

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОПОЛИМЕРА «ГУТ» ДЛЯ ВОЗВЕДЕНИЯ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ КОТЛОВАНОВ

© 2016 М.В. Кнтько*, Д.Ю. Здобин**, С.Ю. Жабриков*

*ООО «НТЦ» Технологии XXI века», Лермонтовский пр., 7 лит.А, г. Санкт-Петербург, 190068, Россия, office@nw-tech.ru

** Санкт-Петербургский государственный университет, Институт Наук о Земле, Университетская наб. 7/9, Санкт-Петербург, Россия. zdobin_soil@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрен пример возведения пространственной несущей конструкции (ПНК), выполняющей функции ограждающей конструкции котлована, из геополимера ГУТ, полученного при реализации ИММ-технологии с использованием загрязненных грунтов. Выполнено технико-экономическое сравнение строительства ограждения котлована буросекущимися сваями и ПНК в инженерно-геологических условиях, обусловленных присутствием слабых грунтов на глубине, превышающей глубину котлована. Показан значительный положительный экономический эффект применения геополимеров в сравнении с традиционным методом ограждения котлована буросекущимися сваями.

Ключевые слова: интеграционная минерально-матричная технология, геополимеры, геоэкологическое проектирование, ограждающие конструкции котлованов.

Предисловие. В современных условиях роста крупных городов России, в том числе Санкт-Петербурга, имеет важное значение развитие методов комплексного освоения нарушенных и ранее не вовлекаемых, ввиду экономической нецелесообразности, внутригородских территорий. К ним относятся территории промышленных предприятий, полигонов хранения промышленных и бытовых отходов, а также территории, сложность освоения которых обусловлена особенностями геологического сложения или гидрогеологического режима. Как правило, подобные участки находятся в условиях уже сформировавшейся городской застройки, и окружены зданиями, сооружениями, подземными коммуникациями, дорогами и объектами благоустройства. Возведение новых объектов на этих участках диктует необходимость минимизации негативного влияния от производства строительных работ на существующие объекты и геоэкологическую городскую среду в целом. В случае жилищного строительства, дополнительным фактором выступает несоответствие расположенных на застраиваемом участке подстилающих грунтов санитарно-эпидемиологическим нормам, что, зачастую, приводит к необходимости их замены. Данное обстоятельство особенно актуально при освоении территорий бывших промышленных кластеров, золоотвалов и полигонов ТКО. Учитывая сложившуюся за последние четверть века

тенденцию роста средней величины заглубления подземной части сооружений с 3 до 6 метров, освоение внутригородских территорий приводит к образованию значительного объема грунтов, часто относящихся к категории особо- и чрезвычайно опасных, которые подлежат вывозу на специализированные полигоны хранения строительных отходов или полигоны ТКО. Наряду с вывозом грунтов, работы по инженерной подготовке территории, включая рекультивацию и благоустройство участка, требуют завоза на строительную площадку значительных объемов материалов, в том числе инертных. Сокращение количества вывозимых грунтов за счет их in-situ переработки в геополимеры, пригодные для замены ими завозимых строительных материалов, позволяет сократить объемы закупаемых строительных материалов и исключить логистическую составляющую. В конечном итоге это приводит к уменьшению финансовых затрат на производство строительных работ в целом. Получаемый при реализации интеграционной минерально-матричной технологии (ИММ-технологии) геополимер, получивший название «грунт укрепленный техногенный» или сокращенно ГУТ, производится с использованием загрязненных грунтов, предназначенных к вывозу и может служить заменой традиционных инертных материалов в основании площадок, внутриквартальных проездов, при обустройстве днища и

бортов котлована, при подготовке основания для прокладки инженерных сетей, а также может заменять бетон и изделия из него, для сооружения конструктивных элементов при инженерной подготовке участка [1]. Применение грунта укрепленного техногенного для создания ограждающих конструкций котлована, как одна из возможных областей применения ИММ-технологии при проведении строительных работ рассмотрена ниже.

Выбор конструктивного решения ограждения котлована в инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга. Одной из главных инженерно-геологических особенностей территории Санкт-Петербурга является мощная толща пылевато-глинистых лужских озерно-ледниковых отложений (QIII lgIII lz), максимальное развитие получившая в северной части города.

Лужские озерно-ледниковые отложения залегают на одноименных отложениях морены. Озерно-ледниковые слои представлены несколькими литологическими разновидностями, из которых наибольшее распространение имеют отложения приледниковых озер, сформировавшихся в период таяния ледника, а также отложения внутриледниковых озер, слагающих камовые гряды. Мощности их разнообразны: от 4 до 20 м., возрастают до 40 м. в камовых массивах Юкковской, Токсовской и Колтушской возвышенностей. Это преимущественно пески мелкие и пылеватые, с линзами крупных и гравелистых песков, супесей и суглинков. Связанные грунты имеют подчиненное значение. Среди них преобладают супеси пылеватые серые, содержащие прослои и линзы песков, реже суглинков текучепластичных. Включения гравия отсутствуют или незначительны (до 3%).

Строительство котлована глубиной 6 и более метров в условиях слабых водонасыщенных тиксотропных грунтов связано с необходимостью значительной развальцовки бортов котлована, что приводит к значительному увеличению площади участка строительства. Кроме того, строительство котлована в таких грунтах сопряжено с опасностью образования выпора грунтов, оползней, а также к подвижке грунтов на значительных расстояниях от зоны строительства. В связи с этим, строительство котлована в условиях слабых грунтов, особенно в условиях существующей застройки, должно производиться под защитой ограждающей конструкции. Вид ограждающей конструкции котлована определяется инженерно-геологическими условиями, гидрорежимом территории,

глубиной выемки, режимом его использования и характером прилегающей местности. Ограждение котлована должно эффективно решать четыре основные задачи: воспринимать боковое давление грунта, выполнять функции противofильтрационной завесы, воспринимать гидростатическое давление подземных вод и, при необходимости, воспринимать вертикальные нагрузки. При строительстве на территории, сложенной загрязненными грунтами, ограждающая конструкция должна выполнять дополнительную функцию - химического экрана. Наиболее применимые ограждающие конструкции для строительства котлованов с глубиной 6 и более метров в условиях слабых грунтов с мощностью 15 и более метров: с использованием буросекущихся свай и методом «стена в грунте». Применение для ограждения котлована метода «стена в грунте» позволяет заменить в конструкции железобетон на геополлимер ГУТ, изготовленный по ИММ-технологии с использованием предназначенных к вывозу местных грунтов, в т.ч. загрязненных.

Научной основой производства геополлимера ГУТ является теория синтеза неорганических вяжущих веществ в дисперсных минеральных средах, основанная на минерально-генетической концепции и теории оптимальных механических смесей (конгломератов), отличающихся повышенной плотностью, пониженной пористостью и, в результате этого, улучшенными прочностными и другими свойствами [2].

ГУТ получают путем смешивания грунтов определенного состава с цементом и минеральной комплексообразующей добавкой (МКД) [5]. МКД представляет собой порошковую смесь на основе гидролизованых микродисперсных кальцинированных алюмосиликатов, гипосульфидных ионных комплексов, солей щелочноземельных элементов, оксидов и карбонатов кальция и магния, углеродных микродисперсных сорбентов. Состав грунтов, используемых для производства ГУТ, определяется имеющимися местными грунтами, гранулометрический состав которых корректируется добавлением глинистых грунтов и песков. В эти грунты могут добавляться также и строительные отходы.

Грунт укрепленный техногенный, в проектном возрасте (на 28 сутки), имеет следующие физико-механические характеристики: плотность $\rho = 2,0-2,1$ т/м³; прочность на осевое сжатие $R = 20-30$ кгс/см²; коэффициент фильтрации k_f не более 10-4 м/сут; коэффициент водоустойчивости более 0,7; морозостойкость класса F5 [3].

Одним из достоинств ИММ-технологии получения геополимеров является простота воплощения, позволяющая реализовывать ее с помощью стандартной общестроительной техники и навесного оборудования к ней, непосредственно на месте проведения работ (*in situ*). При этом, в товарно-материальный оборот максимально интегрируются местные глинистые грунты, а также загрязненные грунты IV класса опасности и строительные отходы, предназначенные к вывозу на специализированные полигоны хранения. Смешивание грунтов с цементом М400 и МКД может осуществляться навесным оборудованием экскаватора типа «ковш-смеситель» (например, ковш-смеситель фирмы Simex серии СВ или СВЕ). Время смешивания выбирается исходя из необходимых и достаточных условий достижения приемлемой гомогенности смеси (т.е. отсутствие комков грунта более 5 мм и равномерное распределение сухих компонентов). Производительность смешивания достигает 40-50 м³/час смеси в рыхлом теле. После этого, приготовленный ГУТ размещается в отвале, откуда в последствии доставляется к месту укладки. Для смешивания грунтов с реагентами могут применяться также грунтовые фрезы (например, прицепная грунтовая горизонтальная фреза фирмы НПФ «Бастион», г. Санкт-Петербург). В этом случае смешивание грунтов осуществляется на специально подготовленной площадке, на которой устраивают слоистую структуру из грунта и реагентов в нужной пропорции. Проходка по такой слоистой структуре грунтовой фрезы позволяет получить смесь нужного качества с производительностью 800 м³/час смеси в рыхлом теле. Готовая смесь средствами малой механизации собирается с площадки в отвал и доставляется по мере необходимости к месту укладки [4].

Для сооружения ограждающих конструкций котлованов методом «стена в грунте» с использованием ГУТ перед строительством котлована отрывают траншею нужной ширины, например, под защитой многоразовой опускной опалубки (например, специализированная многоразовая опалубка на основе Крепи «SBH 750»). Откопка траншеи производится путем извлечения грунта между щитами опалубки с помощью экскаватора. По мере извлечения грунта опалубка опускается до проектной отметки. Использование многоразовой опускной опалубки позволяет создавать траншеи глубиной до 10 м. Тампонирующее прорывов воды и суффозии грунтов осуществляется заранее приготовленной смесью грунтов. Для

строительства стены в грунте в подготовленную траншею под защитой опалубки насыпают слой смеси толщиной 300 - 500 мм, приподняли на высоту слоя опалубку и осуществляли виброуплотнение слоя. При виброуплотнении грунтовая смесь заполняла пространство освобожденное опалубкой, создавая слой ГУТ с заданными характеристиками. Операцию повторяли до полного заполнения траншеи. В зависимости от влажности грунтовой смеси добавляли воду. По мере строительства стены контролировали степень уплотнения слоя и соответствие его состава проектному.

Для сравнения технико-экономических показателей сооружения ограждающей конструкции котлована методом буросекущихся свай и методом стена в грунте с применением ГУТ можно рассмотреть два проектных решения ограждения котлована вдоль улиц Подвойского и Нерченской в Невском районе Санкт-Петербурга. В непосредственной близости к указанным дорогам должна была быть произведена выемка грунтов до глубин 6-10 метров при производстве работ по рекультивации территории золоотвала одной из ТЭЦ в г. Санкт-Петербурге. В теле дорог проложены инженерные коммуникации.

В геологическом строении участка производства работ в пределах глубины бурения, составляющей 42 м, представлял собой техногенные отложения (tg IV), морские и озерные (ml IV), озерно-ледниковые отложения Балтийского ледникового озера (lg III b) и лужского стадиала (lg III lz), лужские (g III lz) и московские (g II ms) ледниковые, разделенные озерно-ледниковыми отложениями (lg II ms) [6]. Нормативные и расчетные значения характеристик грунтов приведены в таблице 1.

В гидрогеологическом отношении рассматриваемая территория характеризовалась наличием грунтовых вод типа «верховодка», грунтовых вод со свободной поверхностью и напорных вод.

Численный расчет конструкции первого типа производился методом конечных элементов с помощью программы PLAXIS 8.2, при этом расчетная схема представлялась в плоской постановке, так как жесткость стены в горизонтальной плоскости существенно не влияет на ее устойчивость в вертикальной плоскости. Нижняя несжимаемая граница основания (с модулем деформации 35 МПа) была принята на глубине 40 м. ниже поверхности земли, а процесс устройства котлована рассматривался как двухэтапный: устройство ограждающей конструкции и последующая разработка кот-

Таблица 1. Нормативные и расчетные значения характеристик грунтов.

Мощность слоя, м.	Геологический индекс	Номенклатурное наименование грунтов	Число пластичности I_p	Природная Влажность W	Плотность грунта, ρ , т/м ³	Коэф. пористости, e	Показатели консистенции		Показатели прочности		Модуль деформации E , кг/см ²
							IL	СВ	E_s , кг/см ²	c , кг/см ²	
6,3.	tg IV	Насыпные грунты: пески средней крупности									
	tg IV	Насыпные грунты: супеси, суглинки пески со строительным мусором с обломками кирпичей, древесины со щебнем									
	tg IV	Насыпные грунты: кембрийские глины с обломками и щебнем кирпича, древесины									
	tg IV	Гидрозола черная насыщенная водой с включением грубообломочного материала	-	0,54	1,52	1,060	-	-	12	0,00	25-30
2,8.	m, l IV	Суглинки легкие песчаные серые с прослоями песка с редкими растительными остатками текучеplastичные (по Св мягкоplastичные)	0,08	0,29	1,85	0,948	0,82	0,39	10	0,10	70
	m, l IV	Суглинки легкие пылеватые серые с растительными остатками текучеplastичные (по Св мягкоplastичные)	0,11	0,45	1,73	1,223	0,86	0,47	9	0,08	50
	m, l IV	Торфы коричневые насыщенные водой	-	3,65	1,13	6,301	-	-	4	0,05	10
	m, l IV	Слабоаггормованные грунты коричневые насыщенные водой	-	1,39	1,18	3,694	-	-	6	0,06	20
7,5.	lg III b	Суглинки тяжелые пылеватые коричневые ленточные текучеplastичные (по Св мягкоplastичные)	0,12	0,37	1,85	1,023	0,99	0,48	9	0,08	60
2,9	lg III b	Суглинки легкие пылеватые серые слоистые текучеplastичные	0,10	0,29	1,94	0,785	0,82	0,48	9	0,08	60
	lg III lz	Супеси пылеватые серые с прослоями песка пластичные	0,06	0,22	2,04	0,611	0,76	0,30	17	0,10	80
2,7	lg III lz	Пески пылеватые с прослоями супеси плотные насыщенные водой			2,07	0,550			30	0,04	180
	lg III lz	Пески пылеватые плотные насыщенные водой			2,10	0,500			31	0,05	210
5,3	lg III b	Супеси пылеватые серые с гравием, галькой гнездами песка и прослоями песка твердые (по Св полутвердые)	0,06	0,16	2,17	0,421	-0,15	-0,12	30	0,26	200

лована. Конструкция моделировалась с помощью стержня характеризуемого жесткостными параметрами: продольной жесткостью - EI, поперечной жесткостью - EA, и коэффициентом Пуассона - ν . Взаимодействие между стенкой и грунтом моделировалось с помощью интерфейсов. Анкерная тяга моделировалась как пружинный элемент, характеристикой которого является нормальная жесткость EA. Анкерная тяга представляет собой пружину, один конец которой жестко защемлен в ростверке подпорной стены, а второй жестко закреплен с анкерной сваей. Грунт задавался упругопластической моделью Мора-Кулона, характеризующейся прочностными и деформационными характеристиками ϕ , c , E , ν , основанными на данных отчета инженерно-геологических изысканий. Поверочный расчет на устойчивость проводился методом Э. К. Якоби, предпосылкой которого является заделка стены в водопорный слой и заземление верхнего конца от перемещения с помощью анкерной тяги. При выполнении этих условий обеспечивается статическое равновесие конструкции против опрокидывания. Результаты проведенных расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Сравнение результатов численного и аналитического расчетов.

Метод расчета и относительная разница, %	Продольное усилие в анкерной тяге, кН	Максимальный изгибающий момент в свае, кН.м
Численный расчет с помощью программы PLAXIS 8.2	148	638
Аналитический расчет	176	643
Относительная разница результатов, %	16,0	1,0

Геометрические параметры и характеристики материалов ограждающей конструкции первого типа, полученные по результатам выполненных численного и аналитического расчетов представлены на рисунке 1 и в таблице 3.

Аналитический расчет ограждающей конструкции второго типа производился с использованием метода Ш. Кулона. Внешняя стена конструкции делилась на две составляющие: верхняя часть, не имеющая подпирющей реберной конструкции, и нижняя часть, явля-

ющаяся частью сотовой структуры. Сотовая структура заполнялась ГУТ при производстве работ, перед обратной засыпкой пространства, образующегося при выборке зольного грунта. Работы производились по захваткам длиной 16 м. Верхняя часть конструкции имела вероятность слома на абс. отметке 8.0 м. и последующего опрокидывания. Нижняя часть - изгибание внутрь конструкции под массой внешнего грунта в момент выборки грунта в пространстве сотовой структуры. В связи с вышеизложенным, представлялось необходимым выполнить расчет устойчивости стенки против опрокидывания и против сдвига (прогиб).

Расчет конструкции на опрокидывание показал ее соответствие требованиям, предъявляемым действующими на территории РФ строительными нормами и правилами. Предельные значения выполнения условий компенсируются тем фактором, что верхняя часть ограждения является частью монолитной конструкции, работающей на изгиб.

Расчет внутренней и внешней стенки конструкции на прогиб, показал, что выбранный размер сектора выборки грунта (шириной 6 метров), приводит к созданию на стенки (защемленные с двух сторон) нагрузки в 11 кг/см² и 17 кг/см² соответственно, что в свою очередь, удовлетворяет прочностным характеристикам геополимера ГУТ.

Геометрические параметры и характеристики материалов ограждающей конструкции второго типа, полученные по результатам выполненных численного и аналитического расчетов представлены на рисунке 2 и в таблице 4.

Сметная стоимость строительно-монтажных работ при сооружении ограждающей конструкции котлована первого типа (с применением буросекущихся свай) составила 632,93 млн. руб. (в ценах IV квартал 2011 года), в то время как показатель конструкции второго типа (с применением геополимера ГУТ) составил 90,37 млн. руб. (в ценах 4 квартал 2011 года) [4].

Закключение. Применение интеграционной минерально-матричной технологии получения геополимера ГУТ, используемого в качестве материала-заполнителя при сооружении ограждающих конструкций котлованов типа «стена в грунте», обладает существенно более низкими стоимостными показателями (более чем в 6 раз в сравнении с методом, использующим буросекущиеся сваи), за счет максимального использования местных и загрязненных грунтов, предназначенных к вывозу, что, в свою очередь, снижает количество закупаемых ма-

Таблица 3.

Конструктивные решения ограждающей конструкции первого типа.

Наименование элемента	Принятое конструктивное решение
Материал стены	буросекущиеся железобетонные сваи из бетона класса В20.
Длина конструкции	516 м
Длина свай	28 м с учетом выпуска арматурного каркаса на 0,5 м от уровня бровки котлована (планировки) для устройства монолитного железобетонного ростверка шириной 0,5-0,7 м, высотой 0,3-0,5 м.
Конструкция стены	два ряда свай диаметром 0,45 м установленных в шахматном порядке на протяжении всей длины конструкции, для обеспечения прочности и жесткости свай и предотвращения выпора грунта из стыков свай при долговременном простаивании котлована.
Армирование свай	каждая свая, включая анкерные, армируется пространственным каркасом из шести арматур диаметром 18 мм. из стали класса А300.
Анкерная свая	диаметром 0,45 м. длиной 11 м устанавливается на расстоянии 5 м. от подпорной стены с шагом 1 м.
Анкерная тяга	выполняется в виде арматурного стержня диаметром 40 мм. из стали класса А300.
Распорки	на пересечении подпорных стен устанавливаются в три яруса с шагом 3 м. из стальных труб длиной 3 м. диаметром 530 мм., с толщиной стенки 9 мм. из стали класса С235.

Таблица 4.

Конструктивные решения ограждающей конструкции первого типа.

Материал стены	грунт укрепленный техногенный (ГУТ), изготавливаемый из выбранных при отрывке котлована зольных отложений (IV класс опасности), с добавлением песка, местных глинистых грунтов (IV класс опасности), загрязненных строительными отходами и предназначенных к вывозу, минеральных вяжущих и модифицирующей комплексобразующей добавки (МКД). При этом, нормы расхода сырья и материалов на 1 тонну конструкции составляли (в %): местные глинистые укрывные грунты и зольные отложения — 35; песок (супесь) — 35; цемент М400 — 15; модифицирующая комплексобразующая добавка (МКД) — 15.
Длина конструкции	516 м.
Конструкция стены	сотовая структура с ребрами толщиной 2 м и шагом в плане по осям 8 м, с абс. отм. нижней части до 1,6 м (включая заглубление 0,5 м в суглинок) и верхней части на абсолютной отметке 8,0 м, кроме наружной стены. Абс. отм. верха конструкции наружной стены до 10,8.

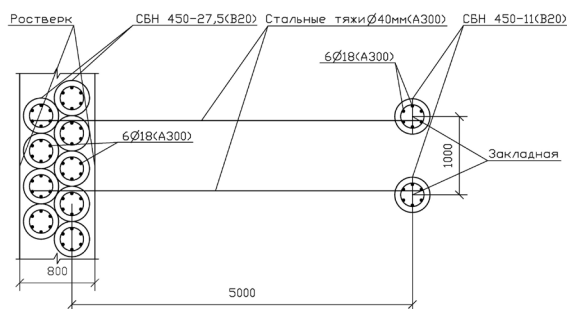


Рис. 1. Конструкция ограждения первого типа с применением буросекущихся свай.

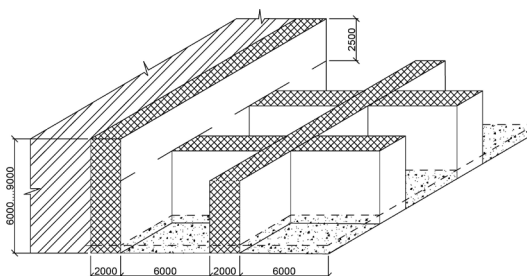


Рис. 2. Конструкция ограждения второго типа с применением геополимера ГУТ.

териалов, сокращает логистические издержки и уменьшает объем строительного-монтажных работ. Кроме того, данный метод способен обеспечить снижение негативного техногенного воздействия на литосферу, оказываемого при проведении строительных работ, благодаря сокращению объема используемых природных нерудных строительных материалов и исключения миграции поллютантов, содержащихся в загрязненных почвах, в окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жабриков С.Ю. Использование ИММ-технологии для защиты литосферы при проведении работ по рекультивации загрязненных городских территорий. // Инновации и инвестиции. 2015. № 3. С. 239-241.

2. Кнатько В.М. Теория синтеза неорганических вяжущих веществ в дисперсных грунтах // Л. изд-во ЛГУ, 1989, 91 с.

3. Кнатько В.М., Кнатько М.В., Щербакова Е.В., Лаздовская М.А. Оперативная оценка эффективности химических реагентов при укреплении дисперсных грунтов путем синтеза неорганических вяжущих веществ // Грунтоведение, №1, 2013.

4. Материалы проекта: «Многоквартирный дом со встроенными помещениями и паркингом по ул. Бельшева, участок 15 (западнее дома 8, корпус 2, литера А) второй этап рекультивации». Том 3. г. Санкт-Петербург, ООО «НТЦ «Технологии XXI века», 2011 г.

5. Модифицирующая комплексообразующая добавка (МКД). Технические условия ТУ 5744-001-58330067-2010, г. Санкт-Петербург, 2010г., ООО «НТЦ «Технологии XXI века».

6. Технический отчет об инженерно-геологических изысканиях участка проектирования и строительства многоквартирного дома со встроенными помещениями и двумя подземными паркингами. г. Санкт-Петербург, 2010 г., ООО «ИЗЫСКАТЕЛЬ».

THE USE OF GEOPOLYMER "GUT" FOR THE CONSTRUCTION OF RETAINING WALLS

© 2016 M.V. Knatko*, D.Yu. Zdobin**, S. Yu. Zhabrikov*

* LLC "NTC Tekhnologii XXI veka", Lermontovskiy ave. 7, Saint-Petersburg, 190068, Russian Federation, office@nw-tech.ru

** Saint-Petersburg State University,
Universitetskaya emb. 7/9, z. Saint-Petersburg, 199034, Russian Federation;
zdobin_soil@mail.ru

Abstract. In the article the example of the construction of the spatial bearing structure (SBS) that performs the functions of the retaining wall, from geopolymer GUT, obtained by implementing the IMM-technology using contaminated soils. Performed techno-economic comparison of the construction of the retaining wall by bored-secant piles and SBS in engineering-geological conditions, due to the presence of weak soils at depth, exceeding the depth of the pit. Shown a significant positive economic effect of the application of geopolymers in comparison with the traditional method of bored-secant piles.

Key words: integration mineral-matrix technology, geopolymers, geoenvironmental engineering, retaining walls.