

С.И. БАЖЕНОВА<sup>1</sup>, В.А. АЛЕКСЕЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

## ОСОБЕННОСТИ ПОДБОРА СОСТАВА ТОНКОДИСПЕРСНЫХ ВЯЖУЩИХ ДЛЯ ИНЪЕКТИРОВАНИЯ

**Аннотация.** Применение инъекционных смесей на основе тонкодисперсных минеральных вяжущих (иначе называемых микроцементами), предназначенных для инъекционного формирования укреплённых массивов (грунтобетон) в проницаемых грунтах (пески всех видов) обуславливает экономическую целесообразность их применения при решении широкого спектра различных геотехнических задач. Для правильного назначения параметров применения тонкодисперсных вяжущих при инъектировании грунтов разработаны соответствующие критерии оценки их свойств. Однако малоизученным остается вопрос назначения расходов сырьевых материалов для получения грунтобетонных конструкций и закреплённых массивов с требуемыми свойствами.

На сегодняшний день в РФ практически не представлена нормативная база для тонкодисперсных вяжущих (микровяжущих), применяемых в инъектировании, отсутствует научная база формирования грунтобетон, формируемых с помощью инъекции, в.т.ч. нет адекватных зависимостей наподобие формулы Боломея-Скрамтаева для бетона отражающая получаемую прочность от расхода и качества компонентов. Авторами проведен ряд опытов, показывающих неприменимость основных закономерностей для обычных бетонов при создании грунтобетон, получаемых методами инъектирования.

Рассмотрены различные виды тонкодисперсных вяжущих, применяемых в геотехническом строительстве. В качестве контрольных параметров сравнивался гранулометрический и минеральный состав тонкодисперсных вяжущих, оценивалась проникающая способность при разных режимах приготовления и нагнетания инъекционной смеси в грунты, характеристики полученного грунтобетона. Также сравнивались две технологии создания грунтобетона – путем механического перемешивания и по способу инъекционной пропитки контрольных образцов песчаного грунта на предмет соответствия принципам подбора составов действующих нормативных документов для тяжелых и легких бетонов.

Подтверждены значительные отличия свойств грунтобетона, полученного по методам инъекционной пропитки (традиционных грунтобетон) и перемешивания (как для обычных бетонов). Исследования подтвердили возможность инъекционной пропитки вяжущими определенного грансостава в целях укрепления песчаных грунтов в соответствии с назначенными технологическими параметрами. Показаны коэффициенты эффективности использования микровяжущих при инъектировании, отражены данные по свойствам образуемого грунтобетона при разных технологических параметрах.

**Ключевые слова:** тонкодисперсное вяжущее, инъектирование, укрепление грунтов, грунтобетон, микроцемент, микронаполнитель, пропиточная инъекция.

S.I. BAZHENOVA<sup>1</sup>, V.A. ALEKSEEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow, Russia

## FEATURES OF SELECTING THE COMPOSITION OF FINE-DISPERSE BINDERS FOR INJECTION

**Abstract.** The use of injection mixtures based on finely dispersed mineral binders (microcements) intended for injection formation of hardened massifs (soil concrete) in permeable soils (sands of all kinds) makes them economically feasible in solving a wide range of different geotechnical problems. For

*the correct assignment of the parameters for the use of finely dispersed binders for the injection of soils, appropriate criteria for assessing their properties have been developed. However, the question of assigning the consumption of raw materials to obtain soil concrete structures and hardened massifs with the required properties remains poorly studied.*

*Nowadays, the regulatory framework for finely dispersed binders (micro binders) used in injection is practically not presented in the Russian Federation. There is no scientific basis for the formation of soil concrete formed by injection, including there are no adequate dependencies like the Bolomey-Skramtaev formula for concrete, which reflects the resulting strength from the consumption and quality of the components. The series of experiments were conducted, showing the inapplicability of the basic laws for standard concrete when creating soil concrete obtained by injection methods.*

*Various types of finely dispersed binders used in geotechnical construction are considered. As control parameters, the particle size and mineral composition of finely dispersed binders were compared. There were assessed penetration at different modes of preparation and injection of the injection mixture into the soil, and the characteristics of the resulting concrete. Two technologies for creating soil concrete - by mechanical mixing and by the method of injection impregnation of control samples of sandy soil were compared for compliance with the principles of selecting the composition of existing regulatory documents for heavy and light concrete.*

*Significant differences between the properties of soil concrete obtained by the methods of injection impregnation and mixing are confirmed. Studies have confirmed the possibility of injection impregnation with binders of a certain composition in order to strengthen sandy soils in accordance with the assigned technological parameters. The coefficients of the efficiency of the use of micro binders during injection are shown, data on the properties of the formed soil concrete at different technological parameters are reflected.*

**Keywords:** *fine-disperse binder, injection, soil hardening, soil-concrete, microcement, micro-filler, impregnation injection.*

## **Введение**

Расширение мегаполисов и крупных городов Российской Федерации ставит задачу максимально эффективного использования подземного городского пространства. Дефицит парковочных мест и требования сохранения исторического облика в центральных частях города в условиях плотной городской застройки, обуславливают необходимость интенсивного освоения подземного пространства [1]. Необходимость выполнения работ при строительстве подземных сооружений в крайне сложных геотехнических условиях, предполагает применение комплекса специальных методов производства работ, обеспечивающих уплотнение, стабилизацию и упрочнение грунтов, ликвидацию водопроявлений через ограждающие конструкции, защита от возможных деформаций и выравнивание зданий и сооружений в случае проявившихся сверхнормативных деформаций и т.д.). Кроме того, обеспечение безаварийного выполнения работ по освоению подземного пространства в условиях постоянно функционирующих зданий и сооружений, требуют внедрения новых строительных технологий и материалов с повышенными требованиями к безопасности, щадящему воздействию на окружающую застройку, малогабаритности и к уровню шума при производстве работ [2]. При этом, оценка эффективности практического применения инъекционных методов производства работ с применением тонкодисперсных вяжущих, в отличие от традиционных с применением общестроительных цементов или полимерных систем, должна учитывать не только стоимость и сроки выполнения работ, но и специальные требования, предъявляемые к работам в условиях плотной застройки [4, 5].

Инъекционные работ в режиме пропитки структуры грунта позволяют не допускать деформаций грунтового массива, не допуская осадок окружающих сооружений. При этом, в качестве основного инъекционного материала используются гидравлические вяжущие высокой степени дисперсности, которые позволяют проходить через открытые поры грунта (без гидроразрывов), не изменяя напряженно-деформированное состояние (НДС) грунта [5]. Такие вяжущие получили название микровяжущие, микроцементы или ОТДВ – особо тонкодисперсные вяжущие, которые в настоящее время достаточно широко применяются при решении различных геотехнических задач. Анализ российского и зарубежного опыта реализации про-

ектов инъекционного закрепления различных грунтов позволяет с уверенностью заявлять о высокой степени эффективности методов инъектирования, особенно применительно в условиях сложившейся инфраструктуры городов, имеющих высокую степень насыщенности подземными коммуникациями, сложной инженерной геологией и сооружениями, находящимися в зоне влияния подземного строительства. Инъекционная технология цементационного формирования грунтового массива основана на пропитке структуры грунта в режиме низконапорной подачи при малых давлениях (до 0,5 МПа). При этом, в процессе нагнетания инъекционная смесь полностью заполняет поровую структуру грунта, (кроме закрытых пор) без нарушения его природной структуры [6]. При случаях, когда закрепляемый грунт находится в состоянии полного водонасыщения, инъекционная смесь в процессе пропитки вытесняет грунтовую воду, обеспечивая формирование грунтобетонного массива, по своим показателям сравнимого со строительными растворами и мелкозернистыми бетонами [7].

Анализ реализованных проектов уплотнения и упрочнения грунтов доказывает, что метод инъекционной пропитки максимально удовлетворяет требованиям, предъявляемым к геотехническим спецработам в условиях подземного городского строительства [8]. Следует отметить, что качество работ определяется соблюдением регламента инъектирования, тщательностью выполнения работ с учетом выполняемых методов контроля и правильностью выбора типа ОТДВ с учётом фактических геотехнических условий и проектных задач. Гранулометрический состав ОТДВ, в отличие от применяемых в строительной практике других вяжущих для цементации состоит в том, что они производится способом воздушного сепарирования подготовленных композиционных вяжущих или сырьевых материалов на минеральной основе с последующей гомогенизацией состава [22]. Причем, качество ОТДВ необходимо оценивать не столько по показателю удельной поверхности, как обычно производители пытаются классифицировать ряд строительных микроцементов, а по грансоставу зерен с интегральной кривой - d10, d50, d95. Гранулометрическая характеристика различных тонкодисперсных вяжущих представлена в табл. 1.

Табл. 1. Виды ОТДВ и эффективность их применения.

Параметр\марка	Интроцем Экстра	Microdur R-X	Spinor A12	Rheocem 900	Микролег 10
Размер частиц, d95<	5,5	6	7	8	9
В/Вяз отношение (рекоменд.)	4	4	2	3	1
Стоимость 1 тн. материала, руб.	80000	120000	180000	150000	180000
Удельная эффек- тивность (Куэ)	1,25	0,83	0,16	0,27	0,13

Сбалансированность и стабильность гранулометрического и химико-минералогического состава тонкодисперсного вяжущего может быть обеспечена только высоким уровнем технологичности производства и воспроизводимости свойств смесей для инъекционной пропитки, что гарантированно позволяет достигать заданных проектных показателей грунтобетонного массива (ГБМ) [5, 9].

Как правило главными технологическими критериями инъекционных смесей на основе ОТДВ считаются:

- низкая величина седиментации при приготовлении и нагнетании;
- высокая степень пенетрационной способности при пропиточной инъекции капиллярно-пористого массива грунта под низкими давлениями;
- высокий показатель сохраняемости смеси позволяющих обеспечить непрерывность технологического процесса (приготовление, выдержка, нагнетание) до начала первых признаков схватывания;

- стабильность характеристик составов ОТДВ для всех поставочных производственных партий;

Параметры наиболее широко используемых в строительной отрасли марок тонкодисперсных вяжущих от разных производителей представлены в табл.1.

Представленные микроцементы с разной степенью эффективности используются при решении разнообразных строительных проблем. Однако, ввиду разнообразия задач, как на стадии проектирования, так и на стадии строительства необходимо обеспечивать требуемый уровень эффективности применения ОТДВ. Так, повышение экономической эффективности решения задач усиления грунтов с применением ОТДВ возможно за счёт использования композиций, состоящих из комбинации базовых ОТДВ и микронаполнителей [5]. При использовании химических добавок, повышающих пенетрационную способность и технологические свойства инъекционной смеси, существенно снижается стоимость и сроки работ [6, 10].

### Модели и методы

При назначении технологических решений и типа ОТДВ, подбора инъекционных составов и требований к ним, необходимо учитывать, что основные закономерности бетоноведения не всегда приемлемы для формируемых грунтобетонных масс. Так, зафиксированные параметры грунтобетона, созданного методом механического перемешивания грунта и инъекционной смеси ОТДВ, не соответствуют полученным характеристикам грунтобетонного массива (ГБМ), созданного путем инъекционной пропитки аналогичных грунта и суспензией микроцемента.

Исследуемые композиционные вяжущие изготавливались путём гомогенизации базового ОТДВ и соответствующих минеральных микронаполнителей.

В экспериментальных работах оценивалась качественная характеристика тонкодисперсного вяжущего и его пригодность формировать грунтобетонный массив по технологии инъекционной пропитки (с фиксацией параметров технологии и последующим выбуриванием кернов). Для сравнительного анализа выполнялось механическое перемешивание инъекционной смеси с исследуемым песчаным грунтом с последующим исследованием его характеристик.

Прочность грунтобетона при сжатии, приготовленного путем инъекционной пропитки, оценивалась с учетом прочности грунтобетона, созданного методом механического перемешивания с фиксацией кинетики твердения при различных показателях водовяжущего отношения. Количественная характеристика сравнения выражалась эмпирическим коэффициентом упрочнения «Ку»:

$$K_y = R_{п} / R_c \quad (1)$$

$R_{п}$ , МПа – прочность образца при сжатии грунтобетонного массива, созданного методом инъекционной пропитки;

$R_c$ , МПа – прочность образца, созданного способом перемешивания.

Помимо прочностных показателей оценивалась характеристика поровой структуры образованного грунтобетона методом ртутной порометрии. С применением РФА и ДТА выполнялось исследование продуктов гидратации.

### Результаты исследования и их анализ

Согласно классической теории бетоноведения, характеристики затвердевшего бетона определяются главным образом соотношением компонентов бетонной смеси в системе «вяжущее - крупный и мелкий заполнитель – вода - добавки». При анализе свойств грунтобетона установлено, что при равном количестве вяжущего в составе грунтобетона, приготовленного при технологии инъектирования и при механическом смешивании, прочностные характеристики грунтобетона значительно отличаются и не коррелируются между собой.

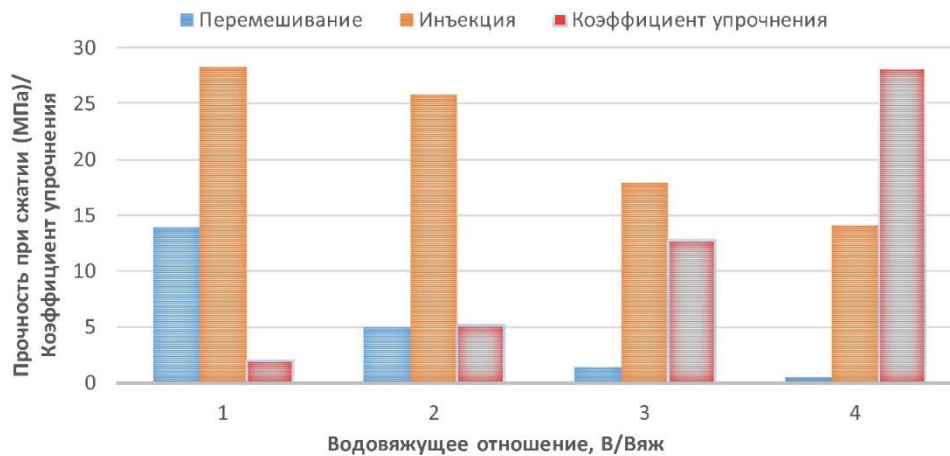


Рисунок 1 - Сравнительный анализ прочности при сжатии грунтобетона, приготовленного методом инъекционной пропитки и путем механического перемешивания (В/Вяз=1,0-5,0)

Это можно объяснить тем, что при механическом перемешивании грунта с инъекционными смесями высокой степени водонаполненности с водовяжущим отношения до В/В=5,0, имеющегося количество цементного теста недостаточно даже для обволакивания отдельных частиц грунта, что препятствует формированию грунтобетона плотной сплошной структуры. В процессе исследований также установлено, что при механическом перемешивании происходит разуплотнение естественно слежавшегося грунта и в структуру смеси раствора вяжущего и грунта вовлекается избыточный объем воздушной фазы, что является важной причиной пониженной прочности в т.ч. при неправильно назначаемых методах контроля [11].



Рисунок 2 - Физическая модель грунтового массива, инъекционно закрепляемого суспензиями тонкодисперсных вяжущих

При инъекционной пропитке грунта ненарушенной природной структуры, при заполнении их поровой структуры суспензиями ОТДВ, большая часть капиллярно-порового объема грунтового массива заполняется твердеющим инъекционным раствором (цементным тестом), образуя плотную связную структуру грунтобетона. Тот излишек воды, который присутствовал в инъекционной суспензии высокой степени водонаполненности для достижения высоких характеристик пенетрационной способности и реологических показателей, частично отжимается, а остаток связывается физико-химически или физически в поровой структуре закрепляемого массива. Также отмечается, что при инъекционном закреплении грунта смесями тонкодисперсных вяжущих высокой степени водонаполненности, развивается т.н. процесс обфилтрации. То есть установлено, что фактическое водовяжущее отношение инъекционной композиции, заполнившей поры пропитанного грунтового массива будет более низким, чем для того же показателя смеси непосредственно после приготовления. Вышеуказанные условия являются факторами улучшенных физико-механических свойств грунтобетона, созданного инъекционным способом по сравнению со способом перемешивания.

Сравнивая прочности грунтобетона, полученного с помощью инъекционной пропитки и перемешивания компонентов, можно отметить гораздо более высокую прочность грунтобетона, созданного инъекционным способом. Это объясняется тем, что микроструктура укрепляемого грунтового массива представляет трехкомпонентную систему, состоящую из твердых частиц естественно сложившейся упаковки, водной и воздушной фазы, частиц грунта также в большинстве случаев покрыты пленками рентгеноаморфных минералов и имеют включения пылеватых и дисперсных частиц различного состава с той или иной степенью реакционной способности. Межзерновой объем грунта обычно состоит из воздушных замкнутых и открытых пор, в ряде случаев, заполненных окружающей водной фазой при расположении грунта в зоне водонасыщенности [12].

Грунт, который закрепляется инъекционным способом, имеет естественную природную структуру с плотной зоной контакта, сложившейся природной упаковкой, зачастую близкой к максимально возможной степени уплотнения. Для грунтобетона, получаемого способом смешивания с цементным раствором, происходит разрушение природной упаковки, разуплотнения отдельных конгломератов с плотным контактом частиц, происходит дополнительная раздвижка при введении дополнительного количества воды и увеличение общей пористости ввиду дополнительного воздуховлечения при перемешивании.

Пропитывая грунтовой массив инъекционными смесями на основе ОТДВ, мельчайшие минеральные гидравлически активные частицы проникают в поровое пространство через капилляры и образуемые микроканалы, максимально осаждаются в замкнутых и полузамкнутых поровых каналах, в конце заполняя все поры минеральной цементационной смесью [13], которая гидратируя связывает весь исходный грунт в прочный конгломерат – грунтобетонный камень. Поверхностный слой зерен грунта при реакции с образуемым гидроксидом кальция, также участвует в процессе создания новообразований цементного камня в контактной зоне, что дополнительно уплотняет и упрочняет её [14].

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил установить высокую степень взаимозависимости между водовязущим отношением, интенсивностью нагнетания  $V$  (нагнетание единицы объема инъекционной суспензии за время  $T$ ) и давлением нагнетания  $P$  (фиксируемое давление на выходном манометре инъекционного комплекса).

В рамках ранее проводимых научно-технического сопровождения инъекционных работ были установлены эмпирические зависимости, которые можно описать уравнением:

$$T = 461 - 40,6 V/B; \quad (2)$$

$$P = 0,233 - 0,036 V/B. \quad (3)$$

Исследование структуры грунтобетонных массивов, выполненное с применением электронной микроскопии, а также рентгенофазового и дифференциально-термического анализов показало, что микроцемент в виде наномодифицированного коллоидного раствора имеет высокую величину гидратации на ранних стадиях (непосредственно после добавления воды и замеса инъекционных смесей), что должно находить своё отражение в карте инъекционных работ и выработки суспензии с учетом её жизнеспособности. Определенно, что в порах проинъектированного грунтового массива, заполненных ОТДВ, происходит процесс гидратообразования кристаллов гидросульфоалюмината кальция, портландита, гидросульфоферрита и гидроалюмината кальция, также присутствует гель из микрокристаллических образований высокоосновных гидросиликатов кальция.

Выполненные исследования показали, что грунтобетон, получаемый инъекционной пропиткой грунта суспензиями на основе ОТДКВ ( $V/B_{\text{вж}}=1,0...3,5$ ) имеет прочность до 30 МПа. В то время как образцы, приготовленные путём перемешивания предварительно измельченного грунта и цементной суспензии с  $V/B=4,0$  имели нулевую прочность (Рис.4).

Отмечено, что в порах системы «грунт-микровязущее» происходит формирование кристаллического сростка, состоящего из продуктов гидратации ОТДВ, а также продуктов его

взаимодействия с компонентами грунта. Причём развитие процессов гидратации на контакте раздела фаз отличаются от параметров реакции в объеме самой фазы [15]. Внутри объема любой фазы каждая молекула вещества взаимодействует с себе подобными, тогда как напротив в контактной зоне молекулы взаимодействуют также и с молекулами отличной от них химической структуры. Известно, что высокая разность потенциалов фаз способствует большому значению потенциальной энергии на поверхности контакта фазовых состояний. При высокой концентрации микрочастиц с условным диаметром менее 0,1 мкм. в поровом объеме пропитанного грунта с развитой сеткой пор, снижается энергетический порог наступления реакции гидратации [5, 15] в пересыщенном растворе компонентов вяжущего, т.е. реализуется эффект высокого уровня энергии поверхности микрочастиц и интенсификации кристаллизации в твердеющей системе [13].

Процесс гидратообразования начинается в основном в контактной зоне частицы проинъектированного грунта ввиду того, что процесс кристаллообразования в жидкой фазе более энергетически затратный процесс. Частицы новых фаз нарастают, образуя сольватную оболочку набухающих наслоений составляющих цементного теста, формируя притягивающиеся коагуляционные узлы. В пересыщенной фазе цементной системы выделяются микрокристаллические зародыши с условным диаметром 10-9 м, которые далее слипаются и коагулируют, укрупняясь (до 10-7 м) и оседая на поверхности частиц грунта, формируя грунтобетон.

Гидросиликаты кальция имеют свойство поглощать существенный объем воды в фазе образования кристаллогидратов, когда межкристалльная дистанция становится примерно равной диаметру молекулы воды. При этом совершается сращивание кристаллогидратов аналогичных фаз, происходит флуктуационное уплотнение молекул раствора затворенного вяжущего.

После пропитки суспензией микроцемента процессы гидратации начинаются в тонком слое модифицированной суспензии и поверхностью частиц, и согласно теории бетоноведения, как и в обычном бетоне свойства контактного слоя отличаются от свойств формируемого общего объема цементного камня. Состав контактного слоя зависит также от физико-химической активности грунта, что определяет характер новообразований в контактном слое. Исследования реакций, протекающих на поверхности различных грунтов: кислых - с содержанием  $SiO_2 = 65\%$  (гранулит, пироксеновый кварцевый порфир, гранит); промежуточных - с содержанием  $SiO_2 = 52-65\%$  (авгито-порфир) и основных - с содержанием  $SiO_2 = 52\%$  (базальт, диабаз, выветренный базальт), а также ортоклаз, альбит, кварц, и карбонатные горные породы (доломит, доломитизированный известняк), зафиксировали, что в ранние сроки твердения основные породы связывают несколько больше извести, чем кислые [15].



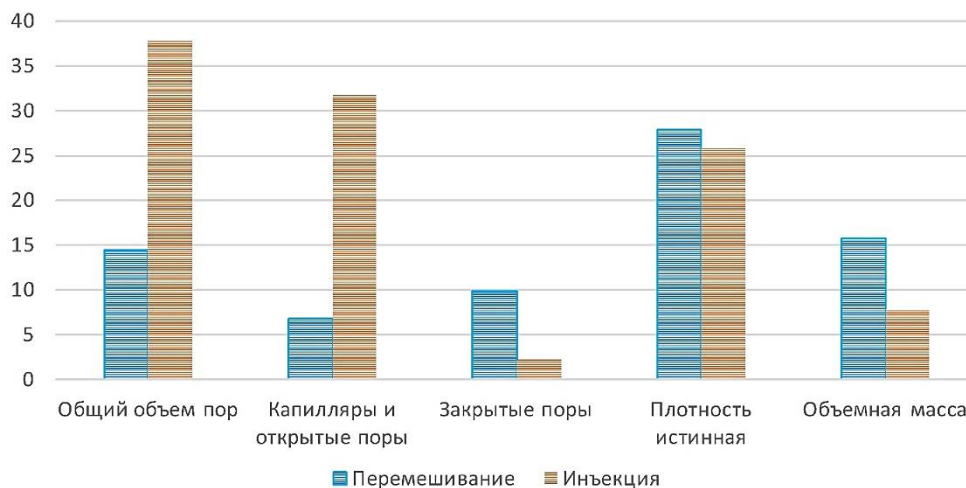
Рисунок 3 - Баланс продуктов гидратации грунтобетона: «Интроцем Экстра»; В/Вяз=3,0; грунт – песок мелкий  $M_k=1,2$

Проведенные исследования продуктов гидратации грунтобетона в капиллярно-пористой структуре проинъектированного грунта показали участие в процессе структурообразования аморфных песчаных зерен наряду с гидросиликатом, гидросульфоалюминатом кальция и портландитом (рис.3).

После завершения процесса интенсивной гидратации в грунтобетоне (28-90 суток в зависимости от типа вяжущего) происходит формирование закрепленного массива, имеющего заданные физико-механические и геометрические параметры.

Используемые инъекционные минеральные композиции ОТДВ включают в себя строго подобранный дисперсный состав из портландцементного клинкера, порошка карбоната кальция и аморфного реакционноспособного оксида кремния, щелочного и шлакового компонента (для некоторых типов микроцемента). С помощью рентгено-фазового анализа сформированного грунтобетона было установлено присутствие в его составе следующих гидратообразований: гидроалюминатов, гидросиликатов и гидросульфоалюминатов кальция, кальцита, портландита (гидроксида кальция) и иных сложных кристаллогидратов с включениями мусковита, микроклина и других минералообразующих композиций грунта, подвергаемого инъекционной пропитке с целью закрепления.

Проведенный анализ структуры грунтобетона подтвердил, что прогидратированная инъекционная минеральная композиция, заполняющая систему капилляров и пор межзернового пространство грунта, представляет собой достаточно плотную затвердевшую вяжущую композицию, плотно соединяющая соседние зерна, формируя прочную и плотную структуру, аналогичную микроструктуре мелкозернистого бетона, где роль отдельных частиц грунта играет мелкий заполнитель.



**Рисунок 4 - Характеристика пористости структуры грунтобетонных образцов:**  
 «Интроцем Экстра»;  $V/V_{\text{вяж}}=3,0$ ; исходный грунт - мелкий песок с модулем крупности  $M_k=1,2$ .

Исследование зоны контакта «цементный камень-частицы грунта» показало достаточно гомогенную плотную бездефектную микроструктуру массива пропитанного грунта, обеспечивающую совместный механизм восприятия нагрузок как плотного конгломерата. В грунтоцементном массиве, полученным путем перемешивания, отмечается повышенный объем пор и удельный объем капиллярной пористости (в 2,5-3 раза по сравнению с пропитанными образцами) – в среднем 85% открытых пор и капилляров и 15% закрытых.

Плотность грунтобетонного массива, полученного по методу инъекции сравнима с показателями объемной массы мелкозернистого бетона, тогда напротив, как плотность грунтобетона, полученного механическим перемешиванием сравнима с показателями плотности поризованного бетона мелкозернистой структуры.

Высокая степень гомогенности плотной структуры инъекционно пропитанного ГБМ формируется благодаря особенностям технологии, когда минеральная смесь ОТДВ высокой



пенетрационной способности проникает в межзерновое пространство частиц грунта, не вызывая раздвижек зерен.

### **Выводы**

Инъекционные методы закрепления грунта при соответствующем технико-экономическом обосновании, являются эффективными, позволяющими решать различные геотехнические задачи.

Сравнение свойств грунтобетона, получаемого путем инъекционной пропитки и методом механического смешивания, показало их значительное различие и отсутствие какой-либо корреляционной зависимости. В этой связи, при подборе составов инъекционных смесей на основе ОТДВ необходимо исследовать образцы грунтобетонных массивов, сформированных в режиме пропитки, моделирующим производственные условия.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Svetlana Kasatkina. Russian City as a Philosophical Category of Urban Studies // *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 214, 5 December 2015, Pages 628-634. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.11.769.
2. A. Baklanov, C. S. B. Grimmond, D. Carlson, D. Terblanche, A. Hovsepyan From urban meteorology, climate and environment research to integrated city services// *Urban Climate*, Volume 23, March 2018, Pages 330-341. DOI: 10.1016/j.uclim.2017.05.004.
3. Ka-hung Yu, Eddie Chi-man Hui. Housing construction and uncertainties in a high-rise city. *Habitat International*, Volume 78, August 2018, Pages 51-67. DOI: 10.1016/j.habitatint.2018.05.011.
4. Ekaterina Nezhnikova. The Use of Underground City Space for the Construction of Civil Residential Buildings // *Procedia Engineering*, Volume 165, 2016, Pages 1300-1304. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.854.
5. Харченко И.Я., Алексеев В.А., Исрафилов К.А., Бетербиев А.С.Э. Современные технологии цементационного закрепления грунтов//*Вестник МГСУ*. 2017. № 5 (104). С. 552-558. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.552-558.
6. Харченко А.И., Харченко И.Я., Панченко А.И., Газданов Д.В. технология выравнивания здания Загорской ГЭС-2 методом компенсационного нагнетания // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. № 4 (115). С. 490-498. DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.490-498.
7. Mahdi Heidari, Fulvio Tonon. Ground reaction curve for tunnels with jet grouting umbrellas considering jet grouting hardening // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 76, June 2015, Pages 200-208. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2015.03.021.
8. O. A. Makovetskiy. Application of “Jet Grouting” for Installation of Substructures of Estates // *Procedia Engineering*, Volume 150, 2016, Pages 2228-2231. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.269.
9. G. G. Kashevarova, O. A. Makovetskiy. Analysis of Experimental and Estimated Jet-grouted Soil Mass Deformations // *Procedia Engineering*, Volume 150, 2016, Pages 2223-2227. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.268.
10. Fatiha Bouchelaghem. Multi-scale modelling of the permeability evolution of fine sands during cement suspension grouting with filtration// *Computers and Geotechnics*, Volume 36, Issue 6, July 2009, Pages 1058-1071. DOI: 10.1016/j.compgeo.2009.03.016.
11. Kwang Ho Sho, Sang Joon Park, Yong Jic Kim, Gun Cheol Lee, Kyoung Min Kim. Utilization of separator bag filter dust for high early strength cement production// *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue 5, May 2011, Pages 2318-2322. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.027.
12. M. Axelsson, G. Gustafson. The PenetraCone, a new robust field measurement device for determining the penetrability of cementitious grouts// *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 25, Issue 1, January 2010, Pages 1-8. DOI: 10.1016/j.tust.2009.06.004.
13. F. Bouchelaghem, A. Benhamida, H. Dumontet. Mechanical damage behaviour of an injected sand by periodic homogenization method// *Computational Materials Science*, Volume 38, Issue 3, January 2007, Pages 473-481. DOI: 10.1016/j.commatsci.2005.12.044.
14. Michael Galetakis, Christina Piperidi, Anthoula Vasiliou, George Alevizos. Experimental investigation of the utilization of quarry dust for the production of microcement-based building elements by self-flowing molding casting// *Construction and Building Materials*, Volume 107, 15 March 2016, Pages 247-254. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.014.
15. Гришин А.Н., Панченко А.И., Харченко И.Я., Баженов М.И. Тонкодисперсное композиционное вяжущее для закрепления грунтов инъекционным способом // *Вестник МГСУ*. 2017. Т. 12. № 11 (110). С. 1289-1298. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.11.1289-1298.

REFERENCES

1. Kasatkina, S.: Russian City as a Philosophical Category of Urban Studies. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, vol. 214, pp. 628-634 (2015). DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.11.769
2. Baklanov, A., Grimmond, C. S. B.: From urban meteorology, climate and environment research to integrated city services. *Urban Climate*, vol. 23, pp. 330-341 (2018). DOI: 10.1016/j.uclim.2017.05.004
3. Yu, K., Hui, E.Ch.: Housing construction and uncertainties in a high-rise city. *Habitat International*, vol. 78, pp. 51-67 (2018). DOI: 10.1016/j.habitatint.2018.05.011
4. Nezhnikova, E.: The Use of Underground City Space for the Construction of Civil Residential Buildings. *Procedia Engineering*, vol. 165, pp. 1300-1304 (2016). DOI: 10.1016/j.proeng.2016.11.854
5. Kharchenko, I.Ya., Alekseev, V.A. et al: Modern technologies of cementation consolidation of soils. *Vestnik MGSU*, No. 5 (104), pp. 552-558 (2017). DOI: 10.22227/1997-0935.2017.5.552-558
6. Kharchenko, A.I., Kharchenko, I.Ya. et al: Technology of leveling the building of Zagorskaya PSHPP-2 by the method of compensatory injection. *Vestnik MGSU*, No. 4 (115), vol. 13, pp. 490-498 (2018). DOI: 10.22227/1997-0935.2018.4.490-498
7. Heidari, M., Tonon, F.: Ground reaction curve for tunnels with jet grouting umbrellas considering jet grouting hardening. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 76, pp. 200-208 (2015). DOI: 10.1016/j.ijrmmms.2015.03.021
8. Makovetskiy, O.A.: Application of “Jet Grouting” for Installation of Substructures of Estates. *Procedia Engineering*, vol. 150, pp. 2228-2231 (2016). DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.269
9. Kashevarova, G.G., Makovetskiy, O.A.; Analysis of Experimental and Estimated Jet-grouted Soil Mass Deformations. *Procedia Engineering*, vol. 150, pp. 2223-2227 (2016). DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.268
10. Bouchelaghem, F.: Multi-scale modelling of the permeability evolution of fine sands during cement suspension grouting with filtration. *Computers and Geotechnics*, vol. 36, issue 6, pp. 1058-1071 (2009). DOI: 10.1016/j.compgeo.2009.03.016
11. Sho, K.H., Park, S.J. et al.: Utilization of separator bag filter dust for high early strength cement production. *Construction and Building Materials*, vol. 25, issue 5, pp. 2318-2322 (2011). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.027
12. Axelsson, M., Gustafson, G.: The PenetraCone, a new robust field measurement device for determining the penetrability of cementitious grouts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 25, issue 1, pp. 1-8 (2010). DOI: 10.1016/j.tust.2009.06.004
13. Bouchelaghem, F., Benhamida, A. et al.: Mechanical damage behaviour of an injected sand by periodic homogenization method. *Computational Materials Science*, vol. 38, issue 3, pp. 473-481 (2007). DOI: 10.1016/j.commatsci.2005.12.044
14. Galetakis, M., Piperidi, Ch. Et al.: Experimental investigation of the utilization of quarry dust for the production of microcement-based building elements by self-flowing molding casting. *Construction and Building Materials*, vol. 107, pp. 247-254 (2016). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.014
15. Grishin, A.N., Panchenko, A.I. et al: Finely dispersed composite binder for hardening soils by injection method. *Vestnik MGSU*, No. 11 (110), vol. 12, pp. 1289-1298 (2017). DOI: 10.22227/1997-0935.2017.11.1289-1298

Информация об авторах

**Баженова Софья Ильдаровна**

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,  
канд. техн. наук, доц., доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов (ТВВиБ),  
E-mail: BazhenovaSI@mgsu.ru

**Алексеев Вячеслав Александрович**

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,  
Заведующий лабораторией кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов (ТВВиБ),  
E-mail: 634586@mail.ru

Information about authors

**Bazhenova Sofya I.**

National Research Moscow State University of Civil Engineering - Design Institute (NRU MGSU), Moscow, Russia  
candidate in tech. sc., docent, associated prof. of the dep. of Technology of binders and concretes  
E-mail: BazhenovaSI@mgsu.ru

**Alekseev Vyacheslav A.**

National Research Moscow State University of Civil Engineering - Design Institute (NRU MGSU), Moscow, Russia  
Head of the laboratory of the dep. of Technology of binders and concretes  
E-mail: 634586@mail.ru