**УДК 625.7**

# МЕХАНИЗМ УСИЛЕНИЯ НАСЫПЕЙ НА СЛАБЫХ ОСНОВАНИЯХ

**Варивода О.Н.,** начальник,
*Служба автомобильных дорог в Одесской области*
sad-od@ukravtodor.gov.ua

**Харин П.Л.,** аспирант,
*Национальный Транспортный Университет, ООО Унипром*
kxarin@ukr.net

**Аннотация.** Геосотовая конструкция обеспечивает устойчивость высокой насыпи на слабом грунте. При возведении высокой насыпи на слабых грунтах геосотовый матрас является эффективной альтернативой свайному основанию или замене грунта, обеспечивающей сокращение стоимости и времени возведения земляного полотна. Данная технология применяется в ходе нового строительства на слабых и неоднородных грунтах, в том числе при перекрытии свалок и иных хранилищ отходов. Геосотовый матрас формирует жесткую платформу толщиной 1 метр в основании насыпи, которая выравнивает и снижает величину осадки, предотвращает выпор слабого грунта основания, повышает его несущую способность, позволяя ускорить темпы отсыпки грунта. Система геосотового матраса повышает общую устойчивость насыпи, снижает вертикальные и горизонтальные напряжения в грунте, сокращает величину осадки и обеспечивает ее равномерность.

**Ключевые слова:** слабое основание, водонасыщенные грунты, жесткие георешетки, геосотовая конструкция.

# МЕХАНІЗМ ПОСИЛЕННЯ НАСИПІВ НА СЛАБКИХ ОСНОВАХ

**Варивода О.М.,** начальник,
*Служба автомобільних доріг в Одеській області*
sad-od@ukravtodor.gov.ua

**Харін П.Л.,** аспірант,
*Національний Транспортний Університет, ТОВ Уніпром*
kxarin@ukr.net

**Анотація.** Геосотова конструкція забезпечує стійкість високого насипу на слабкому ґрунті. При зведенні високого насипу на слабких ґрунтах геосотовий матрац є ефективною альтернативою паль або заміні ґрунту, що забезпечує скорочення вартості і часу зведення земляного полотна. Дана технологія застосовується в ході нового будівництва на слабких і неоднорідних ґрунтах, в тому числі при перекритті звалищ і інших сховищ відходів. Геосотовий матрац формує жорстку платформу заввишки 1 метр в основі насипу, яка вирівнює і знижує величину осаду, запобігає випору слабкого ґрунту основи, підвищує його несучу здатність, дозволяючи прискорити темпи відсипання грунта. Система геосотового матраца підвищує загальну стійкість насипу, знижує вертикальні і горизонтальні напруги в ґрунті, скорочує величину осаду і забезпечує його рівномірність.

**Ключові слова:** слабка основа, водонасичені ґрунти, жорсткі георешітки, геосотова конструкція.

# MECHANISM OF STRENGTHENING OF EMBANKMENTS ON WEAK BASES

**Varivoda O.M.,** chief,
*Service of highways in the Odessa region*
sad-od@ukravtodor.gov.ua

**Kharin P.L.,** postgraduate student,
*National Transport University, Uniprom LLC*
kxarin@ukr.net

**Abstract.** The geocell construction provides stability of a high embankment on a weak ground. When erecting a high embankment on weak soils, the geocell mattress is an effective alternative to the pile foundation or the replacement of soil, which reduces the cost and time of the erection. This technology is used in the course of new construction on weak and heterogeneous soils, including overlapping dumps and other waste storage facilities. The geo-cellular mattress forms a rigid platform with a thickness of 1 meter at the base of the embankment, which levels and reduces the amount of settlement, prevents the erosion of the weak foundation soil, increases its bearing capacity, accelerates the rate of soil filling. Thus, excavation and removal of weak soil is not required, cellular geomatress is mounted directly on a natural foundation, is filled with stone material and forms a rigid supporting structure. It has a cellular structure, assembled at the construction site from a rigid triaxially oriented geogrid Tensar TriAx® on the sole and vertical honeycombs of rigid uniaxial geogrid Tensar RE, connected by polymer rods or “bodkin”. The system of geocell mattress increases the overall stability of the embankment, reduces vertical and horizontal stresses in the ground, reduces the amount of settlement and ensures its uniformity.

**Keywords:** weak base, water-saturated soils, rigid georgettes, geocell construction.

**Введение** Возведение транспортных сооружений на слабом основании создает много проблем для проектировщиков и строителей. Во-первых, такое строительство всегда связано с большими затратами, а во-вторых, значительно увеличивает сроки производства работ. Методы повышения несущей способности основания путем удаления слабого грунта с заменой более прочными материалами или путем устройства свайного поля не всегда осуществимы на практике и, как правило, бывают экономически нецелесообразны. Современные технологии позволяют решить проблему слабого основания и при этом существенно сократить сроки строительства и получить ощутимую финансовую экономию.

**Цели и задачи.** Повышение несущей способности основания можно достичь либо понижением уровня грунтовых вод в водонасыщенных грунтах, либо предварительным обжатием грунтов основания давлением [1]. Если понижение уровня грунтовых вод доступными средствами часто бывает затруднительно, то предварительное обжатие грунтов путем их пригрузки возможно практически всегда. Правда, здесь возникает дополнительная сложность, связанная с малым сопротивлением водонасыщенных грунтов сдвигу. Именно слабое сопротивление грунтов сдвиговым усилиям обычно является причиной выпора грунтов из-под основания высоких насыпей, что приводит к повышенным просадкам и значительно удлиняет процесс стабилизации земляного сооружения [2, 3]. Чтобы предотвратить возможный выпор, следует применять меры по ускорению консолидации слабых грунтов, направленные на увеличение сопротивления грунтов сдвиговым усилиям, что позволяет провести процесс пригрузки высокой насыпи без выпора грунта в ее основании.

**Объекты и методы исследований.** Сегодня разработаны методы проектирования и строительства высоких насыпей на слабых основаниях с использованием геоматрасов (рис.1) из георешеток. Устраиваемые под подошвой насыпи матрасы, представляют собой конструкцию высотой до 1 м и более, выполненную из жестких георешеток [4, 5]. Такая объемная конструкция формируется непосредственно на слабом грунте основания, а затем заполняется

природным каменным материалом с высоким углом внутреннего трения (щебень, гравий). Обычно достаточно высоты геоматраса около 1 м.

Рис. 1. Геоматрас из жестких одноосных георешеток, заполненный каменным материалом

При этом образуется жесткая дренирующая платформа (ростверк), которая может быть также использована, как площадка для механизмов, отсыпающих насыпь. Платформа также выполняет плоский дренаж, предназначенный для ускорения консолидации слабого грунта в основании насыпи (перераспределение нагрузки в основании насыпи и отвод воды из-под основания без выдавливания грунта).

Уложенные на основании из слабых грунтов геоматрасы создают основание насыпи, имеющее следующие отличительные особенности:

- наличие сравнительно шероховатой поверхности раздела между слабым грунтом и геоматрасом, содержащим засыпку из каменного материала, повышающей устойчивость насыпи;
- наличие жесткой платформы (ростверк), гарантирующей как равномерное распределение нагрузок по слабому грунту в основании насыпи, так и формирование в слабом грунте поля напряжений приблизительно одинаковой величины.

Эти особенности позволяют геоматрасам из георешеток благоприятно влиять на механизмы деформации, реализующиеся в слабом грунте естественного основания насыпи, и обеспечить устойчивость грунтового сооружения.

При сооружении насыпей на слабых основаниях необходимо учитывать, что устойчивость слабых грунтов во многом зависит от скорости их загружения. На такие грунты нельзя в короткие промежутки времени давать большие нагрузки, так как может возникнуть лавинное разрушение водно-коллоидных связей. Сопротивление разрушению в слабых глинистых и иловых грунтах главным образом зависит от порового давления воды. Это давление изменяется во время строительства, и точное предсказание его величины практически невозможно. В случае повышения порового давления и отсутствии достаточного дренажа в зоне расположения геоматраса возникает угроза разрушения сооружения. Для заблаговременного обнаружения опасности разрушения применяют периодический контроль порового давления и обеспечивают надежную работу системы дренажа. Медленное возведение конструкции позволяет ускорить темп увеличения прочности основания с учетом приложенных к насыпи нагрузок.

На соблюдении этих условий основан принцип работы геосотовой конструкции Тенсар. Он заключается в том, что механизм разрушения по круглоцилиндрическим поверхностям скольжения в данной конструкции не является критическим фактором. Основным критерием устойчивости становится прочность на сдвиг пластического слоя под геоячейкой, которая максимально мобилизуется при использовании геоматраса Тенсар. Сформированный в основание насыпи геоматрас, удерживает от смещения вышележащие слои. Применение геосот Тенсар снижает величину осадки (мин. на 33%), а сама осадка проходит равномерно.

**Результаты исследования.** Устройство геоматрасов из георешетки Тенсар имеет две стадии. Первая предусматривает формирование конструкции из связанных между собой

ячеек (сотов) – вертикальных одноосных георешеток шириной 0,5-1 м и горизонтальной трехосной георешетки в качестве базовой поверхности. Получаемую конструкцию высотой от 0,5 до 1 м затем на второй стадии заполняют природным каменным материалом, благодаря чему создается жесткое основание для отсыпаемой насыпи. Высота геосотового матраса непосредственно зависит от величины толщи слабых грунтов и их сцепления при не дренированном, неконсолидированном сдвиге, а также от высоты насыпи.

Георешетки Тенсар прошли успешную апробацию в Украине. Компания Унипром совместно с институтом Укргипродор и подрядными организациями Уманьавтодор, Альтком и Ростдорстрой реализовали три полномасштабных проекта, где было предусмотрено применение геосотового матраса.

Первый объект располагался на территории «Международного аэропорта Львов». Устройство геосотового матраса позволило избежать неравномерных осадок взлетно-посадочной полосы на стыке осадочной конструкции насыпи с безосадочной конструкцией проложенного водопропускного коллектора на свайном основании. Весь участок строительства находился в переувлажненном состоянии и в зоне подтопления грунтовых вод. Важным негативным фактором, который дополнительно исключал быстрое проведение работ, являлось большое количество осадков, засвидетельствованное Госметеослужбой. Комплексный вариант армирования насыпи по расчетам предусматривал устройство в активных зонах насыпи геосинтетических прослоек и геосотовой конструкции. Геосотовая конструкция обеспечила ускорение стабилизации насыпи во времени, а дополнительные геосинтетические слои равномерно распределяли нагрузку и удерживали насыпь от расползания. Такой системный подход обеспечил проектную надежность конструкции, позволил ускорить темпы строительства благодаря быстрому завершению консолидации насыпи. Подтверждением стабилизации насыпи является фактическое завершение хода осадки к моменту устройства покрытия.

Второй объект находился на автомобильной дороге «Стрый – Кировоград – Знаменка» (участок в Черкасской области). С целью предотвращения неравномерной осадки грунта, ускорению сроков строительства, а также для обеспечения общей стабильности насыпи на подходах к путепроводу было предусмотрено устройство геосотового матраса. Проект предусматривал строительство автомобильной дороги в обход населенных пунктов. На участке был запроектирован новый мост и подходы к нему с высокими насыпями. Учитывая переувлажненные грунты в основании запроектированных насыпей, был предусмотрен геоматрас. Подрядная организация применила геоматрас Тенсар. После устройства геоматраса установили контроль деформации основания насыпи.

Третий объект находиться в Одесской области на новом строительстве Обход г. Рении, где очень сложные гидрогеологические и геологические условия прохождения трассы. Работы выполняются компанией ООО Ростдорстрой по проекту ОдессаГипродор успешно завершает строительство геосотового матраса на подходах к мостовому переходу через железную дорогу («Обход г. Рении» на участке км 0+000 - км 5+600). Заиленная болотистая местность, заросшая камышом, не смогла служить хорошим основанием для насыпи высотой 11 м. Сложные гидрологические условия и угроза постоянных наводнений подтолкнули заказчика (Одесская служба автомобильных дорог) к применению технологии геосотового матраса. Такая конструкция для заказчика является альтернативой стандартным методам строительства на слабых грунтах, таких как отсыпка до минерального дна, замена грунта, устройство свайного основания и эстакады. При этом значительно сократились стоимость строительных работ и время их проведения.

При выполнении этих работ были установлены соответствующие марки в двух створах насыпи. В каждом створе устанавливалось по три марки: одна по оси насыпи, а две под бровками насыпи. Кроме того, силами Укргипродора проводился контроль за прохождением осадки в двух створах с применением специальных датчиков. В зависимости от скорости и величины осадки темп отсыпки насыпи корректировался во время строительства.

Опыт применения геосотовых матрасов Тенсар показал, что напряжения от насыпи необходимо сопоставлять с прогнозируемой несущей способностью и исходить из полученного

коэффициента безопасности. Полученный коэффициент безопасности должен быть больше 1. Если коэффициент меньше 1, можно рассматривать два варианта:

1) увеличение прочностных характеристик слабого грунта в основании за счет консолидации. Так как каменная засыпка матрасов является превосходным дренажем, то непосредственно под матрасом консолидация завершается сравнительно быстро;

2) организация стадийного строительства, когда насыпь сначала возводится только до высоты, при которой гарантировано обеспечивается устойчивость конструкции, а затем после завершения консолидации слабого грунта с соответствующим повышением его прочностных характеристик отсыпка насыпи продолжается.

Эти особенности позволяют геоматрасам из георешеток существенно и благоприятно влиять на механизмы деформации, реализующиеся в слабом грунте естественного основания насыпи. Это влияние выражается в повороте направления действия главных напряжений в зоне слабых грунтов естественного основания от вертикального направления до направления наружу вверх под углом 45°. Такое изменение направления действия главных напряжений меняет механизмы проскальзывания в грунте основания.

В усиленной насыпи на слабом основании геосотовая конструкция используется для повышения несущей способности грунтов основания. Стабильность насыпи наиболее важна в конце этапа загрузки, после чего грунт основания консолидируются и набирают силу. Усиление требуется только для поддержания коэффициента безопасности выше единицы, пока нижележащие слои основания достаточно не консолидируется для поддержания стабильности без помощи арматуры. Для улучшения устойчивости геосотовый матрас располагают поперек основания насыпи. Если бы стабилизирующие силы геоматраса были бы проигнорированы, коэффициент безопасности на сопротивление сдвигу грунта упал бы ниже единицы в конце строительства, и поднялся значительно выше единицы через какое-то время, поскольку происходит консолидация основания. Другими словами, армирование требуется для поддержания коэффициента безопасности выше единицы для усиления насыпи, пока грунт основания достаточно не консолидируется для поддержания стабильности без помощи геоматраса (рис. 2).

а) б)

Рис. 2. Процесс консолидации насыпи на слабых грунтах:
а – нагрузка на основание; б – фактор безопасности

Для насыпи на слабом основании армирование сначала должно выполнить функцию уменьшения сдвигающих усилий, прежде чем оно может начать выполнять функцию увеличения сопротивлению. Главным сдвигающим усилием насыпи на слабом основании является непосредственно вертикальная нагрузка от самой насыпи на поверхность основания (рис. 3).

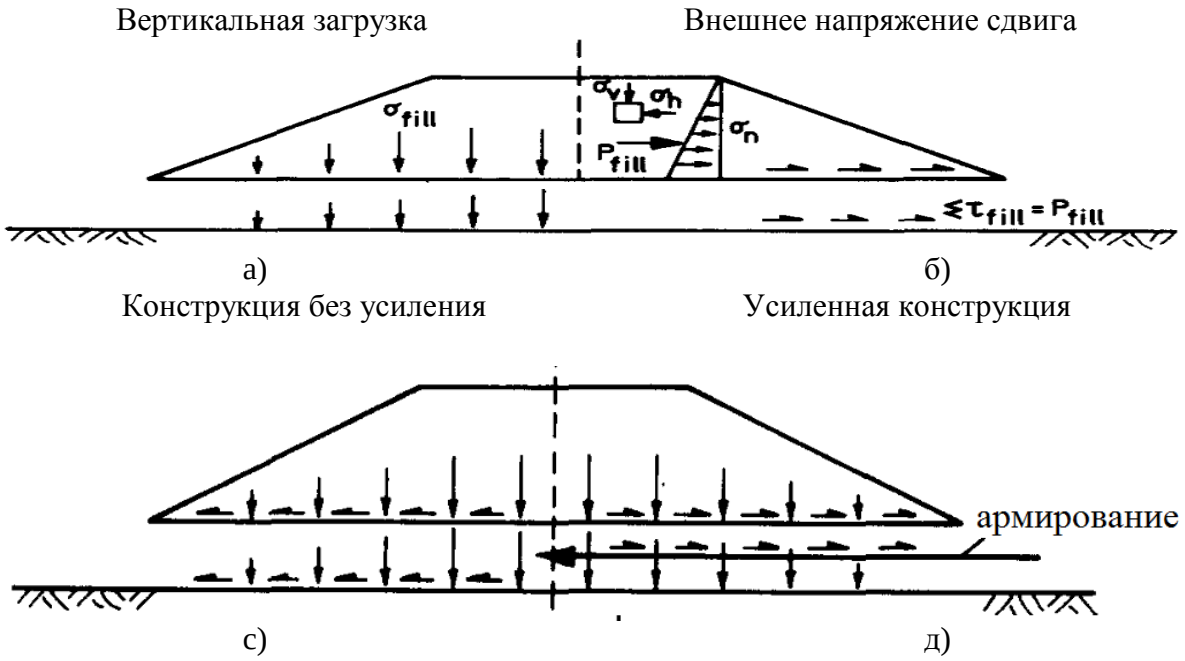


Рис. 3. Иллюстрация сдвигающих сил на не усиленную насыпь и роль геосотового матраса для поддержки внешних сдвигающих напряжений сдвига:
а – вертикальная загрузка; б – внешнее напряжение сдвига;
с – конструкция без усиления; д – усиленная конструкция

Рис. 4. Влияние внешнего напряжения сдвига на уменьшение несущей способности основания:
а – однородная глина с не дренированным сопротивлением сдвигу $c_u$; б – изменение напряжение сдвига

Другим значительным сдвигающим усилием является внешнее боковое давление грунта насыпи, вызванное горизонтальными напряжениями в засыпке, необходимыми для поддержания локального равновесия под собственным весом. Получающееся наружное напряжение сдвига в основании насыпи уменьшает способность основания выдерживать

вертикальную нагрузку насыпи. Влияние на несущую способность основания комбинированной вертикальной и сдвиговой нагрузки для основания на поверхности однородной глины с не дренированным сопротивлением сдвигу $c_u$ (рис. 4). Сопротивление грунта приложенному вертикальному напряжению q уменьшается, когда наружное напряжение сдвига $\tau = \beta \cdot c_u$ действует в основании насыпи.

Максимальное вертикальное напряжение, которое может поддерживаться, определяется уравнением:

$$p = c_u\{1 + \frac{\pi}{2} + \cos^{-1}(\beta) + \sqrt{(1-\beta^2)}\}.$$

Таким образом, вертикальная нагрузка на насыпь может быть увеличена только до предела, установленного несущей способностью. Предельная несущая способность слоя слабого грунта в подобных условиях может быть оценена методами расчета пластичности, используемыми в теории пластического деформирования металлов. Грунт основания в первую очередь пластифицируется под кромкой насыпи и, по мере увеличения высоты насыпи, зона пластических деформаций распространяется внутрь до тех пор, пока не будет достигнута окончательная несущая способность, когда формируются зоны пластической деформации, симметричные относительно оси поперечного сечения насыпи (рис. 5). Таким образом, потенциальная предельная несущая способность сравнительно тонкого слоя слабого грунта может быть рассчитана с помощью номограммы.

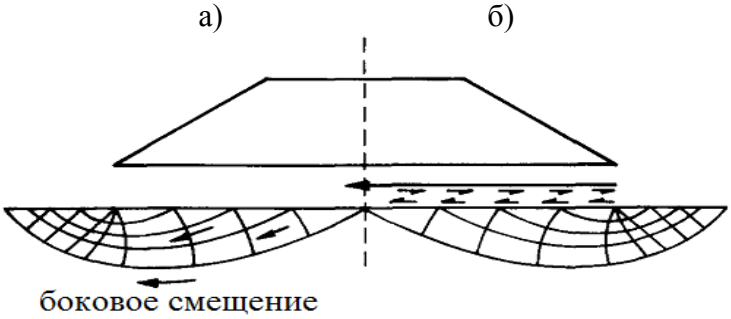


Рис. 5. На неармированной насыпи (а) не существует ограничений относительно поперечного смещения основания. Усиление (б) может обеспечить удерживающее напряжение сдвига на поверхности основания

Диаграмма несущей способности рассчитана, начиная от внешнего края зоны поверхностей скольжения внутрь до «пика жесткости», определяемого на зоне поверхностей скольжения исходя из отношения ширины используемой георешетки к мощности слоя слабого грунта. Зона поверхностей скольжения используется для того, чтобы определить локализацию максимального допустимого напряжения в пределах ограниченной зоны пластического деформирования (рис. 6). Давление, действующее на конструкцию, отображено на рис. 7.

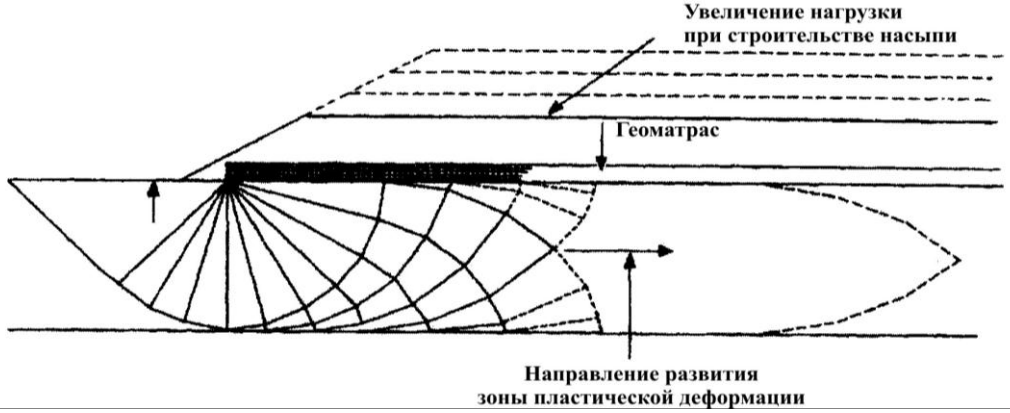


Рис. 6. Развитие зоны пластической деформации

**Выводы.** Для того, чтобы подтвердить факт изменения направления действия главных напряжений, путем вращения под влиянием уложенных на естественное основание геоматраса, целесообразно рассмотреть напряженное состояние в грунте непосредственно под нижней стороной геоматраса. При построении круга Мора (рис. 8) точка R характеризует напряженное состояние на вертикальной плоскости. Главное напряжение $\sigma_h$ действует внутрь на плоскости под углом 0° к горизонтали. Высота подъема плоскости увеличивается при увеличении прочности грунта на сдвиг (то есть $\tau = \alpha C_u$). Максимум достигается, когда полное сопротивление сдвигу у грунта достигает значения, соответствующего $\alpha = 1$, что означает проявление пластичности в данном элементе на поверхности скольжения.

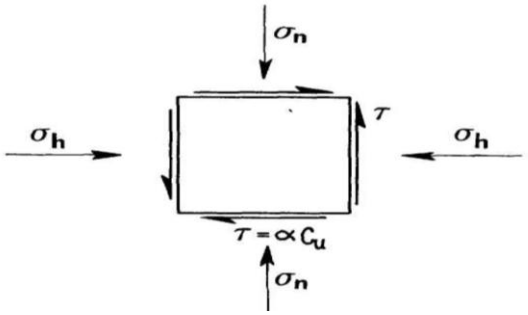


Рис. 7. Давление действующее на конструкцию

Таким образом, геоматрас способствует интенсификации внутренних касательных напряжений в грунте под его нижней поверхностью и за счет сил трения между геометрасом и грунтом основания обеспечивает увеличение несущей способности слабого грунта основания.

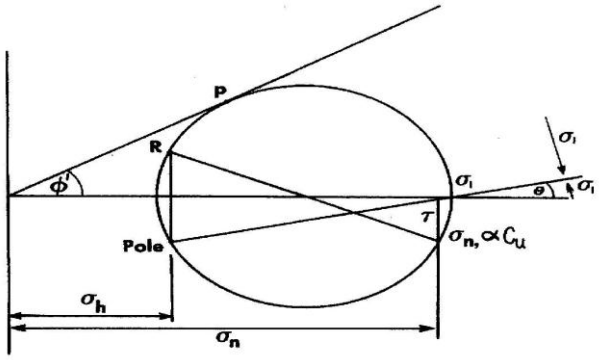


Рис. 8. Схема круга Мора

**Литература**

1. BS 8006-1:2010. BSI British Standarts. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills. – 2010. – 77 с.

2. Terzaghi K. Soil Mechanics in Engineering Practice / K. Terzaghi, R.B. Peck, Gh. Mesri // John Wiley & Sons,1996. – 549 p.

3. Terzaghi K. Theoretical soil mechanics / K. Terzaghi // John Wiley & Sons, Inc., 1943. – 510 p.

4. Jenner C.G. The use of slip line fields to assess improvement in bearing capacity of soft ground given by a cellular foundation mattress installed at the base of an embankment / C.G. Jenner, R.H. Bassett, D.I. Bush // Proc. Int. Geotech. Symp. On Theory and Practice of Earth Reinforcement, Kyushu, ed. T. Yamanouchi, N. Miura & H. Ochiai. Balkema, Rotterdam, 1988. – pp. 209-214.

5. Jewell R.A. The Mechanics of Reinforced Embankments on Soft Sols / R.A. Jewell // Geotextiles and geomembranes, 1988, – No7. – pp. 237-273.

Стаття надійшла 15.03.2018