

МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ТЕХНОЛОГИИ METHODS, MODELS AND TECHNOLOGIES

УДК 630.3; 624.131.43

DOI: 10.34753/HS.2022.4.2.139

ОЦЕНКА ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ АГРЕГАТОВ СВЯЗНОГО ГРУНТА ПРИ РАЗМЫВЕ

А.Ю. Виноградов^{1,2}, В.И. Каширский³,
И.Ю. Лободенко⁴, О.В. Зубова²,
И.А. Виноградов^{1,5}, Е.А. Парфенов^{1,2},
А.В. Кучмин^{1,2}, А.А. Банщиков¹,
А.С. Войтенко¹

¹ООО НПО «Гидротехпроект», г. Валдай, Россия; ²ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова»; ³ООО «Департамент технического заказчика» Концерн КРОСТ, г. Подольск, Россия; ⁴ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», г. Москва, Россия;

⁵НИУ «Московский государственный строительный университет», г. Москва, Россия
gd@npogtp.ru

Аннотация. Для связных грунтов, к которым относятся глинистые, суглинистые и супесчаные грунты, характерна структура, в которой важное место занимают агрегаты – конгломерат «слипшихся» элементарных почвенных высокодисперсных частиц, характеризующихся большими удельной поверхностью и поверхностной энергией. Поскольку агрегаты как первичная устойчивая к размачиванию единица связного грунта предположительно целиком смываются потоком воды, правильная оценка их прочности и линейных размеров позволит делать физически обоснованные расчеты размывов дна, в том числе водопропускных, водоотводных инженерных сооружений лесных дорог и мелиоративных каналов. В статье приведен разработанный авторами подход к оценке значения сцепления грунта, основанный на измерении линейных размеров и плотности агрегатов связного грунта.

EVALUATION OF THE LINEAR DIMENSIONS OF COHESIVE SOIL AGGREGATES DURING EROSION

Alexey Yu. Vinogradov^{1,2},
Vladimir I. Kashirskiy³, Ivan Yu. Lobodenko⁴,
Oksana V. Zubova², Ivan A. Vinogradov^{1,5},
Evgeni A. Parfenov^{1,2}, Alexey V. Kuchmin^{1,2},
Anton A. Banshchikov¹, Andrey S. Voitenko¹

¹Scientific and Industrial Research Association Gidrotehproekt, Valday, Russia; ²Saint Petersburg State Forest Technical University, Saint-Petersburg, Russia; ³Department of technical customer Concern KROST, Podolsk, Russia; ⁴Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia; ⁵National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

gd@npogtp.ru

Abstract. For cohesive soils, which include clay, clayey and sandy loam soils, a structure is characteristic in which aggregates occupy a significant place. Since the aggregates are presumably completely washed away by the water flow, a correct assessment of their strength and linear dimensions will make it possible to make physically based calculations of bottom erosion, including culverts, drainage engineering structures of forest roads and meliorative channels. An approach developed by the authors to assess the value of soil adhesion based on measuring the linear dimensions and density of aggregates of cohesive soil is presented. As an example, calculations of the sizes of aggregates of sandy loam of various cohesive soils of quaternary ground horizons of the Priilmenskaya lowland, such as red-brown, spotted, burgundy and blue-gray dense sandy loams are presented. The simplest of the densest packages of aggregates in the soil body – hexagonal and cubic – are considered. As

В качестве примера представлены расчеты размеров агрегатов супесей различных связных пород четвертичных грунтовых горизонтов Приильменской низменности (разрез и лабораторное апробирование выполнены авторами в 2020 году на правом коренном берегу старицы реки Порусья, Приильменская низменность, Поддорский район, Новгородская область), таких как супесь красно-коричневая, пятнистая супесь, бордовая супесь, серо-голубая плотная супесь. Рассмотрены простейшие из плотнейших упаковок агрегатов в теле грунта – гексагональная и кубическая. В качестве рабочей гипотезы сделано предположение, что взаимное расположение агрегатов находится в гексагональной плотноупакованной решетке. Сравнительный анализ результатов усредненных измерений и рассчитанных значений линейных размеров агрегатов по предложенной методике и методике, изложенной в СП 32-102-95, показал, что прямая линейная зависимость между значением сцепления грунта и размерами агрегатов, приведенная в указанном нормативном документе, не отвечает эмпирическим данным. С падением плотности грунта его сцепление уменьшается, размеры агрегатов для большинства связных грунтов увеличиваются, при этом их прочность падает, в дальнейшем они разрушаются на более мелкие и устойчивые.

Ключевые слова: размыв дна; связные грунты; агрегаты грунта; сцепление грунта; пористость грунта; плотность агрегатов.

Введение

В почвоведении и механике грунтов [Цытович, 1963; Воронин, 1984] под термином агрегаты понимается конгломерат «слипшихся» элементарных почвенных высокодисперсных частиц, характеризующихся большими удельной поверхностью и поверхностной энергией. Они

a working hypothesis, the assumption was made that the mutual arrangement of the aggregates is in a hexagonal close-packed lattice. A comparative analysis of the results of averaged measurements and the calculated values of the linear dimensions of the aggregates according to the proposed method and the method set out in SP 32-102-95, showed that the direct linear relationship between the value of soil cohesion and the dimensions of the aggregates given in the current regulatory document does not correspond to empirical data. With a decrease in the density of the soil, its cohesion decreases, the sizes of aggregates for most cohesive soils increase, while their strength decreases, in the future, they are destroyed into smaller and more stable ones.

Keywords: bottom erosion; cohesive soils; soil aggregates; soil cohesion; soil porosity; density of aggregates.

характерны для связных грунтов, к которым согласно пункту 5.3.1 СП 32-102-95¹ относятся глинистые, суглинистые и супесчаные грунты с числом пластичности $I_p \geq 0,01$, при этом согласно пункту 3.2 ГОСТ 25100-2020² глинистым грунтом является «связный грунт, обладающий свойством пластичности за счет содержания минеральных частиц глинистой и пылеватой фракций».

¹ СП 32-102-95 Сооружения мостовых переходов и подтопляемых насыпей. Методы расчета местных размывов [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003312>.

² ГОСТ 25100-2020. Межгосударственный стандарт. Грунты. Классификация. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200174302>.

Разновидности глинистых (связных) грунтов по числу пластичности I_p представлены в таблице Б.13 ГОСТ 25100-2020², где число пластичности глин $I_p > 0,17$, суглинков $0,07 < I_p \leq 0,17$, а супесей в интервале $0,01 \leq I_p \leq 0,07$.

Агрегаты имеют место во всех связных грунтах. Внутриагрегатная пористость [Воронин, 1984; Кокотов, 2011] для супесей в 1,26, суглинков в 1,32 и глин в 1,40 раза меньше, чем общая пористость образца грунта. Пористость агрегатов с уменьшением их размеров понижается. Образующиеся в результате агрегирования дополнительные пустоты растут с увеличением размеров агрегатов при сохранении общей плотности грунта [Воронин, 1984].

Устойчивость агрегатов к внешнему воздействию зависит от их размеров [Кокотов, 2011], причем информация, приведенная в различных источниках диаметрально противоположная. У [Кокотов, 2011; Пестонова, 2007] чем крупнее агрегаты, тем они прочнее. У [Никитин, 1968] агрегаты глин и суглинков делятся по прочности на три группы. К относительно прочным агрегатам относятся ³ агрегаты размером менее 2 мм, к малопрочным – от 2–5 мм и к непрочным – крупнее 5 мм.

Оценка размеров агрегатов в зависимости от плотности грунта так же отличается у различных авторов. Например, одни авторы ⁴ считают, что при увеличении общей пористости растут и размеры агрегатов.

Действительно, при увеличении плотности структура грунта меняется. Увеличивается содержание минеральных частиц и агрегатов грунта в единице объема, формируются новые связи между ними, следовательно, увеличиваются размеры агрегатов и прочность грунта.

В [Казарновский, Лейтланд, Мирошкин, 2002] сказано, что увеличение плотности способствует повышению прочности и снижению деформируемости грунта до определенного предела, при попытках дальнейшего увеличения

плотности возникает эффект переуплотнения, связанный с изменением агрегатного состава грунта.

Вероятно, с падением плотности размеры агрегатов действительно увеличиваются, при этом их прочность падает.

Размеры агрегатов используются при расчетах эрозионных размывов в связных грунтах, например, пункт 5.3 СП 32-102-95¹. Средний диаметр смываемых частиц грунта D , мм в соответствии с пунктами 5.3.1, 5.3.2 и формулой 5.27 в СП 32-102-95¹ предлагается определять по следующей эмпирической зависимости:

$$D = 3z = 3 * (0,35 + 0,6 \cdot c_p \cdot 10^{-4}) \quad (1)$$

где z – толщина отрывающихся отдельностей, мм;

c_p – расчетное сцепление размываемого грунта, Па.

Поскольку агрегаты как первичная устойчивая к размачиванию единица связного грунта предположительно целиком смываются потоком воды, правильная оценка их прочности и линейных размеров позволит делать физически обоснованные расчеты размывов дна, в том числе водопропускных, водоотводных инженерных сооружений лесных дорог и мелиоративных каналов.

Методика расчетов

Попробуем оценить размеры агрегатов и их зависимость от плотности почвы в естественном залегании.

Пусть объем агрегата состоит из объема самого агрегата условно округлой формы + $\frac{1}{2}$ объема окружающих его пор. Тогда общий единичный объем грунта будет составлять:

$$V_{\text{общ}} = k \left(\pi R^2 + \left(R^2 - \frac{R^2}{4\pi} + 2R \left(\frac{\sigma}{2} \right) \right) \right) \frac{4}{3} R \quad (2)$$

где R – средний радиус агрегата, м;

σ – среднее расстояние между соседними агрегатами, м;

³ Зерна и частицы несвязных грунтов [Электронный ресурс] // ArBuild.Ru – архитектурные конструкции зданий и их строительство. 2013. URL: <https://arbuild.ru/gvds/338-zerna-i-chasticy-nesvyaznyh-gruntov.html>.

⁴ Аэрофизика – газообразная фаза почв. Тема: Воздушные свойства. [Электронный ресурс] // Present5.com. URL: <https://present5.com/aerofizika-gazoobraznaya-faza-pochv-tema-vozdushnye-svoystva>.

k – число агрегатов в единице объема:

$$k = \frac{V_{\text{агрегат}}}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$

где $V_{\text{агрегат}}$ – суммарный объем агрегатов в единице объема почвы, м³.

В результате получаем:

$$\frac{\sigma}{R} = \pi \frac{V_{\text{общ}}}{V_{\text{агрегат}}} - \pi - \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \quad (3)$$

В полученной зависимости 2 неизвестных: R – средний радиус агрегата, σ – среднее расстояние между соседними агрегатами. Отношение $\frac{\sigma}{R}$, характеризующее средние размеры агрегатов и расстояние между ними, в принципе, определяется пористостью грунта.

В качестве входного параметра используется общая пористость. Расчетные промежуточные параметры:

– внутриагрегатная пористость:

$$\varepsilon_{\text{агрегат}} = \frac{\rho_s - \rho_{\text{агрег}}}{\rho_s};$$

– общий объем агрегатов:

$$V_{\text{агрегат}} = V_{\text{общ}} - V_{\text{межагрегат}};$$

– общий объем пор вне агрегатов:

$$V_{\text{межагрегат}} = \varepsilon - \varepsilon_{\text{агрегат}};$$

– внутриагрегатная плотность:

$$\rho_{\text{агрегат}} = \rho_s(1 - \varepsilon_{\text{агрегат}}) = \rho_{\text{агрегат}}/V_{\text{агрегат}};$$

где ρ_s – плотность частиц грунта кг/м³;

$\rho_{\text{агрег}}$ – плотность агрегата кг/м³;

ε – пористость грунта, доли единицы;

$P_{\text{агрегат}}$ – масса агрегата, кг;

$V_{\text{агрегат}}$ – объем агрегата, м³.

Рассмотрим физические характеристики тугопластичных (таблица Б.16 ГОСТ 25100-2020²) глинистых грунтов (текучесть 0,25–0,50) при различной пористости (таблица 1). Объем агрегатов и пустот в данном контексте выражен в долях от условного единичного.

Предположим, что максимальный размер макропор между агрегатами σ при максимальной пористости глин 0,51 составляет 0,0005 м. Данное предположение согласуется с [Соколов, 1996]. Тогда максимальное уменьшение линейных размеров межагрегатных пор при увеличении плотности грунтов в естественном залегании с 1 331 до 1 888 кг/м³ не превысит $\Delta\sigma = \sqrt[3]{V_{\text{межагрегат}} - V_{\text{межагрегат}}} = \sqrt[3]{0,17 - 0,10} < 40\%$, а с учетом уплотнений внутриагрегатных пор эта величина может понизиться еще на четверть – до 30%. Оценивая таким образом размеры микропор при различной плотности грунта, получаем усредненную величину агрегатов, которые могут быть подвержены смыву при воздействии потока воды.

Размеры агрегатов D в этом случае равны: $D = 2R + 2\sigma$. Результаты расчетов приведены в таблице 2. Нормативные значения удельного сцепления элювиальных глинистых грунтов взяты из таблицы А.6 СП 22.13330.2016⁵.

Таблица 1. Физические характеристики глинистых грунтов при различной пористости.

Table 1. Physical characteristics of clay soils with different porosity.

коэффициент пористости, e	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,05
пористость $\varepsilon_{\text{общ}}$	0,31	0,35	0,39	0,43	0,46	0,49	0,51
плотность сухого грунта, кг/м ³	1 888	1 744	1 644	1 571	1 483	1 413	1 331
$\varepsilon_{\text{агрегат}}$	0,22	0,25	0,28	0,31	0,33	0,35	0,36
$\rho_{\text{агрег}}$, кг/м ³	2 133	2 055	1 977	1 898	1 840	1 781	1 742
$V_{\text{межагрегат}}$	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15
$V_{\text{агрегат}}$	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85
σ/R	0,09	0,13	0,18	0,22	0,26	0,30	0,32

⁵ СП 22.13330.2016. Свод правил. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054206>.

Таблица 2. Расчет размеров агрегатов в зависимости от коэффициента пористости и удельного сцепления.**Table 2.** Calculation of the size of aggregates depending on the porosity coefficient and specific adhesion.

коэффициент пористости, e	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,05
σ/R	0,09	0,13	0,18	0,22	0,26	0,30	0,32
σ , м	0,00006	0,00008	0,00010	0,00013	0,00016	0,00021	0,00025
R , м	0,00067	0,00058	0,00056	0,00058	0,00063	0,00069	0,00078
D , м	0,0028	0,0025	0,0025	0,0026	0,0028	0,0032	0,0036
C , КПа	69	65	62	60	58	57	56
z по СП 32-102-951, м	0,0045	0,0043	0,0041	0,0040	0,0038	0,0038	0,0037

Курсив – экстраполированные значения

Результаты и обсуждение

Для примера проведем расчеты размеров агрегатов супесей из различных грунтовых горизонтов. Разрез и лабораторное апробирование выполнены нами в 2020 г. на правом коренном берегу старицы реки Порусья, Приильменская низменность, Поддорский район, Новгородская область. Абсолютная отметка поверхности земли 79,5 м БС. Плотность частиц супесей согласно СП 22.13330.2016⁵: $\rho_s = 2,70$.

Были проанализированы следующие связные породы (рисунок 1):

1. Четвертичные отложения, супесь красно-коричневая, трещиноватая, горизонт 65–105 см. Линейные размеры устойчивых к воздействию воды агрегатов из горизонта: 1–4 мм.

2. Четвертичные отложения, пятнистая супесь, плотная, горизонт 500–545 см. Линейные размеры устойчивых к воздействию воды агрегатов из горизонта: 0,5–3 мм.

3. Четвертичные отложения, бордовая супесь, плотная, горизонт 545–565 см. Линейные размеры устойчивых к воздействию воды агрегатов из горизонта: 0,3–2 мм.

4. Четвертичные отложения, серо-голубая супесь, плотная, горизонт 565–590 см. Линейные размеры устойчивых к воздействию воды агрегатов из горизонта: 2–10 мм.

Сравнительные результаты усредненных измерений и рассчитанных значений линейных

размеров агрегатов по предложенной методике и методике СП 32-102-95¹ представлены в таблице 3. Коэффициент отношения пористости грунта в естественном залегании к внутренней пористости агрегатов принят равным 1,2. Расчетные значения в первом случае близки к минимальным размерам смытых потоком агрегатов. В количественном соотношении агрегатов минимального размера – 60–80% от общего числа.

Анализ зависимости (1) позволяет сделать вывод, что уменьшение значения сцепления приводит к уменьшению размеров агрегата. В нашем случае зависимость обратная. Другой вопрос, что чем меньше сцепление, тем менее прочен агрегат и меньше его плотность. Поскольку размыв, как и линия среза в приборе, предназначенном для испытания грунтов на срез, проходит по микропорам и трещинам в связном грунте, то именно размеры таких микротрещин и являются определяющими для оценки значения сцепления.

Надо иметь в виду, что при написании статьи нами использовался ограниченный объем фактического материала, а с учетом того, что в данной статье не рассматривается явление липкости грунта (агрегата), данный вопрос нуждается в дальнейшем изучении.

Проведем теоретический расчет значений сцепления исходя из измерений плотности агрегатов и расстояний между ними.

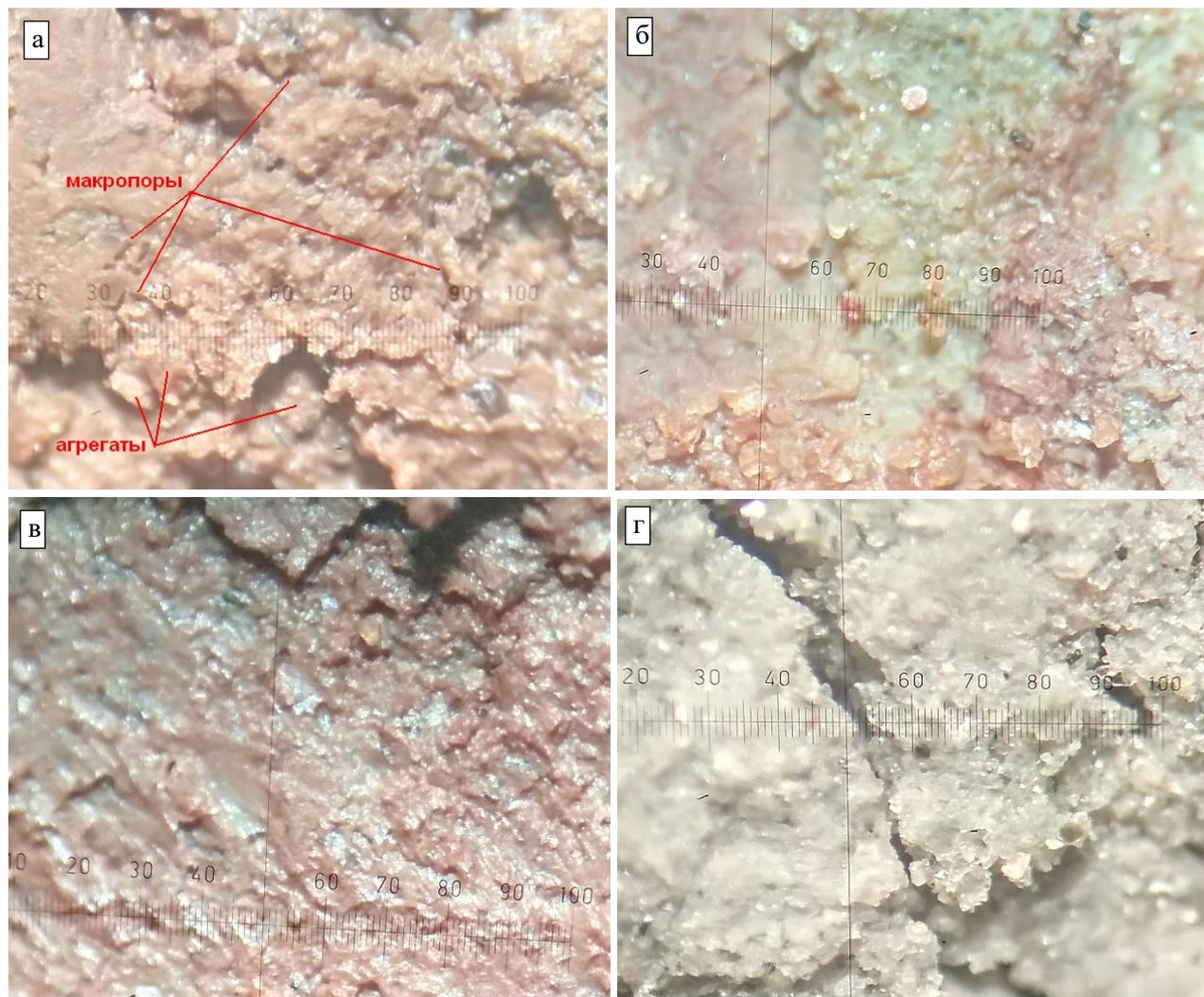


Рисунок 1. Связные грунты, подвергавшиеся анализу: а – красная супесь, горизонт 65–105 см в естественном залегании; б – пятнистая супесь, горизонт 500–545 см в естественном залегании; в – бордовая супесь, горизонт 545–565 см в естественном залегании; г – серо-голубая супесь, горизонт 565–590 см в естественном залегании.

Увеличение в 40 раз; цена деления линейной шкалы 10^{-5} м.

Figure 1. Cohesive soils that have been analyzed: а – red sandy loam, horizon 65–105 sm in natural occurrence; б – spotted sandy loam, horizon 500–545 sm in natural occurrence; в – burgundy sandy loam, horizon 545–565 sm in natural occurrence; г – gray-blue sandy loam, horizon 565–590 sm in natural occurrence. Forty-fold magnification; scale division value 10^{-5} meters.

Таблица 3. Рассчитанные линейные размеры устойчивых к воздействию воды агрегатов связного грунта.

Table 3. Calculated linear dimensions of water-resistant aggregates of cohesive soil.

порода	$\rho_{\text{е.з.}}, \text{ г/см}^3$	ϵ	$\epsilon_{\text{агрег}}$	$\rho_{\text{агрег}}, \text{ г/см}^3$	$\sigma, \text{ м}$	$Z_{\text{расчет}}$	$Z_{\text{измер}}$		$Z_{\text{СП}}$
							мин	сред	
мм									
1	1,81	0,49	0,41	1,92	0,000015	0,95	1	2	-
2	1,84	0,47	0,39	1,94	0,000009	0,73	0,5	1,5	-
3	1,88	0,44	0,36	1,98	0,000006	0,78	0,3	1	5,3
4	1,73	0,56	0,47	1,84	0,000005	1,94	2	4	2,6

Между двумя соседними агрегатами (отдельностями) в грунте имеет место сила гравитационного взаимодействия. Остальными силами (электрическими, электромагнитными, молекулярными) пренебрегаем ввиду малости и априорном отсутствии информации. Эта сила выражается зависимостью

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (4)$$

где G – гравитационная постоянная, равная $6,67 \cdot 10^{-11}$, Н·м²/кг²;

m_1, m_2 – масса агрегатов, кг;

r – расстояние между ними, м.

Для упрощения расчетов, будем предполагать в первом приближении, что агрегаты имеют шарообразную форму. Сцепление пород 3 и 4 оценено в 0,082 и 0,038 МПа соответственно.

Теперь необходимо оценить упаковку агрегатов в теле грунта. Характер упаковки определяется структурой и текстурой связного грунта. Согласно пункта 3.27 ГОСТ 25100-2020²: структура – пространственная организация элементов грунта, определяемая их размером и формой частиц, характером поверхности, количественным соотношением слагающих грунт элементов и характером структурных связей. Пункт 3.30 того же документа: текстура – характеристика строения, обусловленная ориентацией и пространственным расположением частиц грунта и его агрегатов.

Предположим, что агрегированная структура связного грунта имеет многослойную сотообразную или шаровидную плотную упаковку.

Простейшие из плотнейших упаковок – гексагональная и кубическая. В структуре с гексагональной плотнейшей упаковкой (далее – ГПУ) плотноупакованные слои чередуются таким образом, что третий располагается в точности над первым слоем, и поэтому октаэдрические пустоты (далее – ОП) непрерывно следуют вдоль направления, перпендикулярного плоскости слоев, так что создаются узкие каналы,

просматривающиеся насквозь. Тетраэдрические пустоты (далее – ТП) отделены друг от друга агрегатами (далее – А) таким образом, что образуется повторяющаяся последовательность А — ТП — А — ТП — ... Элементарная ячейка такой решетки – шестигранная призма, в которой А находятся в вершинах и в центре оснований призмы, а также внутри призмы – 3 агрегата. ГПУ содержит 12 агрегатов [Кемпбелл, 1975].

В структуре с кубической плотнейшей упаковкой из-за того, что поверх ОП, образованных агрегатами первого и второго слоев, размещены агрегаты третьего слоя, чередование пустот и шаров имеет иной вид: ОП — ТП — А — ТП — ОП — ... При одинаковой плотности упаковки они различаются не только расположением агрегатов, но и последовательностью чередования пустот. Коэффициент заполнения пространства для обеих видов упаковки – 74,05% [Белов, 1947].

Плотнупакованные структуры имеют соседями по 12 агрегатов [Павлов, Хохлов, 1985; Судзуки, Фудзимори, Хасимото, 1987].

Плотность обычной кубической упаковки – 52,36% [Баранцева, Мизонов, Хохлова, 2008].

Согласно гипотезе Иоганна Кеплера в 1611 году, доказанной Томасом Хейлзом в 2005 году, для монодисперсных (все частицы одного размера) сферических частиц в трехмерном пространстве плотнейшая упаковка составляет 74,05% или $\frac{\pi}{3\sqrt{2}}$, а координационное число равно 12 [Белов и др., 2015].

Слой кругов можно уложить двумя способами – плотным (контактное число 4) и плотнейшим (у каждого круга в слое 6 соседей). В плотной кубической кладке центры шаров расположены по вершинам примитивной кубической ячейки, плотность упаковки составляет 52,36%. Контактное число равно 6.

Для гексагональной кладки шаров элементарной ячейкой является примитивная гексагональная плотность упаковки 60,43%. Контактное число равно 8.

Таблица 4. Теоретический расчет сцепления грунта при помощи усредненных размеров агрегатов.
Table 4. Theoretical calculation of soil cohesion using average aggregate sizes.

Порода	ρ , г/см ³	$\rho_{\text{агрег}}$, г/см ³	$m_{\text{агрег}}$, кг	r , м	F_1 , Н	F_2 , Н	Кол-во агрегатов	$F_2 \cdot K$, Н	τ , МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	1,88	2,09	8,75E-06	0,0000015	2,27E-09	3E-08	8,12E+03	2,4E-04	0,06
4	1,73	2,01	2,27E-04	0,00002	4,84E-08	6,3E-07	1,27E+02	8E-04	0,02

В качестве рабочей гипотезы предполагается, что взаимное расположение агрегатов находится в гексагональной плотноупакованной решетке. Примерные расчеты приведены в таблице 4. Сила взаимодействия между двумя соседними агрегатами вычислена по формуле (4) и приведена в 6 столбце; в 7 столбце приведена суммарная сила притяжения со стороны соседних агрегатов для каждого агрегата; в 8 столбце – среднее количество агрегатов в сдвигаемой части прибора; в 9 столбце – суммарная удерживающая сила; в 10 столбце – отношение удерживающей силы к площади сдвига в приборе испытания грунта на срез (ГОСТ 20276.4-2020⁶).

По нашим наблюдениям достаточно крупные агрегаты, размерами около 1 см, оторвавшиеся при воздействии потока от основной массы связного грунта, при дальнейшем воздействии на них разрушаются на более мелкие и устойчивые.

Литература

Баранцева Е.А., Мизонов В.Е., Хохлова Ю.В. Процессы смешивания сыпучих материалов: моделирование, оптимизация, расчет. Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», 2008. 116 с.

Белов В.В., Образцов И.В., Иванов В.К., Коноплев Е.Н. Компьютерная реализация решения научно-технических и образовательных задач: учебное пособие. Тверь: ТвГТУ, 2015. 107 с.

Выводы

Предложен подход к оценке значения сцепления грунта, основанный на измерении линейных размеров и плотности агрегатов связного грунта. Основной минус предложенного подхода – необходимость тщательного измерения плотности породы в естественном залегании и отдельных агрегатов, а также средних расстояний между агрегатами. Последняя характеристика определяется достаточно субъективно.

Положительная сторона – подход имеет физическое обоснование.

Приведенная в СП 32-102-95 прямая линейная зависимость между значением сцепления грунта и размерами агрегатов не отвечает эмпирическим данным. С падением плотности грунта, его сцепление уменьшается, размеры агрегатов для большинства связных грунтов увеличиваются, при этом их прочность падает в дальнейшем они разрушаются на более мелкие и устойчивые.

References

Barantseva E.A., Mizonov V.E., Khokhlova Yu.V. *Protsessy smeshivaniya sypuchikh materialov: modelirovanie, optimizatsiya, raschet [Bulk materials mixing processes: modeling, optimization and calculation]*. Ivanovo, Publ. of Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet im. V.I. Lenina, 2008. 116 p. (In Russian).

Belov V.V., Obratsov I.V., Ivanov V.K., Konoplev E.N. *Komp'yuternaya realizatsiya resheniya nauchno-tekhnicheskikh i obrazovatel'nykh zadach: uchebnoe posobie [Computer implementation of the solution of*

⁶ ГОСТ 20276.4-2020. Межгосударственный стандарт. Грунты. Метод среза целиков грунта. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200174757>.

- Белов Н.В. Структура ионных кристаллов и металлических фаз. М.: Изд. АН СССР, 1947. 237 с.
- Воронин А.Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1984. 204 с.
- Казарновский В.Д., Лейтланд И.В., Мирошкин А.К. Основы нормирования и обеспечения требуемой степени уплотнения земляного полотна автомобильных дорог. М.: ФГУП «Союздорнии», 2002. 53 с.
- Кемпбел Дж.А. Современная общая химия. Том 3 / Пер. с англ. канд. хим. наук Е.Л. Розенберга; под ред. д-ра хим. наук проф. Е.М. Соколовской. М.: Мир, 1975. 446 с.
- Кокотов Ю.А. Исследование механической прочности, пористости и плотности воздушно-сухих почвенных агрегатов // Агрофизика. 2011. № 2. С. 50–54.
- Никитин В.П. Исследование технологии строительства цементогрунтовых дорожных одежд и перспективы ее совершенствования // Опыт и перспективы строительства автомобильных дорог с использованием местных материалов. Омск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1968. С. 93–110.
- Павлов П.В. Хохлов А.Ф. Физика твердого тела: учебное пособие для вузов по спец. "Физика". М.: Высшая школа, 1985. 384 с.
- Пестонова Е.А. Механическая прочность почвенной структуры: взаимосвязь с физическими свойствами и основной гидрофизической характеристикой. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М., 2007. 26 с.
- Соколов В.Н. Проблема лессов // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 9. С. 86–93.
- Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы / Под ред. проф. Ц. Масумото. Пер. с японского Е.И. Поляка; под ред. канд. техн. наук И.Б. Кекало. М.: Металлургия, 1987. 328 с.
- Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс): учебник для строительных вузов. М.: Высшая школа, 1983. 288 с.
- scientific, technical and educational problems: study guide]. Tver': Publ. of TvGSU, 2015. 107 p. (In Russian).*
- Belov N.V. *Struktura ionnykh kristallov i metallicheskih faz [Structure of ionic crystals and metallic phases]. Moscow, Publ. of AN SSSR, 1947. 237 p. (In Russian).*
- Voronin A.D. *Strukturno-funksional'naya gidrofizika pochv [Structural and functional hydrophysics of soils]. Moscow, Publ. of MSU, 1984. 204 p. (In Russian).*
- Kazarnovskii V.D., Leitland I.V., Miroshkin A.K. *Osnovy normirovaniya i obespecheniya trebuemoi stepeni uplotneniya zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog [Fundamentals of rationing and ensuring the required degree of compaction of the subgrade of highways]. Moscow, Publ. Soyuzdornii, 2002. 53 p. (In Russian).*
- Campbell J.A. *Chemical systems. Energetics, dynamics, structure. San Francisco, Publ. W.H. Freeman and company, 1970. 1095 p. (Russ. ed.: Kempbel Dzh.A. Sovremennaya obshchaya khimiya. Tom 3 / Per. s angl. kand. khim. nauk E.L. Rozenberga; pod red. d-ra khim. nauk prof. E.M. Sokolovskoi. Moscow, Publ. Mir, 1975. 446 p.)*
- Kokotov Yu.A. *Issledovanie mekhanicheskoi prochnosti, poristosti i plotnosti vozduшно-sukhikh pochvennykh agregatov [Investigation of mechanical properties, porosity and density of air-dry soil aggregates]. Agrofizika [Agrophysics], 2011, no. 2, pp. 50–54. (In Russian; abstract in English).*
- Pavlov P.V. Khokhlov A.F. *Fizika tverdogo tela: uchebnoe posobie dlya vuzov po spetsial'nosti "Fizika" [Solid state physics. Study guide for students]. Moscow, Publ. Vysshaya shkola, 1985. 384 p. (In Russian).*
- Pestonova E.A. *Mekhanicheskaya prochnost' pochvennoi struktury: vzaimosvyaz' s fizicheskimi svoystvami i osnovnoi gidrofizicheskoi kharakteristikoi. Avtoref. diss. kand. biol. nauk [Mechanical strength of soil structure: relationship with physical properties and the main hydrophysical*

characteristic. Ph. D. (Biology) Thesis]. Moscow, 2007. 26 p. (In Russian).

Sokolov V.N. Problema lessov [Loess problem]. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal [Soros educational journal]*, 1996, no. 9, pp. 86–93. (In Russian; abstract in English).

Sudzuki K., Fudzimori Kh., Khasimoto K. *Amorfnye metally [Amorphous metals]*. Moscow, Publ. Metallurgiya, 1987. 328 p. (In Russian, translation from Japanese).

Tsytovich N.A. *Mekhanika gruntov (kratkii kurs): uchebnik dlya stroitel'nykh vuzov [Soil mechanics (short course): a textbook for construction universities]*. Moscow, Publ. Vysshaya shkola, 1983. 288 p. (In Russian).