом значений из диапазона относительно малых давлений не соответствует эмпирическим данным.
2. Наилучшее совпадение наблюдаемым значениям дает степенное уравнение вида $\tau_i = a(\sigma_i)^b$, аппроксимирующее зависимость сопротивления грунта сдвигу от нормального давления.

References

- Vinogradov Yu. B. *Etyudy o selevyh potokah [Studies on mudflows]*. Hydrometeoizdat, 1980. 144 p.
- Gersevanov N.M. *Svajnye osnovaniya i raschet fundamentov sooruzhenij [Pile foundations and calculation of foundations of structures]*. M: Publ. Strojvoenmorizdat, 1948. 270 p. (In Russian).
- Terczagi K. *Teoriya mexaniki gruntov [Theory of soil mechanics]*. M: Publ. Gostrojizdat, 1961. 507 p. (In Russian).
- Cytovich N.A. *Mexanika gruntov [Soil mechanics]*. Leningrad–Moskva: Publ. Gosudarstvennoe izdatel'stvo stroitel'noj literatury, 1940. 389 p. (In Russian).
- Cytovich N.A. *Mexanika gruntov: [Ucheb. posobie dlya gidrotexn. i stroit. special'nostej vuzov]. 4-e izd., vnov' pererab. i dop. [Soil mechanics: [Textbook for hydraulic engineering. and builds. university specialties]*. M: Publ. Gosstrojizdat, 1963. 636 p. (In Russian).
- Cytovich N.A. *Mexanika gruntov (kratkij kurs): Uchebnik dlya stroit. vuzov. 4-e izd., pererab. i dop. [Soil Mechanics (short course): A textbook for builds. universities. 4th edition revised and expanded]*. M: Publ. Vysshaya shkola, 1983. 288 p. (In Russian).