

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 625.7:624

DOI:10.18324/2077-5415-2025-2-78-85

Физика уплотнения грунтов земляного полотна ведомственных автомобильных дорог с учетом агрегатного состава

Ю.А. Боровлев^{1а}, Д.Г. Козлов^{2б}, А.В. Скрыпников^{3с}, А.С. Сергеев^{4д}, А.Ю. Жук^{5е}¹Военновоздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, ул. Старых Большевиков, 54а, Воронеж, Россия²Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, ул. Мичурина 1, Воронеж, Россия³Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр. Революции, 19, Воронеж, Россия⁴Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский проспект 29, Пермь, Россия⁵Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия^а borov.borov.ar@yandex.ru, ^б dimvsau@mail.ru, ^с skrypnikovsafe@mail.ru, ^д pnipu_sk@mail.ru^а <https://orcid.org/0000-0003-3702-6194>, ^б <https://orcid.org/0000-0003-0817-9300>,^с <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>, ^д <https://orcid.org/0000-0002-5487-3987>,^е <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>

Статья поступила 11.02.2025, принята 28.04.2025

В статье проведен анализ физики уплотнения грунта при строительстве лесных дорог с учетом состава заполнителя. Свойства почв, которые представляют собой многофазные, полидисперсные системы, в значительной степени определяются соотношением между фазами, а также структурой и структурными связями между элементами фазы. В работе описывается твердая фаза почв как состоящая из частиц разного размера. Прочность и деформируемость грунтов определяются прочностью и характером связей между частицами и заполнителями. Проведен анализ влияния пневматических шин на уплотненный слой, что включает увеличение количества частиц на единицу объема, разрушение слабых агрегатов почвы, вытеснение воздуха из пор и сжатие водяных пленок вокруг частиц. На основе математического анализа напряженного состояния заполнителей были определены вероятности обнаружения дефектов и максимального контактного напряжения. Прочность крупных заполнителей ниже из-за высокой вероятности наличия трещин и дефектов. Приведены данные о допустимом напряжении для различных типов почвы, зависящем от размера заполнителей и содержания частиц глины. На основании полученных данных было выявлено, что при уплотнении почвы слабые заполнители с большим количеством дефектов должны быть сначала разрушены, а затем их следует свести как можно ближе друг к другу при условии, что максимальное контактное напряжение не превышает допустимого. Это приведет к максимальной прочности структуры почвы. Представленные данные можно использовать при проектировании уплотненных грунтов. Снижение прочности заполнителей с увеличением размера и, следовательно, снижение общей прочности системы следует учитывать при проектировании уплотнения.

Ключевые слова: прочность грунта; деформируемость частиц; структура грунта; тип грунта.

Physics of soil compaction of the roadbed of departmental highways, taking into account the aggregate composition

Yu.A. Borovlev^{1а}, D.G. Kozlov^{2б}, A.V. Skrypnikov^{3с}, A.S. Sergeev^{4д}, A.Yu. Zhuk^{5е}¹ Air Force Academy named after N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin; 54a, Starykh Bolshevikov St., Voronezh, Russia² Voronezh State Agrarian University named after Peter the Great; 1, Michurin St., Voronezh, Russia³ Voronezh State University of Engineering Technologies; 19, Revolyutsii Ave., Voronezh, Russia⁴ Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky Pros., Perm, Russia⁵ Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia^а borov.borov.ar@yandex.ru, ^б dimvsau@mail.ru, ^с skrypnikovsafe@mail.ru, ^д pnipu_sk@mail.ru^а <https://orcid.org/0000-0003-3702-6194>, ^б <https://orcid.org/0000-0003-0817-9300>,^с <https://orcid.org/0000-0003-1073-9151>, ^д <https://orcid.org/0000-0002-5487-3987>,^е <https://orcid.org/0000-0002-8307-6945>

Received 11.02.2025, accepted 28.04.2025

The article analyzes the physics of soil compaction in the construction of forest roads, taking into account the composition of the filler. The properties of soils, which are multiphase, polydisperse systems, are largely determined by the relationship between the phases, as well as the structure and structural relationships between the elements of the phase. The paper describes the solid phase of soils as consisting of particles of different sizes. The strength and deformability of soils are determined by the strength and nature of the bonds between particles and aggregates. The effect of pneumatic tires on the compacted layer is analyzed, which includes an increase in the number of particles per unit volume, destruction of weak soil aggregates, displacement of air from the pores and compression of water films around the particles. Based on the mathematical analysis of the stress state of the fillers, the probabilities of detecting defects and maximum contact stress are determined. The strength of large aggregates is lower due to the high probability of cracks and defects. Data on the permissible stress for different types of soil, depending on the size of aggregates and the content of clay particles, are presented. Based on the data obtained, it has been found that when compacting the soil, weak aggregates with a large number of defects should first be destroyed, and then they should be brought as close as possible to each other, provided that the maximum contact voltage does not exceed the permissible one. This will lead to maximum strength of the soil structure. The presented data can be used in the design of compacted soils. The decrease in strength of the aggregates with increasing size and hence the decrease in the overall strength of the system should be taken into account when designing compaction.

Keywords: soil strength; particle deformability; soil structure; soil type.

Введение. Грунты представляют собой сложные многофазные системы, состоящие из твердой, жидкой и газообразной фаз, дисперсность которых обуславливает их уникальные инженерно-геологические свойства. Твердая фаза, являющаяся основой грунта, состоит из минеральных частиц разнообразных размеров и форм – от глинистых частиц коллоидных размеров ($< 0,005$ мм) до песчаных и гравийных (> 2 мм). Соотношение этих фракций определяет гранулометрический состав грунта, существенно влияющий на его механические характеристики. Важнейшую роль играет не только размер частиц, но и их минералогический состав, определяющий свойства поверхности частиц и, как следствие, характер взаимодействия между ними. К примеру, присутствие монтмориллонита в глинистой фракции значительно увеличивает набухаемость и пластичность грунта по сравнению с каолинитом [1–4].

В связных грунтах, таких как глины и суглинки, частицы не только находятся в контакте друг с другом, но и объединены в более крупные структурные элементы – микро- и макроагрегаты. Микроагрегаты представляют собой относительно прочные образования, цементированные различными веществами. Прочность самих минеральных частиц, составляющих грунт, чрезвычайно высока. Эксперименты показывают, что даже при колоссальных давлениях (7000 кг/см² и более) структура отдельных минеральных зерен остается неизменной, разрушение происходит на уровне связей между частицами, а не внутри них самих. Это подтверждает, что деформируемость и прочность грунта в целом определяются не прочностью отдельных частиц, а прочностью и типом межчастичных связей.

Межчастичные связи в грунтах весьма разнообразны. В микроагрегатах преобладают прочные кристаллизационные связи, формирующиеся за счет выпадения в порах растворенных солей (карбонаты, сульфаты и др.) или образования новых минералов (например, цеолитов). Такие связи обеспечивают водостойчивость микроагрегатов, что крайне важно для инженерных сооружений. Связи в макроагрегатах, напротив, менее прочны и часто имеют коагуляционно-конденсационную природу. Коагуляционные связи возникают из-за электростатического взаимодействия между частицами, а конденсационные – за счет образования мостиков между частицами (например, с помощью ионов или органических веществ). Прочность макроагрегатов существен-

но ниже, чем микроагрегатов, и значительно зависит от влажности грунта. При влажности, превышающей некоторую критическую величину (обычно около 0,5 от оптимальной влажности для уплотнения), коагуляционные связи ослабевают, что приводит к снижению прочности макроструктуры грунта [5–9].

Более того, влияние влажности на прочность грунта сложно оценить без учета минералогического состава. Глинистые минералы обладают высокой поверхностной активностью, поэтому вода, адсорбируясь на их поверхности, образует прочные водные пленки, которые способствуют как образованию, так и разрушению связей. Поэтому инженерно-геологические изыскания должны обязательно учитывать не только гранулометрический состав, но и минералогический анализ грунта для определения его прочностных свойств и поведения при различных условиях эксплуатации. Кроме того, следует учитывать влияние органических веществ, которые могут существенно изменять свойства грунта, а также наличие в грунте различных включений (например, растительных остатков), влияющих на его структуру и механические свойства. В заключение отметим, что изучение микроструктуры грунтов с помощью современных методов (сканирующая электронная микроскопия, рентгенодифракция и др.) позволяет получить детальное представление о природе межчастичных связей и, как следствие, более точно прогнозировать поведение грунта под нагрузкой. Это крайне важно для проектирования и строительства надежных и долговечных инженерных сооружений.

Постановка задачи. Уплотнение грунтов – сложный физико-механический процесс, зависящий от множества факторов, включая минералогический и гранулометрический состав, влажность и структуру грунта. Грунты представляют собой дисперсные системы, состоящие из минеральных частиц различного размера, объединенных в агрегаты различной прочности. Они, в свою очередь, формируют более крупные структурные образования – макроагрегаты, образуя так называемую полиагрегатную структуру. Ее прочность определяется не только прочностью внутриагрегатных связей (связи между частицами внутри агрегата), но и силами взаимодействия между самими агрегатами (межагрегатные связи). Эти силы могут быть различной природы: когезионные (силы сцепления), адгези-

онные (силы прилипания к воде и другим веществам) и силы трения.

Процесс уплотнения направлен на разрушение слабых межагрегатных и внутриагрегатных связей, приводящее к более плотной упаковке частиц и, следовательно, к увеличению плотности и прочности грунта. Внешнее воздействие, например, от колес дорожной техники, приводит к деформации и разрушению структурных элементов грунта. В этот момент происходит несколько взаимосвязанных процессов, описанных ниже.

1. Увеличение объемной концентрации. Когда количество частиц и агрегатов в единице объема увеличивается за счет их сближения. Это сближение обусловлено вытеснением воздуха из пор грунта. Эффективность уплотнения во многом зависит от гранулометрического состава. Грунты с широким гранулометрическим составом (хорошо градируемые) обычно уплотняются лучше, чем однородные (пески или глины), поскольку мелкие частицы заполняют пустоты между крупными, обеспечивая более плотную упаковку.

2. Разрушение агрегатов. При достаточном давлении происходит разрушение агрегатов с непрочными связями, преимущественно коагуляционно-конденсационного типа (образуются за счет сил Ван-дер-Ваальса и водородных связей). Это разрушение может быть частичным или полным, в зависимости от интенсивности нагрузки и прочности самих агрегатов. Разрушение агрегатов приводит к изменению пористости и водонасыщенности грунта.

3. Перераспределение влаги. Происходит в том случае, когда разрушение агрегатов сопровождается перераспределением влаги в порах грунта. Вода, ранее удерживаемая в агрегатах, может перемещаться в межагрегатное пространство, что влияет на процессы уплотнения. Оптимальная влажность грунта для уплотнения (влажность оптимального уплотнения) – это такое содержание влаги, при котором достигается максимальная плотность грунта при заданном усилии уплотнения. При влажности ниже или выше оптимальной плотность уплотненного грунта будет меньше.

4. Вытеснение воздуха. Воздух из пор грунта вытесняется как за счет сближения частиц, так и за счет пластической деформации грунта. Этот процесс является одним из основных механизмов увеличения плотности грунта. Скорость вытеснения воздуха зависит от проницаемости грунта, которая, в свою очередь, зависит от его структуры и влажности.

5. Сжатие водных пленок. Вода, окружающая частицы и агрегаты грунта в виде тонких пленок, сжимается под воздействием нагрузки. Это приводит к дополнительному уменьшению объема грунта и увеличению плотности. Однако избыток воды может препятствовать уплотнению, так как она заполняет поры и мешает сближению частиц.

Увеличение объемного веса скелета грунта (т. е. твердой фазы) – основной показатель эффективности уплотнения. В начальный период уплотнения этот показатель растет наиболее интенсивно, а пористость грунта резко снижается. Макроагрегаты с низкой прочностью разрушаются, а более прочные остаются, формируя новую, более компактную структуру. Микроагрегаты, как

правило, более устойчивы к разрушению и заполняют пустоты между макроагрегатами.

Рост прочности грунта коррелирует с увеличением объемного веса скелета, однако эта зависимость нелинейна и имеет определенный предел. Резкое падение прочности наблюдается при достижении определенного уровня уплотнения

$$\delta \geq (1,01 - 1,08)\delta_{\text{ст}},$$

где δ – текущая плотность, а $\delta_{\text{ст}}$ – плотность сухого грунта.

Это объясняется тем, что при чрезмерном уплотнении возможны повреждения структуры, например, образование микротрещин, снижающих прочностные характеристики.

Кроме того, необходимо учитывать влияние типа уплотняющего оборудования. Различные типы катков (гладкие, вибрационные, пневмоколесные) обеспечивают различную эффективность уплотнения в зависимости от типа грунта и требуемой степени уплотнения. Пневмоколесные катки, например, создают более равномерное уплотнение по сравнению с гладкими, особенно на грунтах со слоистой структурой. Также необходимо учитывать число проходов катка, так как повторные проходы увеличивают степень уплотнения, но и вероятность переуплотнения. Оптимальное количество проходов определяется экспериментально с учетом технических характеристик оборудования и свойств грунта. Влияние таких факторов, как температура грунта, длительность уплотнения также важны и требуют учета в процессе проектирования и строительства.

Решение задачи. Анализ существующих литературных источников, касающихся влияния размеров агрегатов и их состава на прочность и уплотняемость грунтов, показывает, что таких исследований крайне мало, и большинство из них имеет экспериментальный характер. Особенно это касается неукрепленных грунтов, для которых влияние агрегатного состава на прочность практически не изучено. Это можно заметить по тому, что в текущей инструктивной литературе, посвященной технологии возведения земляного полотна, отсутствуют глубокие исследования по данному вопросу [10–16].

При рассмотрении влияния размеров грунтового агрегата на прочность грунта можно выделить несколько ключевых аспектов. На начальном этапе анализа можно представить массив грунта состоящим из агрегатов одинаковых размеров. В этом случае к каждому агрегату будет приложена нагрузка в точках их контакта с другими агрегатами (рис. 1). Для более точной оценки напряженного состояния таких агрегатов целесообразно использовать контактную задачу теории упругости. Ее предположения в данном контексте могут быть выполнены с различной степенью точности [17–20].

Важно отметить, что размер агрегатов не только влияет на прочность грунта, но и на его уплотняемость. Чем меньше размер агрегатов, тем более равномерно распределяется нагрузка, что может привести к увеличению прочности грунта. Однако, с другой стороны,

слишком мелкие агрегаты могут привести к образованию излишней пластичности, что негативно скажется на устойчивости грунтовых массивов. Таким образом, оптимальный размер агрегатов играет ключевую роль в обеспечении прочности и стабильности грунтов.

Кроме того, состав агрегатов также имеет большое значение. Различные минералогические составы могут влиять на взаимодействие частиц между собой, тем самым изменяя механические свойства грунта. Например, наличие глинистых минералов может увеличить пластичность, тогда как песчаные или гравийные частицы могут способствовать улучшению дренажных характеристик и, как следствие, уменьшению водонасыщенности грунта.

Также можно сказать, что для более глубокого понимания влияния размеров агрегатов и их состава на прочность и уплотняемость грунтов необходимо проводить дополнительные исследования. Это позволит не только улучшить существующие строительные технологии, но и разработать новые методы, способствующие повышению надежности и долговечности земляных конструкций.

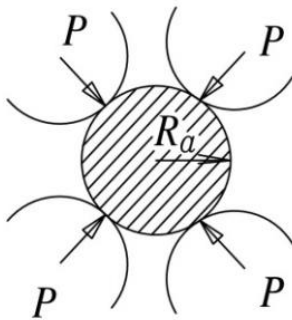


Рис. 1. Приложение нагрузки в точках контакта с другими агрегатами

Пусть на агрегат в точке контакта действует нагрузка P . Тогда максимальное контактное напряжение σ_{max} будет выражено как

$$\sigma_{max} = 0,388 \sqrt[3]{\frac{PE^2}{R_a^2}} \quad (1)$$

где E – модуль упругости агрегата; R_a – размер агрегата (см. рис. 1).

Если на грунт действует нагрузка Q , то она в среднем распределяется между n агрегатами, т. е.

$$P = K_1 \frac{Q}{n} \quad (2)$$

где K_1 – коэффициент зависящей от структуры грунта.

Так как число агрегатов на единице площади распределения нагрузки обратно пропорционально объему каждого агрегата, то

$$n = \frac{1}{K_2 R_a^3} \quad (3)$$

где K_2 – коэффициент формы для шара, $K_2 = 4,189$.

В общем случае

$$n = \frac{1}{K_2' R_a^3} \quad (4)$$

Отсюда, подставляя значение (3) в (2) получим величину нагрузки, действующей на агрегат

$$P = K_1 K_2 Q R_a^3 \quad (5)$$

Выражение (5) говорит о том, что с уменьшением размера агрегата нагрузки, действующие на него, быстро уменьшаются (рис. 2). Подставляя (5) в первоначальное выражение (1), найдем величину максимальных контактных напряжений

$$\sigma_{max} = 0,388 \sqrt[3]{K_1 K_2 Q E^2 R_a} \quad (6)$$

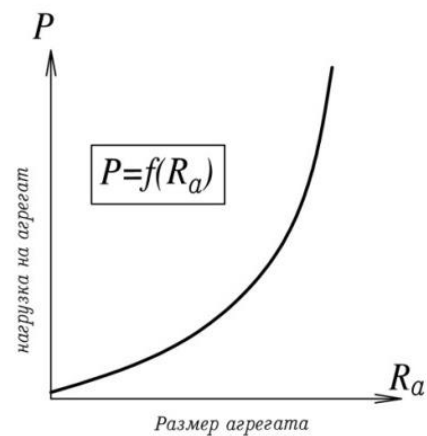


Рис. 2. Зависимость размера агрегата, от нагрузки, действующей на него

То есть при принятых предпосылках максимальные контактные напряжения медленно растут с увеличением R_a , E и Q (рис. 3).

Прочность больших агрегатов меньше прочности малых. В больших большая вероятность наличия трещин и ослабленных мест. Если вероятность появления трещин в единице объема постоянна, то чем больше объем (то есть чем больше агрегат), тем выше вероятность нахождения в нем трещин. Но трещина – это разрушение, поэтому вероятность разрушения крупных агрегатов больше, чем мелких.

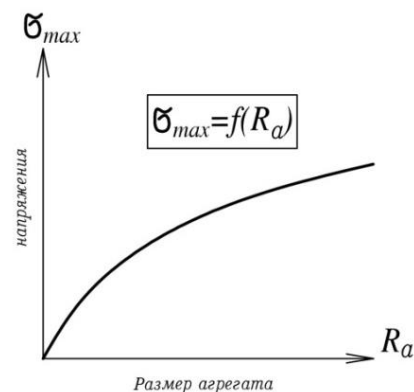


Рис. 3. Зависимость напряжения от размера агрегата

Если p обозначает малую вероятность того, что событие произойдет при каком-либо испытании, то p_{mn} – что оно случится m раз при очень большом числе испытаний n . p_{mn} приближенно равно

$$p_{mn} = \frac{(np)^m e^{-np}}{m!} \quad (7)$$

Рассмотрим грунтовый агрегат радиусом R_a и объемом V_a .

Среднее число трещин или ослаблений на единицу объема в материале – K . Оно зависит от генезиса грунта, его структуры, прочности связей и т. д. Вероятность нахождения одной трещины в элементарном объеме dV_a , выделенном в агрегате, равна

$$p = K dV_a \quad (8)$$

Если объем агрегата V_a , то можно предположить, что каждый элементарный объем dV_a есть одно испытание. Тогда общее число испытаний, необходимое для того, чтобы обойти весь объем агрегата, будет равно

$$n = \frac{V_a}{dV_a}, \quad (9)$$

тогда

$$pn = KV_a \quad (10)$$

$$p = K dV_a \quad (11)$$

Подставляя значение pn , в выражение (7), получим вероятность p_{mn} обнаружения m трещин в агрегате объема V_a .

$$p_{mn} = \frac{(KV_a)^m}{m!} e^{-KV_a} \quad (12)$$

Перейдем к размерам агрегата и опустим индекс у p_{mn}

$$V_a = K_2 R_a^3 \quad (13)$$

тогда

$$P = A_1 K^m (K_2 R_a^3)^m * e^{-KK_2 R_a^3}, \quad (14)$$

где A_1, K, K_2 – коэффициенты, характеризующие материал, т. е. для рассматриваемого случая являются const; m – определяет допустимое число трещин в агрегате.

Представим (13) в виде

$$P = AR_a^{3m} e^{-BR_a^3}, \quad (15)$$

где

$$A = A_1 (K * K_2)^m \quad (16)$$

$$B = K_2 K \quad (17)$$

Если $R_a \rightarrow 0$, то $P \rightarrow 0$, т. е. малые агрегаты бездефектны и обладают максимальной прочностью. Зави-

симость (15) пригодна только при малых K (малая вероятность). Нас, кроме того, интересуют малые R_a , тогда $B \rightarrow 0$; $K \rightarrow 0$, R_a мало и $e^{-BR_a^3} \approx 1$, поэтому

$$P \approx AR_a^{3m} \quad (18)$$

Если $m = 1$, то $P \approx AR_a^3$

В общем случае

$$P \approx AR_a^{3m} \approx AR_a^{K_3}, \quad (19)$$

где $K_3 = 3m$.

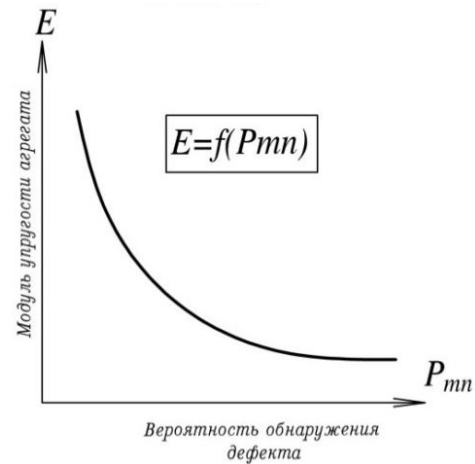
То есть вероятность обнаружения критического числа трещин и дефектов в структуре агрегата возрастает с увеличением размера агрегата очень быстро: пропорционально кубу или более высокой степени их размера, т. е. малые агрегаты намного прочнее больших.

В соответствии с вышеизложенным введем положение: модуль упругости (E) обратно пропорционален вероятности обнаружения дефекта.

$$E = \frac{C}{P}, \quad (20)$$

где C – постоянная; P – вероятность обнаружения дефекта.

Зависимость справедлива в некотором интервале P т. е. не годна для бездефектных материалов (см. рис. 3, рис. 4).

**Рис. 4.** Вероятность обнаружения дефекта

Подставляя в (20) P по зависимости (19) получим

$$E = \frac{C}{AR_a^{K_3}} \quad (21)$$

Для обеспечения размерностей представим (21) в виде

$$E = E_0 \left(\frac{R_0}{R_a}\right)^{K_3}, \quad (22)$$

где R_0 – характерный размер «бездефектного» агрегата; E_0 – максимально возможный модуль упругости.

Далее, подставив (22) в выражение (6), получим

$$\sigma_{max} = 0,388 \sqrt[3]{K_1 K_2 Q E_0^2 \frac{R_0^{2K_3}}{R_a^{2K_3}}} \quad (23)$$

или

$$\sigma_{max} = C^1 * E_0^{\frac{2}{3}} * Q^{\frac{1}{3}} * R_0^{\frac{2}{3}K_3} * R_a^{-\frac{2}{3}K_3} \quad (24)$$

Максимальное контактное напряжение не должно превышать допустимого напряжения для данного агрегата

$$[\sigma] = K' E_0 \left(\frac{R_0}{R_a} \right)^{K_3} \quad (25)$$

Если $\sigma_{max} < [\sigma]$, то в этом случае агрегаты не разрушаются, и прочность системы не понижается. Таким образом, при уплотнении грунта необходимо вначале разрушить непрочные агрегаты с большим количеством дефектов, а затем их максимально сблизить с условием, чтобы $\sigma_{max} \leq [\sigma]$, при этом прочность грунтовой структуры будет максимальной.

Допускаемое напряжение для агрегатов различных типов грунтов будет различным. При этом оно будет зависеть от размера агрегатов и процентного содержания глинистых частиц [3–6].

Нами обработаны данные с целью определения допускаемого напряжения на агрегаты размером 3–5 мм для различных типов почвогрунтов. Эти данные приведены на рис. 5 и в табл. 1. Как показывают данные, допускаемое напряжение для агрегатов 3–5 мм не должно превышать максимальных величин в пределах 1,5–9,0 кг/см² для различных грунтов. Чем больше процент содержания глинистой фракции в грунтах, тем

выше может быть допускаемое напряжение. Причем, для отдельных видов грунтов, у которых, по видимому, кроме глинистых частиц, участвующих в качестве склеивающего вещества в грунтах, имеются другие клеи, допускаемое напряжение может существенно увеличиваться либо уменьшаться, чем объясняется разброс точек на графике (см. рис. 5, точки 3, 9, 8, 11, 15).

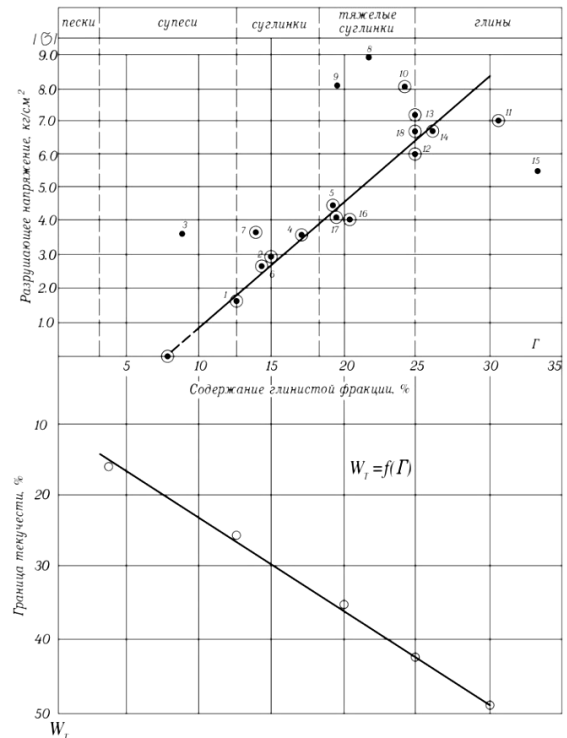


Рис. 5. Определения допускаемого напряжения на агрегаты размером 3–5 мм для различных типов почвогрунтов

№	Тип почвы	Горизонт	Содержание частиц 0,001 мм, %	Содержание углерода органических веществ, %	Механическая прочность агрегата, г/0,01 г	Объемный вес агрегата, г/см³	Содержание водопорочных агрегатов в %	Вес агрегата 3–5 мм, г	Нагрузка на агрегат, кг	Допускаемое напряжение кг/см²
1	Дерново-подзолистая	A ₁	12,0	1,13	65	1,04	85,8	0,0331	0,216	1,6
2	- // -	A _{пах}	14,0	1,25	99	1,17	43,4	0,0372	0,368	2,74
3	Сильно окультуренная	A _{пах}	8,0	1,94	109	1,33	85,5	0,0424	0,463	3,45
4	Светло-серая лесная	A ₁	16,7	1,48	143	1,08	55,7	0,0344	0,494	3,68
5	Светло-серая	A _{пах}	19,4	1,47	145	1,29	17,0	0,0410	0,596	4,46
6	- // -	A _{пах}	14,4	1,35	97	1,29	11,0	0,0410	0,398	2,96
7	Серая лесная	A ₁	13,5	1,48	133	1,26	80,3	0,0400	0,506	3,78
8	- // -	A _{пах}	21,8	1,62	204	1,83	33,1	0,0603	1,205	9,00
9	- // -	- // -	19,4	1,64	193	-	38,6	0,0574	1,110	8,26
10	Чернозем	- // -	24,3	4,31	192	1,80	88,0	0,574	1,100	8,23
11	- // -	- // -	31,5	3,51	162	1,80	75,0	0,0574	0,928	6,94
12	Темно-каштановая	- // -	24,9	1,94	176	1,48	8,1	0,0471	0,830	6,20
13	Каштановая	A ₁	25,0	0,86	193	1,62	24,6	0,0516	0,996	7,43
14	- // -	A _{пах}	26,2	1,13	203	1,41	22,3	0,0449	0,913	6,81
15	Краснозем	- // -	34,5	2,83	256	0,91	94,6	0,0290	0,743	5,56
16	Субтропическая оподзолен	A ₁	20,2	2,57	168	1,01	74,8	0,0322	0,452	4,05
17	Лугово-мерзлотная	A _{пах}	19,4	3,09	160	1,14	-	0,0363	0,582	4,34
18	Аллювиальная	- // -	25,0	2,34	200	1,39	-	0,0453	0,908	6,77

Примечание. Прочерк – данные отсутствуют.

Ниже приводим пределы колебания допускаемого напряжения для агрегатов размером 3–5 мм различных типов грунтов табл. 2.

Таблица 2. Пределы колебания допускаемого напряжения для агрегатов размером 3–5 мм различных типов грунтов

Наименование грунтов	Содержание глинистой фракции, %	Граница текучести, %	Допускаемое напряжение для агрегатов 3–5 мм, кг/см ²
Супеси	3–12	16–26	< 1,7
Суглинки	12–18	26–36	1,7–4,0
Тяжелые суглинки	18–25	36–42	4,0–9,0
Глины	> 25	> 42	> 8,0

Н.Я. Хархута [21] получил пределы прочности грунтов в зависимости от процентного содержания глинистых частиц, плотности, влажности и диаметра штампа, а также скорости изменения напряженного состояния (26). Данные, приведенные в табл. 2, согласуются с данными данного автора.

Для ориентировочных подсчетов допускаемых напряжений может быть использована следующая зависимость между $[\sigma]$ и количеством глинистой фракции Γ .

$$[\sigma] = -2,45 + 0,35\Gamma \quad (26)$$

Приведенные данные могут быть использованы при проектировании уплотненных грунтов.

Так, например, агрегаты крупнее 3–5 мм супесей и суглинков будут разрушаться катками на пневмати-

ческих шинах, имеющих контактные давления 5,5–6,0 кг/см². В то же время эти катки не будут разрушать агрегаты тяжелых суглинков и глин, поэтому для увеличения прочности грунта требуется разрушать агрегаты дополнительными механизмами – фрезой.

Выводы. Теоретические исследования в области механики материалов указывают на то, что увеличение радиуса агрегатов R_a приводит к снижению их прочности. Это связано с тем, что более крупные агрегаты могут иметь внутренние дефекты, которые, в свою очередь, ослабляют их структуру. Снижение прочности отдельных компонентов напрямую отражается на прочности всей системы, что является критически важным аспектом при проектировании уплотнений и других конструкций.

При проектировании уплотнений необходимо учитывать не только размер агрегатов, но и их распределение, форму, а также материал, из которого они изготовлены. Например, в некоторых случаях использование более мелких агрегатов может улучшить прочностные характеристики системы, так как они могут обеспечить более равномерное распределение нагрузки и снизить вероятность возникновения дефектов.

Кроме того, важно учитывать влияние внешних факторов, таких как температура, влажность и химическая среда, в которой будет эксплуатироваться уплотнение. Они могут существенно повлиять на прочность как отдельных агрегатов, так и всей системы в целом. Таким образом, для достижения оптимальных результатов в проектировании уплотнений необходимо проводить комплексный анализ, учитывающий все вышеперечисленные аспекты.

Литература

1. Козлов Д.Г., Скрыпников А.В., Боровлев Ю.А., Романов П.О., Сергеев А.С., Карпов А.С. Укрепление грунтов земляного полотна ведомственных автомобильных дорог: монография. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. аграр. ун-та, 2024. 128 с.
2. Хомяк Я.В. Проектирование сетей автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1983. 207 с.
3. Викулин И.А., Скрыпников А.В., Козлов Д.Г., Боровлев Ю.А., Сергеев А.С. Показатели земляного полотна лесовозных автомобильных дорог укрепленных вяжущими // Деревообрабатывающая промышленность. 2024. № 2. С. 3-9.
4. Викулин И.А., Скрыпников А.В., Козлов Д.Г., Боровлев Ю.А., Сергеев А.С. Водостойкость грунтов земляного полотна лесовозных автомобильных дорог укрепленных шлакосиликатным вяжущим // Деревообрабатывающая промышленность. 2024. № 2. С. 30-37.
5. Козлов Д.Г., Сапелкин Р.С., Скрыпников А.В., Зеликов В.А., Микова Е.Ю., Казачек М.Н. Методологические основы регулирования водно-теплового режима лесовозных автомобильных дорог: монография. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. аграр. ун-та, 2023. 110 с.
6. Nikitin V.V., Kozlov V.G., Skrypnikov A.V., Pilyushina G.A., Kozlov D.G., Bryukhovetsky A.N., Vysotskaya I.A., Denisenko V.V. Development of Mathematical Models for Optimization of the Road Network, Taking into Account Geographical and Natural Factors // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes: Proceedings of 8th Internat. Scientific Conference-School for Young Scientists (Cham, 01 января – 31. 2022 года). Cham: Springer, 2023. P. 315-330.
7. Константинов А.Р. Испарение в природе. Ленинград: Гидрометеиздат, 1968. 59 с.
8. Мезенцев В.С. Расчеты водного баланса. Омск: изд-во Омск. гос. сельскохозяй. ин-та, 1976. 74 с.
9. Тимофеев В.А., Козлов Д.Г., Рябова О.В., Скрыпников А.В. Исследование факторов технологии строительства лесовозных автомобильных дорог, влияющих на изменчивость структуры и прочности укрепленных грунтов // Строительные и дорожные машины. 2023. № 7. С. 31-36.
10. Khomyak Ya.V. Design of highway networks. M.: Transport, 1983, 207 p.
11. Tikhomirov P.V., Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Bondarev A.B., Kazachek M.N., Bryukhovetskiy A.N. Analysis of modern methods of surveying logging roads // Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy. 2023. № 242. P. 179-188.
12. Тимофеев В.А., Козлов Д.Г., Скрыпников А.А., Микова Е.Ю., Левушкин Д.М. Экспериментальные исследования однородности прочности укрепленных грунтов // Строительные и дорожные машины. 2023. № 7. С. 37-43.
13. Брюховецкий А.Н., Скрыпников А.В., Козлов Д.Г., Романов П.В., Бойков П.А., Казачек М.Н. Структурная схема исследования тепловлажностных свойств грунтов лесовозных автомобильных дорог // Лесной вестник. 2023. Т.27, № 6. С. 126-138.
14. Kozlov V.G. Methods, models and algorithms for designing logging roads, taking into account the influence of climate and weather on traffic conditions: dis. ... doctor of Technical

Sciences. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2017. 406 p.

15. Bondarev A.B., Kozlov D.G. Survey of the operational state of logging roads // Energy efficiency and energy saving in modern production and society: Proceedings of the internat. scientific and practical conf., Voronezh, June 06-07, 2022. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022. P. 196-200.
16. Николаевский В.Н., Басниев К.С., Горбунов А.Т., Зотов Г.А. Механика насыщенных пористых сред. Москва: Недра, 1970. 339 с.
17. Acheson D.J. Elementary Fluid Dynamics. Oxford: Clarendon Press, 2005. 397 p.
18. Cussler E. Diffusion: mass transfer in fluid systems. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 631 p.
19. Munson B.R. Fundamentals of Fluid Mechanics. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2013. 796 p.
20. Wu J.-Z., Yang Y.-T., Luo Y.-B., Pozrikidis C. Fluid kinematics on a deformable surface // Journ. Fluid Mech. 2005. Vol. 541. P. 371-381.
21. Хархута Н.Я. Уплотнение грунтов и щебеночных оснований методом вибрирования. Москва: Дориздат, 1952. 20 с.
7. Konstantinov A.R. Evaporation in nature. Leningrad: Hydro-meteoizdat, 1968. 59 p.
8. Mezentsev V.S. Calculations of the water balance. Omsk: Publishing house of the Omsk State Agricultural Institute, 1976. 74 p.
9. Timofeev V.A., Kozlov D.G., Ryabova O.V., Skrypnikov A.V. Investigation of factors in the technology of construction of logging roads affecting the variability of the structure and strength of fortified soils // Construction and road machinery. 2023. № 7. P. 31-36.
10. Khomyak Ya.V. Design of highway networks. M.: Transport, 1983. 207 p.
11. Tikhomirov P.V., Skrypnikov A.V., Chernyshova E.V., Bondarev A.B., Kazachek M.N., Bryukhovetskiy A.N. Analysis of modern methods of surveying logging // Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy. 2023. № 242. P. 179-188.
12. Timofeev V.A., Kozlov D.G., Skrypnikov A.A., Mikova E.Yu., Levushkin D.M. Experimental studies of the uniformity of strength of reinforced soils // Construction and road vehicles. 2023. № 7. P. 37-43.
13. Bryukhovetskiy A.N., Skrypnikov A.V., Kozlov D.G., Romanov P.V., Boikov P.A., Kazachek M.N. Structural scheme of investigation of thermal and moisture properties of soils of logging highways // Forestry Bulletin. 2023. Vol. 27, № 6. P. 126-138.
14. Kozlov V.G. Methods, models and algorithms for designing logging roads, taking into account the influence of climate and weather on traffic conditions: dis. ... doctor of Technical Sciences. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2017. 406 p.
15. Bondarev A.B., Kozlov D.G. Survey of the operational state of logging roads // Energy efficiency and energy saving in modern production and society: Proceedings of the internat. scientific and practical conf., Voronezh, June 06-07, 2022. Voronezh: Voronezh State Agrarian University, 2022. P. 196-200.
16. Nikolaevsky V.N., Basniev K.S., Gorbunov A.T., Zotov G.A. Mechanics of saturated porous media. M.: Nedra, 1970. 339 p.
17. Acheson D.J. Elementary Fluid Dynamics. Oxford: Clarendon Press, 2005. 397 p.
18. Cussler E. Diffusion: mass transfer in fluid systems / Cambridge University Press, 2009. 631 p.
19. Munson B.R. Fundamentals of Fluid Mechanics. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2013. 796 p.
20. Wu J.-Z., Yang Y.-T., Luo Y.-B., Pozrikidis C. Fluid kinematics on a deformable surface // Journ. Fluid Mech. 2005. Vol. 541. P. 371-381.
21. Kharkhuta N.Ya. Compaction of soils and crushed stone foundations by vibration method. Moscow: Dorizdat, 1952. 20 p.

References