



DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.01

УДК 624.138.1

ОБЗОР ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ УКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ

Л.А. Игошева, А.С. Гришина

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 01 февраля 2016
Принята: 20 февраля 2016
Опубликована: 30 июня 2016

Ключевые слова:

грунт, несущая способность, деформируемость, искусственное закрепление грунтов

АННОТАЦИЯ

При строительстве и эксплуатации зданий и сооружений на слабых грунтах неизбежно возникает проблема преобразования их физико-механических свойств для повышения несущей способности и снижения деформируемости. С одной стороны, это проблема, но с другой – это возможность для инноваций и модернизации существующих методов укрепления грунтов основания. Искусственное закрепление грунта – воздействие на грунт с помощью различных конструктивных и технологических мероприятий, которое повышает его несущую способность и снижает деформации. В настоящее время существует множество методов закрепления грунта, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Чаще всего область применения метода так или иначе ограничена типом грунта. В данной статье проанализированы следующие популярные методы закрепления грунтов: термическое закрепление грунтов горячим воздухом и сжигаемым топливом, замораживание, оттаивание естественным и искусственным путем, электроосмос, понижение уровня грунтовых вод легкими, эжекторными иглофильтрами, а также вакуумным методом, уплотнение пригрузкой, вибрированием, трамбованием и взрывами, использование различных волокнистых материалов, укрепление набивными сваями, силикатизация однорастворная, двухрастворная и газовая, использование энзимов, смолизация, струйная цементация однокомпонентная, двухкомпонентная и трехкомпонентная, битумизация в горячем и холодном виде. Также в таблицах приведены рекомендуемые грунтовые условия для применения того или иного метода, рассмотрены их преимущества и недостатки. В каждом методе кратко описана технология работ и используемые механизмы. К выбору того или иного метода стоит подходить индивидуально, но, применяя данную классификацию и таблицы, можно значительно упростить выбор подходящего метода закрепления грунтов основания.

© ПНИПУ

© Игошева Любовь Александровна – студентка, e-mail: 13lubashka@mail.ru.
Гришина Алла Сергеевна – аспирант, ассистент, e-mail: koallita@yandex.ru.

Lubov' A. Igosheva – Master Student, e-mail: 13lubashka@mail.ru.
Alla S. Grishina – Postgraduate Student, assistant, e-mail: koallita@yandex.ru.

REVIEW OF THE BASIC METHODS OF THE GROUND IMPROVEMENT

L.A. Igosheva, A.S. Grishina

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 01 February 2016
Accepted: 20 February 2016
Published: 30 June 2016

Keywords:

soil, bearing capacity, deformability,
soil reinforcement

ABSTRACT

The problem of improving soil physical and mechanical properties always appears when constructing and operating buildings and structures on soft ground to increase their bearing capacity and reduce deformability. On the one hand this is a problem, but on the other it is an opportunity for innovation and modernization of the existing methods of soil strengthening. Artificial soil strengthening is the impact on the soil through a variety of structural and technological measures, which increases soil bearing capacity and reduces strain. Currently, there are many methods of soil strengthening. Each method has advantages and disadvantages. Application area of the method often depends on the type of soil. This article presents the most popular methods of soil strengthening such as thermal grouting by hot air and burning fuel, freezing, thawing naturally and artificially, electro-osmosis, water depression by light ejector well points and vacuum, preloading using fill, vibrocompaction, dynamic and explosive compaction, the use of different fibrous materials and stone columns, silicization, the use of enzymes, tarring of soil, jet grouting, bituminous grouting. Also, recommended soil conditions are described in tables for the use of a particular method considering its advantages and disadvantages. Each method is briefly described the work technique and the mechanisms used. The choice of each method must be unique. With this classification and tables the selection of a suitable method of soil strengthening can be greatly simplified.

© PNRPU

Для повышения несущей способности и снижения деформаций грунтовых оснований существует множество способов искусственного закрепления грунтов. Условно разделим их на *физические* – укрепление массива грунта с помощью воздействия физических полей, *механические* – помещение в толщу грунта армирующих элементов, обладающих высокой прочностью на растяжение, *химические* – улучшение свойств грунтов с помощью нагнетания в их толщу специальных растворов (рисунок).

Способ закрепления выбирают исходя из грунтовых условий района строительства, а также производственных возможностей его выполнения. К выбору метода стоит подойти ответственно и учесть все преимущества и недостатки.

Первая рассматриваемая группа – физические методы закрепления грунтов. В табл. 1 представлены основные методы этой группы: термическое закрепление, замораживание, оттаивание, электроосмос и понижение уровня грунтовых вод. Также приведена разновидность методов, рекомендуемые грунтовые условия, указаны преимущества и недостатки.

Термическое закрепление грунта – преобразование структурных связей в грунте под воздействием высоких температур. Осуществляется либо нагнетанием в грунт под давлением воздуха, подогретого до температуры 600–800 °С, либо в результате сжигания топлива (солярное масло, мазут, природный газ и т.д.) в герметически закрытых скважинах, пробуренных для этой цели. После закрепления возрастают прочность и водостойкость грунтов, а также устраняются их просадочные свойства [1]. В соответствии с технологией необходимо поддерживать в скважине давление от 15 до 50 кПа, что достигается подачей раскаленного воздуха для усиления фильтрации раскаленных газов в грунте и поддержания необходимой температуры. Диаметр скважин принимают равным 10–20 см, в то время как глубина колеблется в пределах от 6 до 15 м и более. В зависимости от нагрузок

Методы усиления грунтов

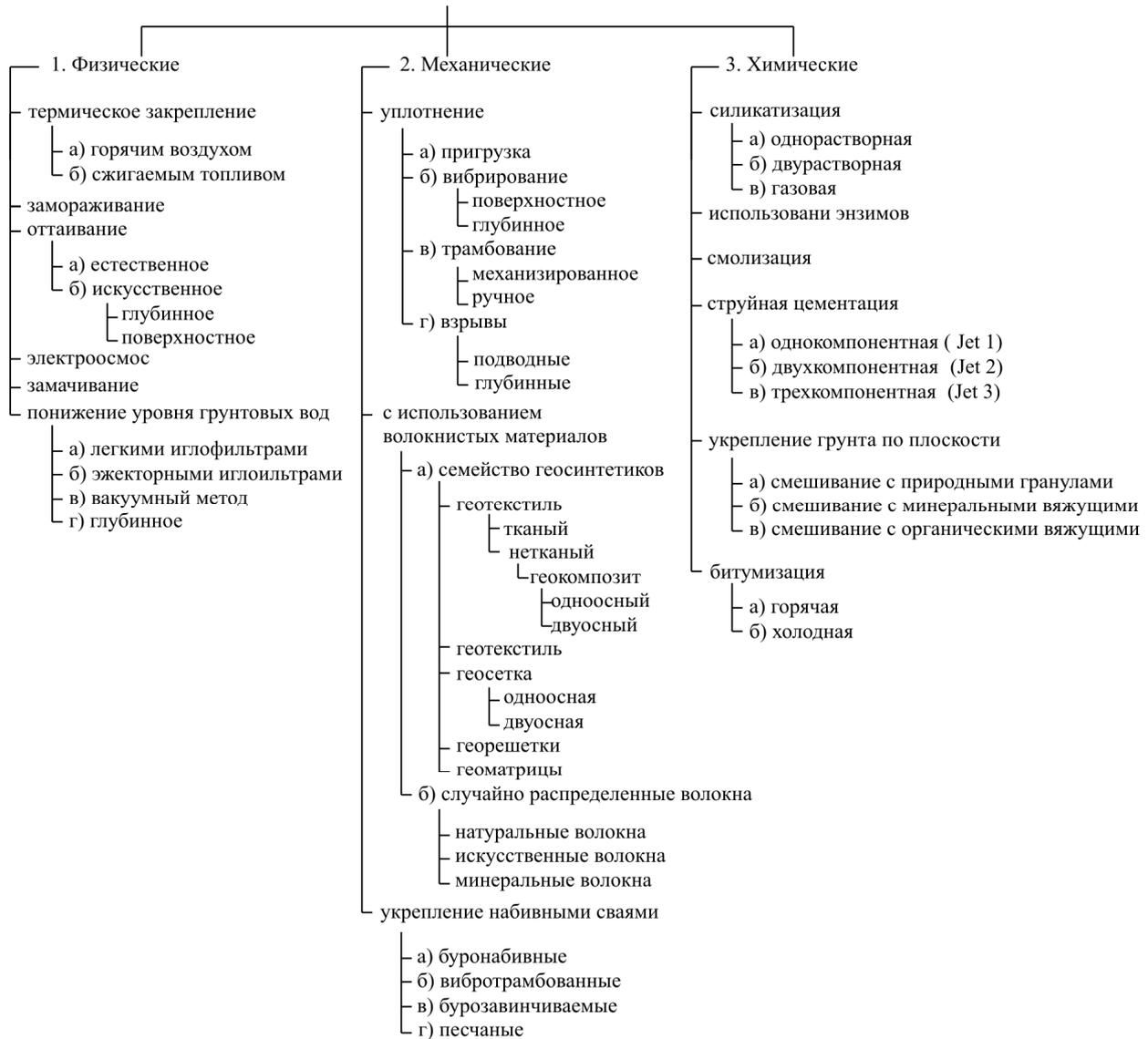


Рис. Методы усиления грунтов
Fig. Methods of soil reinforcement

Таблица 1

Физические методы усиления грунтов

Table 1

Physical methods of soil reinforcement

Название метода	Разновидность	Рекомендуемые грунтовые условия	Преимущества/ Недостатки
Термическое закрепление	Горячим воздухом, сжигаемым топливом	Лессовидные, неводонасыщенные пылевато-глинистые грунты	Относительно быстрый набор прочности / Высокая цена
Замораживание	Рассольное, с помощью азота	Водоносные грунты (от глинистых до скальных трещиноватых и кавернозных)	Возможно использование любых водоносных грунтов, на любой глубине. Наличие хорошо развитой научно-технической базы / Небольшая продолжительность сохранения эффекта (только при действии заморажи-

Название метода	Разновидность	Рекомендуемые грунтовые условия	Преимущества/ Недостатки
			вающей установки), естественное оттаивание продолжительно, влажность грунта повышается (так как происходит миграция воды от теплых к охлажденным слоям грунта)
Оттаивание	Искусственное	Грунты в мерзлом состоянии	Возможность производства работ в стесненных условиях, вблизи коммуникаций, в аварийных условиях. Может происходить в любом направлении / Значительная трудоемкость, энергетические затраты
	Естественное		Экономичность метода / Ограничение протекания, только сверху вниз, невозможен контроль
Электроосмос		Водонасыщенные связные грунты (супеси, суглинки)	Наиболее подходящий метод для водонасыщенных грунтов / Необходимость периодической смены полярности
Понижение уровня грунтовых вод	Легкие, эжекторные, иглофильтры	Песчаные грунты	Водопонижение глубиной от 4,5 до 12 м. Быстрота действия. Малая трудоемкость / Невозможность ведения работ при близком залегании водоупорных грунтов и близком расположении сооружений
	Вакуумный метод	Мелкозернистые грунты	Водопонижение глубиной до 22 м. Возможно применение в сложных гидрогеологических условиях / Необходимость постоянного использования энергии и отвода выкачанной воды

и их распределения по пятну застройки определяют расстояние между осями скважин. Обжиг грунта продолжается от 5 до 10 сут. Вокруг скважины образуется массив термически закрепленного грунта диаметром 1,5–3 м при сжигании 80–180 кг жидкого топлива на 1 м глубины скважины.

Для избежания проникновения грунтовой воды или водонасыщенных неустойчивых грунтов в сооружаемую выработку применяют искусственное замораживание грунтов, которое создает прочное ограждение, имеющее в плане круговую или прямоугольную форму из замороженного грунта. Для замораживания грунтов обычно используют холодильный агент или хладагент (чаще всего охлажденный водный раствор хлористого кальция – рассол). Главной функцией рассола является способность оставаться жидким при отрицательных температурах. Рассол, предварительно охлажденный на замораживающей станции, по системе труб подают к замораживающим колонкам, которые опущены в пробуренные скважины. Скважины бурят по контуру будущей выработки через всю толщу водоносных грунтов. Их конец должен быть заглублен на 2–5 м в водоупорный грунт. Радиус намораживаемого вокруг скважины ледогрунтового цилиндра составляет 1,25–1,5 м, по проекту, исходя из этих данных, рассчитывают расстояние между скважинами. Холодный рассол насосами нагнетается в распределитель, откуда он равномерно расходится по питающим трубам замораживающих колонок. После того как рассол опустился до дна

колонки, он поднимается вверх по кольцевому пространству между питающей трубой и замораживающей колонкой, омывая ее внутренние стенки. Происходит теплообмен, который приводит к замораживанию грунта (рассол отнимает тепло у грунта), окружающего колонку. Затем из колонки через оголовок рассол поступает в коллектор, а из него – на замораживающую станцию, где вновь охлаждается. В последние годы для искусственного замораживания грунтов начали использовать новый хладагент – жидкий азот. Он обладает очень низкой температурой испарения. В отличие от других промышленных хладагентов жидкий азот используют однократно (испаряющийся газ выпускают в окружающую среду).

Оттаивание – метод укрепления грунтов, при котором меняется фазовое состояние грунта (из мерзлого в талое). Естественное оттаивание не требует каких-либо технических мероприятий, в отличие от искусственного, для которого применяют пар, электроды и т.д. Паропрогрев или водопрогрев применим при глубине промерзания до 1,5 м с помощью игл, погруженных в грунт, и при наличии вблизи источника тепла (котельных, тепловых сетей). Иглы устанавливают в предварительно пробуренные в грунте шпурсы на расстоянии 1–1,5 м друг от друга в один ряд при разработке траншеи и в несколько параллельных рядов в шахматном порядке при разработке котлованов [2]. Паровые иглы погружают на глубину 0,7–0,75 глубины мерзлого слоя и подключают по 20–30 игл к магистральному трубопроводу. Сущность способа паропрогрева заключается в отдаче паром при охлаждении скрытой теплоты парообразования. Электропрогрев грунта вертикальными стержневыми электродами можно вести сверху вниз, снизу вверх, а также комбинированным способом (одновременно). Электроды забивают на всю толщину мерзлого грунта так, чтобы 5–10 см электродов вошли в незамерзший грунт. Полное заглубление электродов осуществляется на глубину 1,3–1,5 м, поэтому вертикальные электроды применяют при глубине промерзания более 0,7 м. Расстояние между электродами зависит от напряжения: при 220 В принимают 40–50 см, при 380 В – 70–80 см. Электрический ток, пройдя по талому грунту под мерзлым слоем (мерзлый грунт плохо пропускает ток), выделяет тепло, которое аккумулируется и оттаивает вышележащие слои мерзлого грунта, процесс идет снизу вверх.

Электроосмос основан на том, что в результате пропускания через грунт постоянного электрического тока, а также введения электролита происходит ряд физико-химических процессов, ведущих к осушению и упрочнению грунта. В грунтах происходит движение воды к отрицательному электроду (электроосмос) и одновременно с этим перемещение коллоидальных взвешенных в воде частиц грунта к положительному электроду (электрофорез) под воздействием постоянного тока. Для обезвоживания грунта в него погружают электроды на расстоянии 0,6–1,5 м один от другого. В качестве положительных электродов используют стальные стержни диаметром 150 мм, а в качестве отрицательных – трубы диаметром 100 мм с отверстиями диаметром 3 мм. Для усиления эффекта электрохимического закрепления в грунт (в процессе обработки) вводят химический раствор (силикат натрия, хлористый калий и др.), способствующий более быстрому и лучшему его преобразованию. Для проведения работ чаще всего используют инъектор (перфорированную трубу) и трансформатор [3–5].

Сущность метода водопонижения основывается на том, что поверхность воды в грунте приобретает воронкообразную форму с уклоном к месту откачки грунтовых вод, которые поступают в скважину. Воронкообразная (пониженная) поверхность грунтовых вод назы-

вается депрессионной поверхностью, а депрессионной воронкой называют пространство между этой поверхностью и непониженной поверхностью грунтового потока. Грунт, находящийся ниже уровня грунтовых вод, испытывает взвешивающее действие воды, следовательно, снижается удельный вес грунта. В таком случае используют искусственное водопонижение, вследствие чего грунт оказывается выше уровня грунтовых вод, удельный вес грунта увеличивается, основание уплотняется. Депрессионная воронка увеличивается по мере откачки воды. Развития депрессионной воронки не происходит, наступает стабилизация, если интенсивность откачки остается постоянной. С прекращением откачки уровень грунтовых вод восстанавливается. Основная цель водопонижения – поддержание депрессионных воронок в осушенном состоянии в течение всего периода возведения сооружения. В ряде случаев водопонижение применяют для снятия избыточного напора в подстилающих водоносных грунтах, отделенных от дна котлована слоем водоупорного грунта. При водопонижении используют несколько методов: с помощью легких и эжекторных иглофильтров и вакуумный метод. Способ водопонижения с помощью легких иглофильтров основан на создании и поддержании вакуума самовсасывающими насосами в широко разветвленной сети иглофильтров, которые погружают в грунт и соединяют резиновыми шлангами с коллектором. Грунтовая вода засасывается через фильтры во всасывающий коллектор и откачивается насосами за пределы осушаемой площади. Легкий иглофильтр выглядит как колонна труб диаметром 46–50 мм и длиной до 8,5 м. В нижней части колонны находится фильтровое звено. Фильтровое звено состоит из двух труб – наружной и внутренней. Наружная труба по всей поверхности имеет равномерно распределенные отверстия и обматывается спиралью, поверх которой натягивается фильтрационная сетка, а внутренняя имеет открытый нижний конец. Окончанием звена выступает наконечник с шаровым клапаном. Каждый иглофильтр погружают в грунт с помощью гидроподмыва, используя давление струи воды. Эжекторные иглофильтры имеют специальное устройство для подъема воды – эжектор (водоструйный насос). Принцип работы эжекторных иглофильтров основан на действии водоструйного насоса: струя воды поднимает на более высокий уровень некоторое количество воды, которое она захватила с нижнего уровня.

Сущностью вакуумного метода является создание устойчивого вакуума на наружных поверхностях водоприемных устройств. Использование этого метода позволяет усилить эффект водопонижения при производстве работ в сложных условиях (очередность водоупорных и водоносных слоев, в грунтах с малой водопроницаемостью, в грунтах неоднородного сложения и др.).

Вторая рассматриваемая группа – механические методы закрепления грунтов основания. Методы считаются наиболее популярными, так как они не предполагают изменения свойств грунтов под действием растворов или физических полей, что довольно сложно контролировать. Механические методы предполагают армирование грунта готовыми элементами из различных материалов, обладающих высокой прочностью на растяжение.

В табл. 2 представлены основные методы этой группы: уплотнение грунтов, укрепление геосинтетиками и случайно распределенными волокнами, укрепление сваями. Также приведена разновидность методов, рекомендуемые грунтовые условия, указаны преимущества и недостатки.

Уплотнение грунта методом пригрузки вызывает ускорение осадки вследствие увеличения нагрузки на грунт. Суть метода временной пригрузки состоит в приложении нагрузки, в результате чего расчетные осадки с заданной степенью консолидации за-

вершаются за время, значительно меньшее, чем время при обычной консолидации (без ускорения осадки). Эффективность временной пригрузки напрямую зависит от времени ускорения осадок, а именно – от сжимаемости основания, величины нагрузки и требуемой степени консолидации.

Таблица 2

Механические методы усиления грунтов

Table 2

Mechanical methods of soil reinforcement

Название метода	Разновидность	Рекомендуемые грунтовые условия	Преимущества/ Недостатки
Уплотнение	Пригрузка	Просадочные, набухающие, техногенные, сильносжимаемые, органические, рыхлые песчаные	Отсутствие потребности в специальной механизации, возможность ускорения вторичной осадки / Потребность в дополнительных материалах, увеличивающих затраты. Высокая трудоемкость
	Вибрирование	Песчаные, песчано-гравелистые грунты	Низкий уровень шума при работе, простота в эксплуатации, маневренность / Грунт должен обладать оптимальной влажностью. Плотность грунта по глубине неравномерна
	Трамбование		Простота метода, возможность применения в зимних условиях / Быстрый износ механизма лебедки и тросов
	Взрывы	Просадочные грунты, супеси, суглинки, лессовые грунты	Простота производства работ. Возможность быстрого уплотнения. Небольшая стоимость / Существует необходимость обеспечить влажность грунтов. Неравномерное уплотнение по толщине слоя. Ограниченность применения вблизи зданий и сооружений
Семейство геосинтетиков	Геотекстиль, геосетка, георешетка, геоматрицы	Глинистые, просадочные, техногенные, на территориях со сложными гидрогеологическими климатическими условиями	Простота производства работ. Применение в стесненных условиях. Экологичность, низкая материалоемкость и экономичность метода / Сложность в бережном обращении с некоторыми материалами
Случайно распределенные волокна	Натуральные, искусственные, минеральные	Все грунты (кроме переувлажненных)	Изотропное увеличение прочности грунтового композита без плоскости наименьшего сопротивления. Отсутствие надобности анкеровки. Отсутствие влияния погодных условий. Широкий спектр применяемых материалов / Отсутствие стандартов. Сложность контроля гомогенности смеси
Сваи	Бурунабивные	Во всех грунтах (исключая скальные, крупнообломочные, обводненные, структурно-неустойчивые)	Экономия материалов (изготавливают любой длины). Возможность производства работ вблизи зданий и сооружений, отсутствие значительных динамических воздействий / По всей высоте сваи невозможно контролировать монолитность и плотность бетона, возможен размыв грунтовыми водами несхватившегося бетона

Название метода	Разновидность	Рекомендуемые грунтовые условия	Преимущества/ Недостатки
	Вибро-трамбованные	Сухие связные грунты	Изготовление свай с различной несущей способностью / Шум, запрет производства работ вблизи существующих зданий
	Бурозавинчиваемые	В любых геологических и гидрогеологических условиях	Быстрота и всесезонность монтажа. Использование на сложных рельефах и в любых грунтах. Производство свай на заводе (уменьшенная стоимость) / Коррозия, сложный контроль качества сварных швов
	Песчаные	Водонасыщенные пески, содержащие органические примеси, и лессовые просадочные грунты	Получение геомассива из свай и окружающего грунта. Экономичность. Создается уплотненное основание со средним модулем деформации / Необходимость тщательного уплотнения песка

Метод виброуплотнения основан на создании вибрации, которая передается от одной частицы к другой, тем самым приводит их в движение. Машины вибрационного действия сообщают грунту частые колебательные движения, из-за чего разрушаются связи между частицами. Из-за разных сил инерции и импульсов происходит уплотнение и взаимное перемещение. Процесс вибрации также значительно уменьшает условные коэффициенты вынужденного трения грунтов, что снижает сопротивление частиц трению. Увеличение частоты колебаний повышает эффективность уплотнения.

Следующий метод уплотнения грунта механическим способом – трамбование или послойное уплотнение. Для уплотнения применяют трамбовки, которые бывают механизированными и ручными. Механизированное уплотнение специальной строительной техникой существенно увеличивает сметную стоимость строительства, но при больших объемах работ применение только ручных механизмов нецелесообразно. Уплотнение грунтов с помощью трамбовок ведут до тех пор, пока поверхность грунта при каждом последующем падении не будет опускаться на одну и ту же величину, называемую «отказом». Размер отказа ориентировочно принимают равным для пылевато-глинистых грунтов 1–1,5 см, для песчаных – 0,5–1 см. Отказ достигается после 8–12 ударов по одному следу. Режим уплотнения устанавливается экспериментально и зависит от грунтовых условий на строительной площадке.

При применении метода уплотнения просадочных грунтов подводными и глубинными взрывами необходимо предварительное замачивание, для того чтобы приблизить грунт к состоянию, близкому к полному водонасыщению. Далее (соответственно в грунтовой или водной среде) производят взрыв зарядов взрывчатого вещества, что способствует разрушению существующей структуры грунта и приводит к искусственному уплотнению.

Слой воды, находящийся ниже заряда, распределяет взрывную волну, действующую на грунт, в то время как столб воды, расположенный выше заряда, гасит энергию взрыва, которая направлена вверх.

Использование волокнистых материалов, а именно – геосинтетиков, для укрепления грунтовых оснований в настоящее время стало популярным. Этому способствует их большое разнообразие, простота и эффективность технологии. Существует несколько разновидностей геосинтетических материалов, применяемых с целью армирования грун-

товых оснований: геотекстиль, геосетка, георешетка, геоматрица. В зависимости от способа изготовления и, как следствие, итоговых технических характеристик различают геотекстиль тканый и нетканый. Нетканый геотекстиль представляет собой плоскую структуру, которая состоит из синтетических волокон, скрепленных между собой механическим методом. Такой материал не гниет, через него не прорастают корни растений, а структура обеспечивает хорошие прочностные и фильтрующие свойства. Нетканые материалы исторически были первым типом геосинтетиков, которые выпускались текстильной промышленностью. До сих пор эти материалы продолжают использоваться во всем мире при различных геотехнических работах. Разделение, армирование, фильтрация, дренаж, а также их сочетание – основные функции геотекстиля. Тканый геотекстиль – плоская и системная структура, сотканная из нескольких рядов синтетических лент, которые позволяют получить системные малоразмерные переплетения. Такой материал прочен во всех направлениях, морозостоек. При укладке в земляное сооружение тканый геотекстиль образует сложную конструкцию, в которой действует как арматура. Геосетка – сетчатая плоская структура, образованная двумя перекрывающимися рядами волокон толщиной от 3 до 15 мм, крест-накрест под углом 60° и 90° , последующим свариванием в точках контакта, когда полимер находится еще в полужидком состоянии. Геосетки получают экструзионным методом из термопластических полимеров, их также часто используются в комбинации с геотекстилем и с геомембранами. Основные функции – фильтрационная и дренажная. Георешетка – это сотовая конструкция из полиэтиленовых лент, которые соединены между собой сварными швами, отличающимися высокой прочностью, и имеют шахматную форму расположения. Они используются прежде всего для армирования грунтовых оснований с целью укрепления, учитывая их особое строение, когда зажатый между ячейками георешетки грунт не может перемещаться от действующих нагрузок и все растягивающие напряжения передаются на георешетку. Геоматрицы – новинка на отечественном рынке, еще не получившая широкой известности в других странах. Конструктивно геоматрицы представляют собой короб без верхней крышки, к стенкам которого прикреплены геотекстильные ленты. Пересекаясь, они образуют внутри короба прямоугольные ячейки [6–18].

Фиброармированный грунт представляет собой смесь грунта с короткими волокнами разного происхождения (корни деревьев, полимерные волокна, отходы производства и т.д.). Отдельные короткие волокна равномерно смешивают с грунтом для обеспечения изотропного увеличения прочности грунтового композита без плоскости наименьшего сопротивления. Смешивание волокон с грунтом можно осуществлять при помощи привычного оборудования (например, при помощи роторного смесителя) [7, 8].

Усиление массива грунта может быть также осуществлено при помощи свай. С этой целью используются различные типы свай. Конструкции свай, применяемых для усиления грунтов, и технологии их устройства постоянно совершенствуются. Усиление сваями является одним из наиболее простых с технологической точки зрения способов и позволяет обеспечить значительную экономию материалов по сравнению с полной выемкой слабых грунтов и заменой их на более прочные. В общем случае технология усиления массива грунта сваями заключается в устройстве скважин, образованных в результате принудительного вытеснения грунта, и заполнении их бетонной смесью, крупнообломочным грунтом или песком. В зависимости от способа устройства и конструкции сваи могут играть роль несущих элементов, воспринимающих нагрузки от сооружения, или применяться для уплотнения и улучшения строительных свойств слабых водонасыщенных грунтов [2, 19, 20].

Предварительное бурение скважин до заданной глубины является характерной особенностью устройства буронабивных свай. В скважину, пробуренную до проектной отметки, опускают трубу диаметром 0,25–0,40 м и загружают бетонную смесь. После того как скважина заполнится на глубину 1 м, бетонную смесь уплотняют, а обсадную трубу медленно поднимают вверх, пока высота смеси в трубе не уменьшится до 0,3–0,4 м. Далее снова загружается бетонная смесь, и процесс повторяется. Поскольку диаметр скважины больше диаметра обсадной трубы, поверхность пробуренного грунта оказывается неровной, шероховатой. Наполняя обсадную трубу бетонной смесью, ее поднимают и уплотняют смесь, бетон заполняет весь свободный объем, включая зазор между стенками скважины и обсадной трубой. Прочность бетона повышается в связи с тем, что часть бетона и цементного молока проникает в грунт. Чтобы связать сваю с ростверком, производят армирование свай на глубину до 2 м.

Вибротрамбованные сваи устраивают в сухих связных грунтах. В грунт погружают обсадную трубу с башмаком, далее погружают порцию бетонной смеси, которую трамбуют трамбующей штангой, подвешенной к вибропогружателю; при трамбовании образуется уширенная пята сваи, далее укладывают и трамбуют последующие слои и извлекают обсадную трубу при работающем вибропогружателе. Для того чтобы связать сваю с ростверком, устанавливают арматурный каркас.

Следующий рассматриваемый метод – использование бурозавинчивающихся свай. Сущность метода заключается в том, что металлическая труба не забивается в грунт, а завинчивается. На трубу в заводских условиях навивается узкий шнек из арматуры диаметром 10–16 мм с шагом 200–500 мм. Труба может быть оснащена заглушкой с рыхлителями, глухими или теряемыми, позволяющими при необходимости не допустить воду в тело трубы, все эти оснащения зависят от грунтовых условий. Окружающий грунт при завинчивании трубы частично уплотняется, даже некоторая его часть выдавливается наружу. Если труба в нижней части глухая, то после завинчивания до проектной отметки в нее вставляется арматурный каркас и она заполняется бетонной смесью. В процессе схватывания бетона труба вывинчивается, в грунте остается башмак, на который опирается железобетонная буронабивная свая.

Песчаная свая воспринимает нагрузку совместно с окружающим ее уплотненным грунтом, так как при устройстве сжимаемость сваи незначительно отличается от сжимаемости уплотненного окружающего грунта. Такие сваи работают как дрены, отводя поровую воду из водонасыщенных грунтов на поверхность, в этом заключается их особенность.

Технология устройства песчаных свай состоит в следующем: в слабый грунт с помощью вибромолотов или вибропогружателей погружают инвентарную металлическую трубу диаметром $d = 0,325 \dots 1,5$ м, которая снабжена раскрывающимся наконечником. В процессе погружения трубы грунт вокруг образовавшейся полости уплотняется, далее в трубу порциями засыпается песок крупной фракции и труба постепенно извлекается (при этом происходит раскрытие наконечника) из грунта до полного заполнения ствола сваи [19].

В плане песчаные сваи размещают в шахматном порядке, при этом важно условие: плотность грунта в межсвайном пространстве должна достигать проектного значения во всем уплотняемом массиве. Толщиной от полуметра до метра поверх песчаных свай устраивается уплотненная песчаная подушка. Ее основным назначением является равномерное распределение давления от возводимого сооружения на уплотненный массив, а также

ускорение фильтрации и отвода отжимаемой из массива грунта поровой воды за пределы площадки строительства.

Третья рассматриваемая группа – химические методы закрепления грунтов, которые довольно популярны в наше время. Все химические процессы происходят вследствие химического взаимодействия реагентов, вводимых в грунт, между собой, а также с минеральными частицами. Экономическая целесообразность методов неоднозначна и требует тщательного анализа в каждом конкретном случае: с одной стороны, довольно дешевые растворы, с другой – дорогостоящее оборудование.

В табл. 3 представлены основные методы этой группы: силикатизация, смолизация, использование энзимов, струйная цементация и битумизация. Также приведена разновидность методов, рекомендуемые грунтовые условия, указаны преимущества и недостатки.

Таблица 3

Химические методы усиления грунтов

Table 3

Chemical methods of soil reinforcement

Название метода	Разновидность	Рекомендуемые грунтовые условия	Преимущества/ Недостатки
Силикатизация	Одно-растворная	Пески, пылеватые пески (пльвуны), лессовые, просадочные грунты	Надежность, долговечность, экономичность. Отсутствие воздействия агрессивных сред / Ограничение во влажности грунта
	Двух-растворная		Экономия времени, высокая прочность, более однородный массив (по сравнению с однорастворной) / Ограничение во влажности грунта
	Газовая		Укрепление за короткий промежуток времени / Повышенные экономические затраты
Смолизация	Однорастворная, двухрастворная	Песчаные (средние, мелкие, пылеватые), лессовые грунты	Высокая прочность, быстрый набор прочности. Устойчивость грунта к действию агрессивных сред / Выделение карбамидными смолами токсичного формальдегида
Использование энзимов	–	Глинистые грунты	Экономия затрат на этапах строительства и эксплуатации / Отсутствие нормативов, малая изученность метода
Струйная цементация	Однокомпонентная, двухкомпонентная, трехкомпонентная	Гравелистые, крупные и среднезернистые пески, глины	Высокая скорость, возможность работать в стесненных условиях, гибкость, маневренность / Дорогостоящее оборудование
Битумизация	Горячая	Скальные трещиноватые породы	Возможность применения грунтов с любыми агрессивными водами, для больших скоростей водного потока / Сложное техническое оборудование, повышенные меры безопасности
	Холодная	Скальные трещиноватые породы, пески	Экономия топлива, трудозатрат, битума / Сильная текучесть битума (возможность прорыва битумизационной завесы под большим давлением грунтовых вод)

Технология химического закрепления состоит из двух основных этапов. На первом этапе нагнетается водный раствор клеящего вещества (в большинстве случаев силиката натрия) или смолы. Нагнетание происходит под давлением через специализированные устройства (инъекторы) или скважины. Второй этап предполагает застывание раствора. Грунт и клеящее вещество образуют массив с улучшенными характеристиками (твердый, однородный). В качестве клеящих используют различные вещества, от которых зависит название метода: смолизация или силикатизация.

Склеивание грунтов может осуществляться разными методами: последовательно – первым закачивают клей (раствор смолы или жидкое стекло), далее – отвердитель, и одновременно – закачивание в грунт клея и отвердителя, смешанных до начала процесса.

Укрепление грунтов методом силикатизации довольно распространено в России. Сущность метода силикатизации заключается в нагнетании в грунт раствора жидкого стекла, в результате чего происходит химическая реакция и выпадает гель кремниевой кислоты, которая, в свою очередь, связывает частицы грунта наподобие цемента. Наиболее прочное закрепление достигается при последовательной подаче компонентов. В грунте существует природный отвердитель; при подаче жидкого стекла, которое имеет большую проникающую способность, между ними происходит процесс схватывания. При последовательной подаче компонентов происходит значительная экономия времени, а также упрощение технологии подачи раствора, так как давление подачи существенно ниже. При одновременной подаче основного компонента клея и отвердителя необходимо увеличить скорость подачи раствора в инъектор, а также увеличить давление, чтобы композит достиг заданной глубины инъектирования, ведь при соединении компонентов начинается процесс схватывания компонентов клея, следовательно, увеличивается вязкость раствора и снижается его текучесть. Область применения силикатизации и смолизации довольно обширна: например, при подготовке грунтовых оснований для сложных зданий и сооружений, а также для укрепления грунтов под существующими зданиями и сооружениями.

Газовая силикатизация используется для сильно увлажненных грунтов. В качестве отвердителя используется углекислый газ CO_2 . Есть несколько разновидностей этого способа – без предварительной и с предварительной обработкой грунта углекислым газом. Газовая силикатизация дает возможность закреплять грунты, степень влажности которых различна ($k_f = 0,1 \dots 0,2$ м/сут).

Метод укрепления грунтов с помощью энзимов используется для укрепления грунтов под линейные объекты строительства (дороги, железные дороги, трубопроводы и т.д.). Энзимы можно отнести к высокомолекулярным белкам. В полимерной структуре энзимов есть полости, которые включают гидрофобные и гидрофильные радикалы и группировки. Поверхностное натяжение воды уменьшается, если растворить в ней фермент, поскольку энзимы обладают свойствами ПАВ и действуют как гидрофобизаторы. В результате молекулярное и электростатическое взаимодействие между частицами грунта усиливается. Создается более плотный грунт, так как структура воды изменяется, что способствует ее интенсивному удалению. Из-за особого строения энзимов при их оседании на частицах грунта формируются прочные водородные связи. Водный раствор с энзимами изготавливают из расчета 2 мл на 1 л воды [19].

В настоящее время встречается все больше информации о применении метода струйной цементации (*Jet-grouting*). Сущность технологии заключается в одновременном разру-

шении грунта и смешивании его с цементным раствором, поступающим в грунт под большим давлением. В результате после затвердевания цементного раствора образуется новый материал – грунтобетон, который обладает качественными характеристиками (прочностными и деформационными). Устройство грунтоцементных свай производится в два этапа – в процессе прямого и обратного хода буровой колонны. Во время прямого хода бурят лидерную скважину до проектной отметки. В процессе обратного хода подают цементный раствор под высоким давлением в форсунки монитора, расположенного на нижнем конце буровой колонны, и поднимают колонну, одновременно вращая ее. Можно выделить три разновидности технологии:

1. Однокомпонентная технология (Jet 1). Грунт разрушают струей цементного раствора под давлением 400–500 атм. Эта технология требует минимального комплекта оборудования и считается на порядок проще, но диаметр получившихся свай также является наименьшим (600 мм для глин и 700–800 для песчаных грунтов) по сравнению с другими вариантами технологии.

2. Двухкомпонентная технология (Jet 2). Для того чтобы увеличить длину водоцементной струи, в этом варианте используют энергию сжатого воздуха. С целью избежания перемешивания сжатого воздуха и цементной смеси используют специальные двойные полые штанги (по внешней полости подают цементный раствор, а по внутренним – сжатый воздух). Диаметр свай в глинах составляет около 1200 мм, а в песках – 1500 мм.

3. Трехкомпонентная технология (Jet 3) состоит из двух этапов. На первом этапе происходит размыв грунта водовоздушной струей для образования полостей. Второй этап предполагает заполнение полученных полостей цементно-песчаным раствором. Основным достоинством данного варианта является получение колонн из чистого цементного раствора. К недостаткам относим сложность схемы, необходимость применения тройных штанг, а также дополнительного технологического оборудования. В результате возможны сваи диаметром 2500 мм.

Технологическое оборудование, необходимое для данного метода, состоит из миксерной станции, цементировочного насоса высокого давления, силоса для хранения цемента и буровой установки. Для технологии Jet 2 дополнительно необходим компрессор, а для технологии Jet 3 – компрессор и второй насос для нагнетания цемента.

Метод битумизации отличается от цементации тем, что в грунты нагнетается жидкий битум (горячий или холодный). Для нагнетания горячего битума в грунт бурят скважины диаметром 80–100 мм по контуру котлована на расстоянии 0,7–1,0 м одна от другой. Каждую скважину необходимо заглубить до водоупора или на глубину, превышающую заложение котлована на 60–100 см, а затем ее прочистить и промыть. В буровую скважину опускают трубу – иньектор ($d = 40$ мм) с перфорированными отверстиями ($d = 15$ мм), через которые битум проникает в скважину. В скважине ниже зоны, подлежащей битумизации, устраивают пробку (тампон) из цемента или дерева. Заполняют трещины породы горячим битумом (при температуре 200–220 °С) под давлением до 8 атм. Для того чтобы в буровых скважинах температура битума не уменьшилась (требуемая температура 180–220 °С) и он не изменил свое агрегатное состояние, в иньекторе на специальных фарфоровых изоляторах закрепляется металлический стержень, соединенный с сетью постоянного электрического тока.

В большинстве случаев горячая битумизация сочетается с холодной, так как горячий битум не может проникнуть в мелкие трещины (менее 1 мм). Холодная битумизация считается тем успешнее, чем мельче частицы битума в эмульсии.

Сущность способа холодной битумизации заключается в том, что в грунт через скважины нагнетают тонкодисперсные битумные эмульсии. Данный метод применяют для уплотнения как скальных пород, так и песчаных грунтов. Концентрация эмульсии зависит от фракции песка. В состав битумной эмульсии входят электролиты, которые вызывают процесс коагуляции, и придают грунтам водонепроницаемость, заполняя поры и трещины.

Авторами предложена классификация основных методов укрепления грунтов основания, которая подразделяет их на три большие группы: физические, механические и химические. Также для каждой группы приведены таблицы (см. табл. 1–3), в которых отражены популярные разновидности методов, рекомендуемые грунтовые условия, а также преимущества и недостатки. Используя классификацию и таблицы (см. табл. 1–3), можно упростить выбор подходящего метода закрепления грунтов основания в каждом конкретном случае.

Укрепление грунтов оснований – широкая тема. Невозможно охватить каждый ее аспект, так как это быстроразвивающееся направление, которое постоянно совершенствуется. С одной стороны, это проблематично, но с другой – дает возможности для инноваций [20].

В каждом отдельном случае выбор того или иного метода индивидуален. Необходимо проанализировать его с разных сторон – будь то область применения, экономические составляющие или преимущества и недостатки. Кроме того, различные методы могут быть объединены, чтобы справиться с большим диапазоном ситуаций.

На территории Пермского края распространены глинистые грунты. Актуальным будет исследование способов укрепления, применимых для глинистых грунтов, в том числе электрохимическое закрепление грунтов основания, которое не требует ручного труда, а также больших затрат времени и финансов.

Библиографический список

1. Инъекционное химическое закрепление грунтов. Термическое закрепление грунтов: типовая технологическая карта. – СПб., 2009.
2. Методы подготовки и устройства искусственных оснований: учеб. пособие / Р.А. Мангушев, Р.А. Усманов, С.В. Ланько, В.В. Конюшков. – М.; СПб.: Изд-во АСВ, 2012. – 266 с.
3. Жинкин Г.Н., Калганов В.Ф. Электрохимическая обработка глинистых грунтов в основаниях сооружений. – М.: Стройиздат, 1980. – 164 с.
4. Ивлиев Е.А., Липатов В.В. Противофильтрационные электроосмотические завесы в грунте // Электронная обработка материалов. – 2006. – № 3. – С. 182–190.
5. Электроосмос как способ улучшения физических и механических свойств связных грунтов / С.И. Алексеев, Д.Н. Понедельников, И.В. Копылов, Г.Р. Курбанов // Техника и технологии. – 2012. – № 4. – С. 86–93.
6. Машенко А.В., Пономарев А.Б. Анализ изменения прочностных и деформационных свойств грунта, армированного геосинтетическими материалами при разной степени водонасыщения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 4. – С. 264–273.
7. Пономарев А.Б., Кузнецова А.С., Богомолова О.А. Результаты исследований фиброармированного песка // Актуальные проблемы геотехники: сб. ст., посвященный 60-летию

профессора А.Н. Богомолова / ред. А.Н. Богомолов, А.Б. Пономарев. – Волгоград, 2014. – С. 140–147.

8. Кузнецова А.С., Пономарев А.Б. Планирование и подготовка эксперимента трехосного сжатия глинистого грунта, улучшенного фибровым армированием // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 1. – С. 151–161.

9. Татьянаников Д.А., Клевеко В.И. Исследование характера зависимости «деформация – линейная жесткость» для разных типов геосинтетических материалов // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2013. – № 1. – С. 165–172.

10. Клевеко В.И. Исследование работы армированных глинистых оснований // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2014. – № 4. – С. 101–110.

11. The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals / A. Bartolomey, A. Bogomolov, V. Kleveko, A. Ponomarev, V. Ofrikhter // Proceedings of the twelfth European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. – Amsterdam, Netherlands, 1999. – Vol. 2. – P. 1197–1202.

12. Клевеко В.И. Применение геосинтетических материалов в дорожном строительстве в условиях Пермского края // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 1. – С. 114–123.

13. Ponomaryov A., Zolotozubov D. Several approaches for the design of reinforced bases on karst areas // Geotextiles and Geomembranes. – 2014. – No. 42. – P. 48–51.

14. Методы строительства армогрунтовых конструкций: учеб.-метод. пособие / В.Г. Офрихтер, А.Б. Пономарев, В.И. Клевеко, К.В. Решетникова. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 145 с.

15. Соколова В.Д., Клевеко В.И. Применение метода конечных элементов для моделирования работы покрытия городской площади из брусчатки на армогрунтовом основании // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2014. – № 4. – С. 77–89.

16. Клевеко В.И. Оценка величины осадки фундамента на глинистых основаниях, армированных горизонтальными прослойками // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. – 2012. – № 1. – С. 89–98.

17. Игошева Л.А., Клевеко В.И. Геосинтетические материалы в конструкциях дорожных одежд автомобильных стоянок в сложных инженерно-геологических условиях // Геология в развивающемся мире. – 2015. – Т. 2. – С. 33–37.

18. Игошева Л.А., Петренева О.А., Клевеко В.И. Применение геосинтетических материалов при проектировании автомобильных стоянок в сложных инженерно-геологических условиях [Электронный ресурс] // Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии. – 2015. – Вып. 4, ч. 1. – URL: <http://sbornikstf.pstu.ru/council/?n=4&s=243>.

19. Абелев М.Ю. Строительство промышленных и гражданских сооружений на слабых водонасыщенных грунтах. – М.: Стройиздат, 1983. – 247 с.

20. Construction Processes. State of the Art Report / J. Chu, S. Varaksin, U. Klotz, P. Mengé // Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering. – Alexandria, Egypt, 2009. – P. 14–28.

References

1. In"eksionnoe khimicheskoe zakreplenie gruntov. Termicheskoe zakreplenie gruntov [Injecting chemical grouting. Thermal grouting]. Saint-Petersburg, 2009.
2. Mangushev R.A., Usmanov R.A., Lan'ko S.V., Konushkov V.V. Metody podgotovki i ustroistva iskusstvennykh osnovanii [Methods of preparation and construction of artificial bases]. Moscow; Saint-Petersburg: Assotsiatsiia stroitel'nykh vuzov, 2012. 266 p.
3. Zhinkin G.N., Kalganov V.F. Elektrokhimicheskaiia obrabotka glinistykh gruntov v osnovaniakh sooruzhenii [Electrochemical treatment of clayey soils of building bases]. Moscow: Stroiizdat, 1980. 164 p.
4. Ivliiev E.A., Lipatov V.V. Protivofil'tratsionnye elektroosmoticheskie zavesy v grunte [Electroosmotic barrier in the ground]. *Elektronnaia obrabotka materialov*, 2006, no. 3, pp. 182-190.
5. Alekseev S.I., Alekseev S.I., Ponedel'nikov D.N., Kopylov I.V., Kurbanov G.R. Elektroosmos kak sposob uluchsheniia fizicheskikh i mekhanicheskikh svoistv svyaznykh gruntov [Electroosmosis as a way to improve the physical and mechanical properties of cohesive soils]. *Tekhnika i tekhnologii*, 2012, no. 4, pp. 86-93.
6. Mashchenko A.V., Ponomarev A.B. Analiz izmeneniia prochnostnykh i deformatsionnykh svoistv grunta, armirovannogo geosinteticheskimi materialami pri raznoi stepeni vodonasyshcheniia [Analysis of changes in the strength and deformation properties of soil reinforced with geosynthetic materials with different degrees of saturation]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 4, pp. 264-273.
7. Ponomarev A.B., Kuznetsova A.S., Bogomolova O.A. Rezul'taty issledovaniia fibroarmirovannogo peska [Research results of fiber reinforced sand]. *Sbornik statei, posviashchenyi 60-letiiu professora A.N. Bogomolova "Aktual'nyie problemy geotekhniki"*. Eds. A.N. Bogomolov, A.B. Ponomarev. Volgograd, 2014, pp. 140-147.
8. Kuznetsova A.S., Ponomarev A.B. Planirovanie i podgotovka eksperimenta trekhosnogo szhatiia glinistogo grunta, uluchshennogo fibrovym armirovaniiem [Experimental design and triaxial test preparation of clay soils treated by fiber reinforcement]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2013, no. 1, pp. 151-161.
9. Tat'iannikov D.A., Kleveko V.I. Issledovanie kharaktera zavisimosti "deformatsiia – lineinaia zhestkost'" dlia raznykh tipov geosinteticheskikh materialov [Study of the nature of dependence „strain – linear stiffness“ for different geosynthetics types]. *Transport. Transportnye sooruzheniia. Ekologiya*, 2013, no. 1, pp. 165-172.
10. Kleveko V.I. Issledovanie raboty armirovannykh glinistykh osnovanii [Research of the work of reinforced clay soils]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2014, no. 4, pp. 101-110.
11. Bartolomey A., Bogomolov A., Kleveko V., Ponomarev A., Ofrikhter V. The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals. *Proceedings of the twelfth European conference on soil mechanics and geotechnical engineering*. Amsterdam, Netherlands, 1999, vol. 2, pp. 1197-1202.
12. Kleveko V.I. Primenenie geosinteticheskikh materialov v dorozhnom stroitel'stve v usloviiah Permskogo kraia [Application of geosynthetics in road construction in perm region]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2013, no. 1, pp. 114-123.

13. Ponomaryov A., Zolotozubov D. Several approaches for the design of reinforced bases on karst areas. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, no. 42, pp. 48-51.

14. Ofrikhter V.G., Ponomarev A.B., Kleveko V.I., Reshetnikova K.V. Metody stroitel'stva armogruntovykh konstruksii [Construction methods of reinforced soil structures]. Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2010. 145 p.

15. Sokolova V.D., Kleveko V.I. Primenenie metoda konechnykh elementov dlia modelirovaniia raboty pokrytiia gorodskoi ploshchadi iz bruschatki na armogruntovom osnovanii [Application of finite element method for modeling workcovering urban square of stone blocks on the reinforced bottom]. *Transport. Transportnye sooruzheniia. Ekologiya*, 2014, no. 4, pp. 77-89.

16. Kleveko V.I. Otsenka velichiny osadki fundamenta na glinistyykh osnovaniyakh, armirovannykh gorizontальnymi prosloikami [The estimate of foundation settlements on clay bases reinforced by horizontal layers]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Okhrana okruzhaiushchei sredy, transport, bezopasnost' zhiznedeiatel'nosti*, 2012, no. 1, pp. 89-98.

17. Igosheva L.A., Kleveko V.I. Geosinteticheskie materialy v konstruksiiakh dorozhnykh odezhd avtomobil'nykh stoianok v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh [Geosynthetics in road structures of parking in difficult geotechnical conditions]. *Geologiya v razvivaiushchemsia mire*, 2015, vol. 2, pp. 33-37.

18. Igosheva L.A., Kleveko V.I., Petreneva O.A. Primenenie geosinteticheskikh materialov pri proektirovanii avtomobil'nykh stoianok v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh [The use of geosynthetics when designing parkings in difficult geotechnical conditions]. *Stroitel'stvo i arkhitektura. Opyt i sovremennye tekhnologii*, 2015, iss. 4, part 1, available at: <http://sbornikstf.pstu.ru/council/?n=4&s=243>.

19. Abelev M.Iu. Stroitel'stvo promyshlennykh i grazhdanskikh sooruzhenii na slabykh vodonasyshchennykh gruntakh [Construction of industrial and civil buildings on weak saturated soils]. Moscow: Stroiizdat, 1983. 247 p.

20. Chu J., Varaksin S., Klotz U., Mengé P. Construction Processes. State of the Art Report. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering*. Alexandria, Egypt, 2009, pp. 14-28.