

УЧЁТ «СТЕСНЁННОЙ» ДИЛАТАНСИИ ПРИ ПОВЫШЕНИИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИСКУССТВЕННОГО ОСНОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ФИБРЫ

канд. техн. наук, доц. Т.М. УЛАСИК, Л.Ю. МЕДВЕДЕВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

В статье представлен анализ причин повышения несущей способности искусственного основания, дисперсно армированного фиброй. Приведены сравнительные характеристики проявления дилатансии в грунтовом массиве. Сделан акцент на поведение используемого материала (фибры конкретной конфигурации) при формировании напряжения сдвига на контактной поверхности армирующего элемента. Рассматриваются условия, при которых контактная поверхность фибры соотносится с процентным содержанием фибры в определённом объёме грунта. Выявлены основные закономерности проявления «стесненной» дилатансии несвязного грунта при контакте с волокнами, реализующими контактное трение в основании будущей конструкции.

Ключевые слова: фибра, дисперсное армирование, стеклопластиковая арматура, «стесненная» дилатансия, дилатантные напряжения, напряжение сдвига, контактное трение, контактная поверхность, несвязный грунт, несущая способность.

Введение. Площадки строительства будущих сооружений не всегда отвечают требованиям проектируемых на них сооружений и могут быть представлены массивом грунта, общий модуль деформации которого E_0 не удовлетворяет расчету фундаментных конструкций на определение вероятной осадки. В строительной практике применяют различные инженерные решения, ведущие к повышению несущей способности основания. Например: глубинное уплотнение, которое практикуют при наличии слабых, малопрочных грунтов; механическое уплотнение с использованием трамбовок; виброуплотнение; использование вяжущих смесей и др. [1, с. 158]. Особый интерес представляет метод дисперсного армирования несвязного грунта с использованием армирующего элемента в виде фибры¹, изготовленной из стеклопластика. Каждая из названных технологий имеет свою стоимость в зависимости от объёмов выполняемых работ, которая формируется из наличия оборудования, механизмов и материалов. Фибра, как армирующий элемент, отличается легкостью, простотой в применении. Важно понимать, как работает фибра в искусственном основании и что позволяет существенно повлиять на увеличение несущей способности основания при её применении.

Основная часть. Механизм реализации контактного трения по поверхности армирующего элемента в виде фибры. В монографии профессора Соболевского Д.Ю. [2], посвящённой проявлению дилатансии в несвязном грунте, указывается на то, что армирование в грунте направлено на «...упрочнение его в направлениях потенциальных сдвигов» [2, с. 179]. Таким образом, когда в искусственный массив вводят армирующие элементы в виде фибры, располагающейся в этом массиве хаотично, мы предполагаем, что число этих сдвигов будет соответствовать месту расположения каждого отдельного армирующего элемента – фибры. В совместных работах коллег [3–5], подробно рассмотрен процесс реализации контактного трения в условиях «стеснения».

Соболевский Д.Ю. подчеркивает, что повышение несущей способности грунта, армированного каким-либо способом, «...обеспечивается при выполнении двух условий: напряжения сдвига на контактных поверхностях не должны превышать своего предельного значения; напряжения сдвига не должны вызывать разрыва самих армоэлементов...» [2, с. 173]. В соответствии с нормативными требованиями к армоэлементам² для обеспечения максимального эффекта упрочнения грунта общий модуль упругости армирующего элемента $E_{0,s}$ должен быть существенно (как правило, на два порядка) больше модуля деформации упрочняемого (вмещающего) грунта $E_{0,g}$. На рисунке 1 показано, как выглядит фибра в реальности.

Компонент упрочняемого исходного (вмещающего) грунта должен обеспечивать улучшение его прочностных и деформативных свойств. Армирующие элементы размещают в упрочняемом грунте дисперсно в виде дискретных коротких фибр по всему армированному объему грунта. Все это и будет соответствовать одному из вышеуказанных условий.

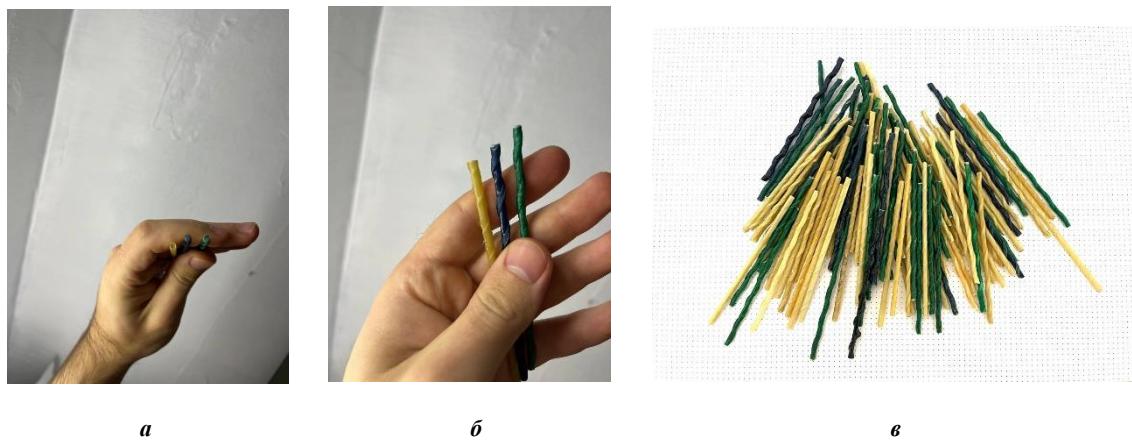
В грунтовом массиве находятся рассеянные в определенном объеме фибры и каждая из них имеет определенную величину поверхности, контактирующую с грунтом. В соответствии с исследованиями [2, с. 71] предельное контактное сопротивление сдвига в несвязном грунте определяется:

$$\tau_u = \sigma_{no} \operatorname{tg}\varphi + \Delta\sigma_d \operatorname{tg}\varphi, \quad (1)$$

где σ_{no} – начальное нормальное напряжение;
 φ – угол внутреннего трения грунта;
 $\Delta\sigma_d$ – дилатантное напряжение.

¹ ТКП 45-5.01-268-2012 (02250). Основания и сооружения из армированного грунта. Правила проектирования и устройства. – Введ. 01.05.2013. – Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь, 2012. – 49 с.

² См. сноска 1.



*a – демонстрируется сечение фибры; б – показаны размер и очертания фибры;
в – фибра в россыпи*

**Рисунок 1. – Фибра из стеклопластиковой арматуры периодического профиля
(фото предоставлены аспирантом кафедры «Геотехника и строительная механика» Медведевым Л.Ю.)**

Обозначим дилатантное напряжение, формирующееся при контакте с фиброй, $\Delta\sigma'_d$ и оценим качественное и количественное проявление дилатансии в определённом грунтовом массиве. В этом случае мобилизованное контактное трение будет определяться по формуле 2:

$$\tau_d = \Delta\sigma'_d \operatorname{tg}\phi. \quad (2)$$

В исследованиях [2, с. 51] были получены результаты приращения нормального напряжения при формировании сдвигов вдоль контактной поверхности в различных условиях. В таблице 1 показаны сравнительные, интерпретированные с использованием [2, с. 198–200] к нашим исследованиям.

**Таблица 1. – Интерпретация результатов исследований поведения несвязанных грунтов
в условиях объёмного стеснения**

Ширина поверхности сдвига, м	Наименование грунта	Угол внутреннего трения грунта, град	Дилатантное напряжение $\Delta\sigma'_d$, КПа	Мобилизованное контактное трение τ_d , КПа
0,025	Песок мелкий, плотный	28	54	30
0,05		28	101	56
0,1		30	199	115
0,025	Песок средней крупности, средней плотности	28	65	36
0,05		28	130	72
0,1		30	251	145
0,025	Песок крупный, плотный	28	117	65
0,05		28	234	130
0,1		30	448	259

Приведенные в таблице 1 вычисленные значения дилатантного напряжения, возникающие в несвязном грунте при наличии армирующих элементов, имеющих размеры, соотносимые с размерами поверхности сдвига (фибра имеет длину 100 мм), указывают на возможность возникновения $\Delta\sigma'_d$, за счет которого и возникает контактное трение на поверхности фибры. Указанное в таблице 1 дилатантное напряжение может рассматриваться отдельно для каждого армирующего элемента. Очевидно, что чем крупнее фракции грунта, тем значение этого распорного, действующего перпендикулярно к поверхности армированного элемента, дилатантного напряжения больше.

Профессор Соболевский Д.Ю. отмечает, что «физическим свойством, связывающим прочность и деформативность зернистой среды, является дилатансия» [2, с. 100]. Повышение несущей способности основания неизменно связано с общим модулем деформации E_o , а также с изменением структуры массива грунта, при наличии в нем определенных включений, естественного (например, крупные зёрна гравия, щебень) и искусственного характера (армирующие элементы). Реальные условия применения фибры, как армирующего элемента, могут быть охарактеризованы разнородным составом окружающего грунта, включающего в себя и крупные зёрна грунта и мелкую фракцию. Процесс возникновения дилатантных напряжений связан будет непосредственно с контактной поверхностью фибры, с её ориентацией в объёме грунта. В работах [6–8] описаны условия проявления «стеснённой» дилатансии в массиве грунта и именно подобные условия возникают при внедрении фибры в искусственное основание.

В [5–8] указывается, что работает не только контактная поверхность, но и грунты искусственных оснований, которые, как правило, обеспечивают высокие значения по контактной поверхности армирующего элемента и которые представляют собой крупнообломочный материал. И главным в процессе армирования будет совместная работа фибры как армирующего элемента и грунта, в котором развиваются распорные $\Delta\sigma_d'$ дилатантные напряжения.

Важным фактором формирования распорных напряжений является одна из характеристик физического состояния грунта – влажность [2, с. 60], присутствие которой в несвязном грунте приводит к падению эффекта зацепления зёрен друг за друга и за контактную поверхность. Оптимальной влажностью, при которой ещё реализуется зацепление зёрен грунта, является влажность 8%. При этом любой несвязный грунт можно оценить по степени влажности $S_r \leq 0,5$ как маловлажный³. Увеличение влажности работает в массиве грунта как смазка, которая препятствует полноценному зацеплению зёрен и полной реализации контактного трения. Мобилизованное контактное трение может снижаться на 10% и более, если грунт переходит в насыщенное водой состояние и S_r может находиться в диапазоне от 0,8 до 1. В готовом искусственном основании распорные напряжения будут реализованы уже на стадии подготовки основания, когда ведется разравнивание грунта и его уплотнение. Нагрузка на массив в этом случае вертикальная. Принимая условно форму фибры в виде цилиндра с диаметром 4 мм и длиной 100 мм (на поверхности фибры присутствует также спиральная обмотка, хорошо заметная на рисунке 1), можно определить, какую площадь поверхности сдвига будет иметь один армирующий элемент и его некоторое количество. Соотнесём это с объёмом грунта, например, в 1 м³ и, определив количество фибр в указанном объёме, спрогнозируем, какую общую площадь сдвига будут иметь все указанные фибры при различных вариантах армирования, включающем некое процентное соотношение объема грунта и самой фибры. Простой расчет показывает, что количество фибр в 1 м³ может составить до 64 шт., при равномерном распределении. На одном из объектов строительства в г. Витебске применялась технология дисперсного армирования⁴, процент фибры в объёме грунта в 1 м³ составил 0,1%. На рисунке 2 показано соотношение общей контактной поверхности фибры S для случаев физического нахождения её в объёме грунта (в 1 м³) в количестве U, равном 0,1; 0,2 и 0,3% от общего объёма.

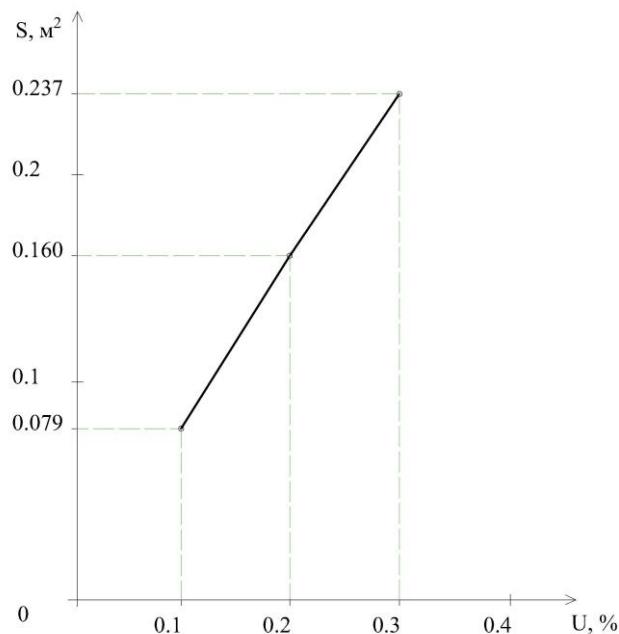


Рисунок 2. – Соотношение площади контактной поверхности фибры S и ее процентного содержания в грунте U

Если в армировании массива используется фибра (арматура композитная стеклопластиковая), у которой наружный диаметр составляет 8,2 мм (без учёта оплеточной нити), при длине в 152 мм, то, следовательно, в этом случае площадь контактной поверхности для одной фибры возрастает практически втрое. Для различных модификаций фибры характерно включение в процесс зацепления зёрен грунта спиральной обмотки, имеющейся на поверхности каждого армирующего элемента.

В соответствии со свойствами фибры она способна выдерживать высокие температуры (до 200 °C), а предел прочности при поперечном срезе 195,4 МПа, что указывает не только на высокую прочность, но и возможность фибры работать как армирующий элемент, при разном расположении в грунте, где гарантированно (данные

³ Грунты. Классификация [Classification of soils]. – Минск: Стройтехнорм, 2019. – 40 с. – См. стр. 14.

⁴ См. сноску 1.

таблицы 1) развиваются значительно меньшие контактные напряжения. В таблице 2 приведены некоторые промышленные характеристики (от изготовителя по «Техническому Свидетельству ТС 01.5251.24 о пригодности материалов и изделий для применения в строительстве») фибры (арматуры композитной стеклопластиковой) диаметром 8,2 мм.

Таблица 2. – Отдельные показатели арматуры композитной стеклопластиковой АКС8

Наименование показателя	Обозначение ТНПА, устанавливающего методы испытаний (особые условия)	Фактически полученные значения
Масса 1 м.п., г	СТБ ISO 15630-1	98,6
Плотность, г/см ³	ГОСТ 15139	2,02
Временное сопротивление разрыву, МПа	СТБ 1103 ГОСТ 11262	1329
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	СТБ 1103 ГОСТ 4648	1180

Производство работ на одном из объектов строительства в г. Витебске с использованием фибры показано на рисунке 3. Фибра отсыпана в грунт для дальнейшего устройства основания.



Рисунок 3. – Возвведение искусственного основания с применением фибры
(фото предоставлено аспирантом кафедры «Геотехника и строительная механика» Медведевым Л.Ю.)

Используемая для армирования фибра обладает разносторонними характеристиками (см. таблицу 2), которые предполагают её интенсивное использование в связи с небольшой массой, прочностью и долговечностью работы в основании, в том числе и с учётом экологической безопасности применяемого армирующего материала.

Заключение. Проведенные нами расчёты и анализ поведения армирующих элементов в виде фибры в искусственном основании показывают, что повышение несущей способности основания включает ряд факторов:

1. Применяемые в практике возведения искусственных оснований армирующие элементы в виде фибры различных модификаций обладают контактной поверхностью, позволяющей реализовать контактное трение в виде дилатантного напряжения $\Delta\sigma'_d$ (см. таблицу 1).
2. Влажность грунтового массива является одним из определяющих факторов для развития мобилизованного контактного трения τ_d (см. таблицу 1).
3. Максимальная реализация контактного трения происходит в диапазоне характеристики степени влажности $S_r \leq 0,5$.
4. Простота использования арматуры композитной стеклопластиковой указывает на возможность реализации проектов по улучшению свойств грунтовых оснований с учетом гранулометрического состава несвязного вмещающего грунта.
5. Вмещающий грунт можно дополнить гравием, песком крупным, щебнем для более полной реализации зацепления зёрен грунта и увеличения значений контактного трения на поверхности армирующих элементов в виде фибры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пойта П.С. Шведовский П.В., Клебанюк Д.Н. Основания и фундаменты: учебное пособие. – Минск: Вышэйшая школа, 2020. – 400 с.
2. Соболевский Д.Ю. Прочность и несущая способность дилатирующего грунта. – Минск: Навука і тэхніка, 1994. – 232 с.

3. Уласик Т.М. Влияние «стесненной» дилатанции на несущую способность свайных фундаментов // Вестник Полоцкого государственного университета. Строительство. Прикладные науки. – 2015. – № 16. – С. 30–33.
4. Уласик Т.М., Балыш А.В. Моделирование работы одиночной буронабивной сваи в условиях дополнительного «стеснения» // Вестник Полоцкого государственного университета. Строительство. Прикладные науки. – 2017. – № 8. – С. 43–48.
5. Соболевский Д.Ю., Попов О.В. Сопротивление сдвига несвязного грунта по боковой поверхности инъекционных анкеров и свай // Основания и фундаменты в геологических условиях Урала: межвуз. сб. научн. тр. – Пермь, 1987. – С. 78–85.
6. Popov O. The influence of diameter of injection piles on contact friction in non-cohesive soils // Prog. 3-rd International Geotechnical Conference on Soil Mech. and Found. Engin. – Bratislava, 1997. – Р. 113–114.
7. Sobolevsky D.Y. Strength of Dilating Soil and Load-Holding Capacity of Deep Foundations. – Rotterdam: Taylor & Francis, 1995. – 243 p.
8. Соболевский Д.Ю., Уласик Т.М., Балыш А.В. Влияние объёма «стеснения» несвязного грунта на контактное сопротивление по боковой поверхности одиночной буронабивной сваи // Проблемы современного бетона и железобетона: сборник научных трудов. – Вып. 10. – Минск: Колосград, 2018. – С. 250–260.

REFERENCES

1. Poyta, P.S., Shvedovsky, P.V., & Klebanyuk, D.N. (2020). *Base and foundations: a Textbook*. Minsk: Higher School. (In Russ.).
2. Sobolevsky, D.Y. (1994). *Prochnost I nesushchay sposobnost dilatiruyshchego grunta [Strength and load bearing capacity of the dilating soil]*. Minsk: Navuka I tekhnika. (In Russ.).
3. Ulasik, T.M. (2015). Vliyanie «stesnennoi» dilatansii na nesushchuyu sposobnost' svainykh fundamentov. *Herald of Polotsk State University*, (16), 30–33. (In Russ.).
4. Ulasik, T.M., & Balysh, A.V. (2017). Modelirovanie raboty odinochnoi buronabivnoi svai v usloviyakh dopolnitel'nogo «stesneniya». *Herald of Polotsk State University*, (8), 43–48. (In Russ.).
5. Sobolevsky, D.Y., & Popov, O.V. (1987). Soprotivlenie sdvigu nesvyasnogo grunta po bokovoy poverkhnosti inektsionnykh ankerov i svay [Resistance to shear of non-cohesive soil along the lateral surface of injection anchors and piles]. In *Bases and foundations in the geological conditions of the Urals (78–85)*. Perm. (In Russ.).
6. Popov, O. (1997). The influence of diameter of injection piles on contact friction in non-cohesive soils. In *Prog. 3-rd International Geotechnical Conference on Soil Mech. and Found. Engin* (113–114). Bratislava.
7. Sobolevsky, D.Y. (1995). *Strength of Dilating Soil and Load-Holding Capacity of Deep Foundations*. Rotterdam: Taylor & Francis.
8. Sobolevsky, D.Y., Ulasik, T.M., & Balysh, A.V. (2018). The influence of the volume of "constraint" of cohesionless soil on the contact resistance along the lateral surface of a single bored pile. In *Collection of scientific papers "Problems of modern concrete and reinforced concrete", Issue 10* (250–260). Minsk: Kolorgrad. (In Russ.).

Поступила 15.12.2025

INCREASING THE LOAD-BEARING CAPACITY OF ARTIFICIAL FOUNDATIONS USING FIBER

T. ULASIK, L. MEDVEDEV
(Belarusian National Technical University, Minsk)

This article presents an analysis of the factors that increase the bearing capacity of an artificial foundation reinforced with dispersed fiber. Comparative characteristics of dilatancy in soil are presented. Emphasis is placed on the behavior of the material used (fibers of a specific configuration) during the formation of shear stress on the contact surface of the reinforcing element. The conditions under which the fiber contact surface relates to the percentage of fiber in a given soil volume are considered. The main patterns of "constrained" dilatancy in cohesionless soil are identified when in contact with fibers, which mediate contact friction in the foundation of the future structure.

Keywords: fiber, dispersed reinforcement, fiberglass reinforcement, “constrained” dilatancy, dilatant stresses, shear stress, contact friction, contact surface, non-cohesive soil, bearing capacity.