



Галинский А. М.

**Галинский А. М., канд. техн. наук, директор,
Государственное предприятие «Научно-исследовательский институт строительного производства»
(ГП НИИСП), г. Киев**

ПОДБОР СОСТАВА ТВЕРДЕЮЩЕГО РАСТВОРА ДЛЯ УСТРОЙСТВА ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОГО ЭКРАНА

В Научно-исследовательском институте строительного производства (Украина, Киев) ведутся исследования технологии возведения горизонтальных противofильтрационных экранов (ГПЭ) под существующими сооружениями с использованием метода горизонтально-направленного бурения скважин. Между двумя параллельными горизонтальными скважинами, в которых для предотвращения обрушения затянуты ограничители захваток, специальным рабочим органом устраивается ГПЭ из твердеющего противofильтрационного материала (ПФМ). Для подбора состава твердеющего ПФМ в институте проведен комплекс лабораторных исследований и исследований на крупномасштабном специализированном стенде. Исследования проводились с использованием метода планирования эксперимента. В результате исследований подобран состав твердеющего глино-цементно-песчаного раствора, позволяющий получить наименьшую водопроницаемость экрана, характеризуемую коэффициентом фильтрации $K = 4,7 \cdot 10^{-7}$ см/с, определены физико-механические показатели как жидкого, так и затвердевшего раствора, а также определены влияния количества отдельных составляющих на свойства жидкого раствора и ПФМ в затвердевшем состоянии.

Постановка проблемы

Одной из задач защиты окружающей среды является задача защиты грунтов и грунтовых вод от загрязнения токсичными стоками, а также стоками с радионуклидами. Проблема локализации таких стоков может решаться различными методами, среди которых технология устройства замкнутой совершенной противofильтрационной завесы способом «стена в грунте» является достаточно надежной. Однако эффективность такой вертикальной завесы значительно снижается в случае отсутствия на практически достигаемой глубине водоупорного слоя грунта, в который должна быть заглублена завеса. При отсутствии водоупора проблему можно решить, применяя новую технологию устройства горизонтального экрана под существующими сооружениями. Для обеспечения противofильтрационной надежности экрана необходимо подобрать состав твердеющего тампонажного раствора, который отвечал бы требованиям по плотности, вязкости, водоотдаче, и определить его физико-механические показатели, как в жидком, так и затвердевшем состоянии, и взаимное влияние его составляющих.

Анализ исследований по выбранной теме

Анализ литературы в области строительства противofильтрационных сооружений с целью защиты грунтов и грунтовых вод от загрязнения, показал необходимость применения новых технологий и проводить исследования в нескольких направлениях:

- анализ работ Смородинова М.И., Филахтова А.Л., Зубкова В.М., Круглицкого Н.Н. Чернухина А.М., Феоктистовой Н.В., исследований, проведенных в НИИОСП им. Герсеванова Н.М. (г. Москва) и НИИСП, (г. Киев), показал необходимость совершенствования методов локализации загрязненных грунтов и грунтовых вод при отсутствии на достигаемой глубине водо-

упора и необходимость создания твердеющих противofильтрационных растворов;

- анализ информации о методе горизонтально-направленного бурения, машинах, оборудовании и растворах, применяемых при бурении, показал возможность создания на базе этого метода новой технологии возведения горизонтального противofильтрационного экрана, который может быть использован для локализации загрязнений в случае отсутствия водоупора, и необходимость разработки рецептуры твердеющих растворов для горизонтального экрана.

Основное содержание

В Научно-исследовательском институте строительного производства (Украина, Киев) ведутся исследования технологии возведения горизонтальных противofильтрационных экранов (ГПЭ) под существующими сооружениями. Технология возведения ГПЭ базируется на технологии устройства горизонтальных скважин методом горизонтально-направленного бурения ГНБ.

Актуальность таких исследований подтверждается необходимостью защиты окружающей среды, и в частности, защиты грунтов и грунтовых вод от загрязнения техногенными стоками промышленных предприятий, в том числе и стоками, загрязненными радионуклидами.

Новая технология устройства ГПЭ под сооружением (Рис.1, 2), включает в себя бурение направляющих горизонтальных скважин методом ГНБ, затягивание в скважины разделительных элементов из полимерных труб (РЭ), разработку грунта между скважинами с разделительными элементами грунторазрабатывающим рабочим органом и заполнение образовавшейся горизонтальной полости противofильтрационным материалом (ПФМ) [1,2].

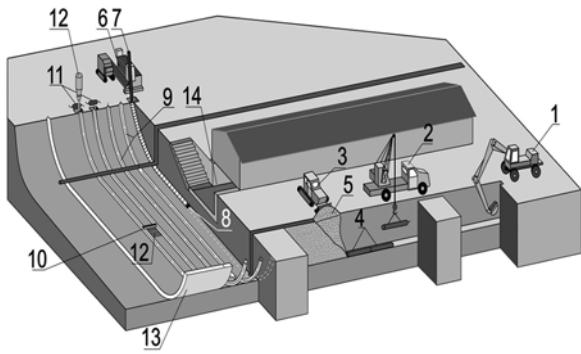


Рис. 1. Технология устройства ГПЭ под сооружением
1 – экскаватор, 2 – автокран, 3 – бульдозер, 4 – дренажная труба, 5 – щебень для дренажа, 6 – установка ГНБ, 7 – буровая штанга, 8 – буровая головка, 9 – горизонтальная скважина, 10 – рабочий орган, 11 – лебедка, 12 – ПФМ, 13 – ГПЭ, 14 – хранилище

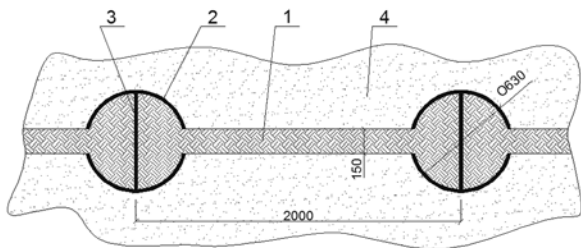


Рис. 2. Фрагмент ГПЭ
1 – ГПЭ; 2 – разделительный элемент из полимерной трубы; 3 – перегородка разделительного элемента из полимерного листа (ребро жесткости); 4 – окружающий грунт

Исследования технологии устройства горизонтальных экранов под сооружениями направлены на изучение взаимного влияния конструктивно-технологических параметров, в том числе:

- влияния вертикального давления на усилие перемещения рабочего органа в песках;
- оценку влияния вертикального давления на формирование горизонтального экрана из твердеющего материала;
- подбор составов твердеющих тампонажных материалов и определение их характеристик для обеспечения сплошности и противофильтрационной надежности горизонтального экрана;
- изучение и оценка способов подачи противофильтрационных материалов в горизонтальную полость, образованную грунторазрабатывающим рабочим органом и т.д.

Для определения технологических параметров и их взаимного влияния при возведении ГПЭ исследования проводились как на приставке к сдвиговому прибору ПГС-2М, так и на крупномасштабном специализированном стенде [3,4].

Анализируя технологию устройства ГПЭ, нужно отметить, что основными процессами являются: процесс образования полости в грунте, который происходит в результате перемещения рабочего органа в замкнутой грунтовой среде практически безотвальным способом и процесс заполнения образовавшейся полости ПФМ.

Согласно разработанной технологии, для предотвращения обрушения полости, которая образуется за рабочим органом, через форсунки рабочего органа не-

прерывно под давлением подается твердеющий противофильтрационный материал (твердеющий тампонажный раствор).

С технологической точки зрения твердеющий раствор должен обладать различными, а иногда и противоречивыми свойствами.

На первом этапе приготовления и подачи твердеющего раствора к образованной полости раствор должен обладать тиксотропными свойствами – быть очень подвижным и не расслаиваться в системе подачи раствора к месту укладки.

В связи с тем, что раствор в полость грунта подается через форсунки расположенные в корпусе рабочего органа, раствор должен обладать свойствами инъекционного раствора, который должен свободно пройти через систему разнонаправленных узких отверстий.

Когда жидкий инъекционный раствор попадает в полость грунта, например, песчаного, окружающий грунт начинает, как правило, интенсивно поглощать воду из раствора. В изменившихся внешних условиях при потере значительного количества воды, твердеющий раствор уплотняется, приобретая свойства строительного раствора, остаточное водоцементное отношение которого значительно меньше первоначального.

Поэтому, для создания качественного противофильтрационного экрана, важной задачей является подбор состава твердеющего ПФМ с определением физико-механических показателей как жидкого, так и затвердевшего раствора, а также определение влияния количества отдельных составляющих на свойства растворной смеси и раствора в затвердевшем состоянии.

Предварительными исследованиями установлено, что с технологической точки зрения применение беспесчаных растворов оказалось более сложным и менее надежным в части образования сплошного экрана, чем применение глино-цементно-песчаных растворов. При этом, сложности сказывались не только на необходимости в 2-3 раза увеличивать скорости перемещения рабочего органа в случае применения беспесчаных растворов, но и то, что беспесчаные растворы имеют значительно большую водоотдачу [3].

Исходя из вышесказанного, составы твердеющих растворов разрабатывались на основе цементно-глинистых композиций с включением тонкодисперсного наполнителя:

- портландцемент ПЦ II / А-Ш-400;
- бентонитовый глинопорошок марки ПБМ-16 из глины Черкасского месторождения;
- песок неогеновый белый тонкозернистый;
- вода.

Для решения задачи подбора состава твердеющего глино-цементно-песчаного ПФМ определялись физико-механические характеристики и контролировалось качество исходных материалов на стандартном оборудовании в соответствии с действующими стандартами [5,6,7,8]:

для растворной смеси в тиксотропном состоянии (жидкого раствора):

- водоудерживающая способность, %;
- плотность, г/см³;
- подвижность по конусу АЗНИИ, мм;
- условная вязкость, с;
- срок сохранения подвижности раствора, мин
- расслоение, %;
- водоотделение, %;

для затвердевшего раствора:

- прочность при сжатии, кгс/см²;

- прочность на растяжение при изгибе, кгс/см²;
- плотность, г/см³;
- влажность по массе, %;
- водопоглощение по массе, %;
- коэффициент фильтрации, Кф · 10⁻⁷, см/с

Некоторые виды испытаний приведены на рисунках 3, 4, 5 и 6.

Подбор состава твердеющего ПФМ производился по методу планирования эксперимента [9,10,11,12].

В качестве факторов были определены: расходы бентонитового глинопорошка (x₁), цемента (x₂) и воды (x₃). Эти факторы отвечают основным требованиям, предъявляемым к переменным величинам – являются управляемыми, количественными, совместимыми и независимыми друг от друга (некоррелированными между собой).

За функции отклика при подборе состава раствора были приняты: плотность жидкого раствора (ρ_ж, г/см³); плотность затвердевшего раствора (ρ_{тв}, г/см³); предел прочности на растяжении при изгибе (R_{изг}, кгс/см²); предел прочности при сжатии (R_{сж}, кгс/см²); коэффициент фильтрации (К_ф, см/с).

Функцию отклика у для трех переменных можно представить в виде:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3, (1)$$

и поэтому, для необходимых четырех опытов (поскольку коэффициентов регрессии тоже четыре – b₀, b₁, b₂, b₃), была применена матрица планирования в виде «полуреплики» 2³⁻¹ от полного факторного эксперимента 2³.

Предварительные исследования технологии устройства ГПЭ также позволили установить технологически разумные пределы, в которых могут изменяться факторы, и выбрать нулевой уровень и интервалы варьирования факторов. Указанные величины достаточно близко характеризуют область применения каждого фактора, которая отражает технологические условия устройства ГПЭ. Уровни факторов и интервалы их варьирования приведены в таблице 1, а их натуральные показатели в таблице 2.

Таблица 1.

Уровни факторов и интервалы их варьирования

Уровень факторов и интервал варьирования	Наименование факторов	Глино-порошок	Цемент	Вода
	Кодовое обозначение	x ₁	x ₂	x ₃
Основной	x ₀	100	130	715
Интервал варьирования	δ _i	10	15	80
Верхний	x _i = +1	110	145	795
Нижний	x _i = -1	90	115	635

Таблица 2.

Планирование эксперимента в натуральных показателях

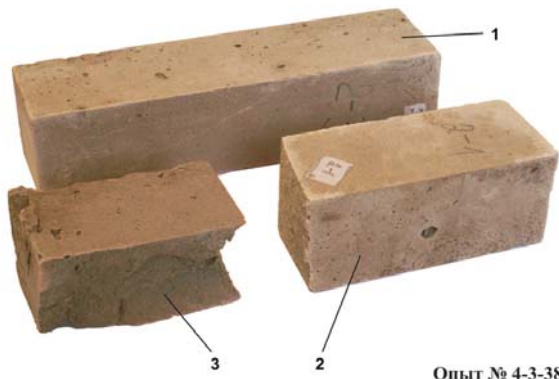
Точки плана V	x ₀	Планирование			Песок*, const
		Глино-порошок, x ₁	Цемент, x ₂	Вода, x ₃	
1	+1	90	115	795	317
2	+1	110	115	635	317
3	+1	90	145	635	317
4	+1	110	145	795	317



Рис. 3 Испытание образцов балочек затвердевшего раствора на растяжение при изгибе на приборе МИИ-100

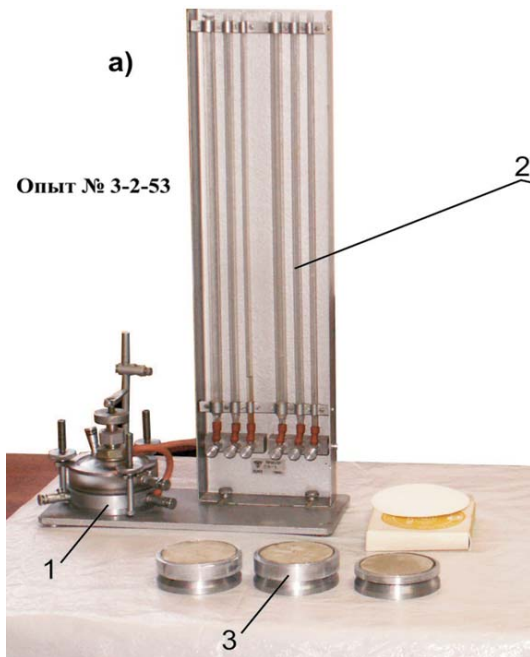


Рис. 4. Испытание образца балочки твердеющего раствора при сжатии а) – общий вид испытательной машины MP-05-1; б) испытание образца



Опыт № 4-3-38

Рис. 5. Испытание образцов балочек твердеющего раствора.
1 – общий вид образца балочек для испытания;
2 – половинка балочки после испытания образца на растяжение при изгибе;
3 – половинка балочки после испытания на сжатие



Опыт № 3-2-53

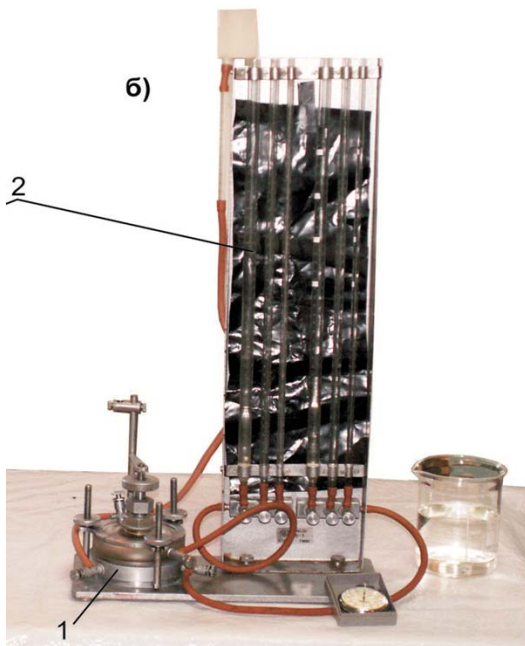


Рис. 6. Определение фильтрационных свойств образцов твердеющего раствора
1 – одометр с образцом; 2 – пьезометры; 3 – кольца с образцами; а) прибор ПФ-1 для водонасыщения образцов; б) прибор ПФ-1 для определения коэффициента фильтрации

В результате проведенных экспериментов, для вышеуказанных параметров, были получены 5 уравнений регрессии, которые практически полностью описывают результаты эксперимента:

для жидкого раствора:

– плотность –
 $y = 1378 + 3,25x_1 + 5,25x_2 - 33,75x_3$ (2)

для затвердевшего раствора:

– плотность –
 $y = 1689 + 11x_1 + 21,5x_2 + 7,5x_3$ (3)

– прочности на растяжение при изгибе –
 $y = 412 + 64x_1 - 4,5x_2 + 23x_3$ (4)

– прочности при сжатии –
 $y = 22,25 - 0,25x_1 + 2,75x_2 - 0,75x_3$ (5)

– коэффициента фильтрации –
 $y = 53,5 - 2,5x_1 - 5,5x_2 - 1,5x_3$ (6)

Проверка результатов по принятому плану проведения экспериментов показала воспроизводимость результатов по критерию Кохрена, их адекватность принятой линейной модели по критерию Фишера и то, что все коэффициенты регрессии уравнений являются значимыми по критерию Стьюдента.

Известно, что чем больше по абсолютному значению величина коэффициента регрессии – b_i , тем сильнее влияние его на параметр оптимизации в заданном интервале варьирования факторов [11]. Если $b_i > 0$, то увеличение X_i вызывает увеличение параметра оптимизации; при $b_i < 0$ увеличение приводит к уменьшению параметра оптимизации.

Одним из важнейших показателей свойств раствора являются прочность при сжатии и коэффициент фильтрации. Как видно из уравнений (5) и (6), наибольшее влияние на рассматриваемые параметры оптимизации оказывает расход цемента. Для улучшения показателей раствора по прочности на сжатие и коэффициента фильтрации необходимо в составе раствора повысить расход цемента.

Для улучшения показателя плотности жидкого раствора – уравнение (2) необходимо обратить внимание на расход воды. Плотность затвердевшего раствора – уравнение (3) в значительной мере также будет зависеть от расхода цемента.

Испытание затвердевшего раствора на растяжение при изгибе имеет сложную систему распределения разрушающих нагрузок. Поэтому, в узком интервале варьирования и при возрасте образца 28 суток, выступают на первый план воздействия более пластичного материала, бентонитового глинопорошка – уравнение (4).

Обобщенные результаты испытаний жидкого и затвердевшего растворов приведены в таблице 3. Составы № 1–№ 4 использованы в точках плана математического планирования эксперимента, № 5 – состав точки в центре планирования.

Как уже отмечалось выше, раствор ПФМ должен обладать свойствами инъекционного раствора и не расслаиваться в системе подачи раствора к месту его укладки. Исходя из этих требований, было определено, что условная вязкость должна быть в пределах 30-38с, а плотность в пределах 1,33-1,36 г/см³. Исходя из этого, а также результаты опытов в запланированных точках плана, был разработан состав твердеющего раствора № 6 (см. табл. 3), который наиболее точно отвечает предъявленным требованиям.

Результаты подбора состава твердеющего глино-цементно-песчаного ПФМ были использованы в экспериментах на крупномасштабном стенде при отработке технологии создания ГПЭ. Образцы экрана показаны на рис. 7.

Результаты испытаний жидких и затвердевших растворов

№ п/п	Наименование показателей	Номера составов					
		1	2	3	4	5	6
1	Расход материалов, г/л:						
	– глинопорошок бентонитовый	90	110	90	110	100	106
	– цемент	115	115	145	145	130	141
	– вода	795	635	635	795	715	792
	– песок	317	317	317	317	317	317
2	Жидкий раствор:						
	– водоудерживающая способность, %	88,91	93,06	91,22	89,97	88,33	89,90
	– плотность, г/см ³	1,336	1,410	1,414	1,353	1,378	1,359
	– подвижность по конусу АЗНИИ, мм	180	105	130	145	180	165
	– условная вязкость, с	30	–	–	60	30	38–37
	– срок сохранения подвижности раствора, мин	35	2	5	10	30	30
	– расслоение, %	0,22	0	0	0,36	0,43	0,40
– водоотделение, %	1	0	0	0,5	0,5	0	
3	Затвердевший раствор (на 28 суток):						
	– прочность при сжатии, кг/см ²	19	20	26	24	28	28
	– прочность на растяжение при изгибе, кг/см ²	3,75	4,57	3,20	4,94	4,13	5,77
	– влажность по массе, %	46,0	45,5	45,0	46,0	45,5	46,0
	– водопоглощение по массе, %	9,3	10,0	9,2	10,8	9,5	10,4
	– коэффициент фильтрации, Кф·10 ⁻⁷ , см/с	6,0	5,8	5,2	4,4	5,2	4,7
– средняя плотность, г/см ³	1,664	1,671	1,692	1,729	1,690	1,702	

Результаты исследований фрагментов экрана, полученных на стенде, приведены в таблице 4.

Из таблицы следует, что при образовании экрана на стенде технологические факторы влияют на характеристики затвердевшего раствора.

Так, средняя прочность экрана при сжатии уменьшается на 28 суток по сравнению с прочностью образцов, испытанных при подборе состава раствора от 12 до 19 % и составляет соответственно 24,73-22,75 кг/см².

Плотность экрана при твердении на воздухе на 28 суток за

счет потери более 90 % влажности уменьшается почти на 45 % и составляет всего 0,9 г/см³, в то время, как при твердении во влажном песке плотность уменьшается на 6,1 % и составляет 1,53 г/см³ при влажности 47,1 %, что на 10,1 % меньше плотности образцов, испытанных при подборе состава раствора.

Плотность экрана, полученного на стенде, за счет уменьшения его влажности уменьшается на от 10-45 %, однако плотность скелета уменьшается всего на 5-14 %, следовательно, водопроницаемость экрана остается практически неизменной.

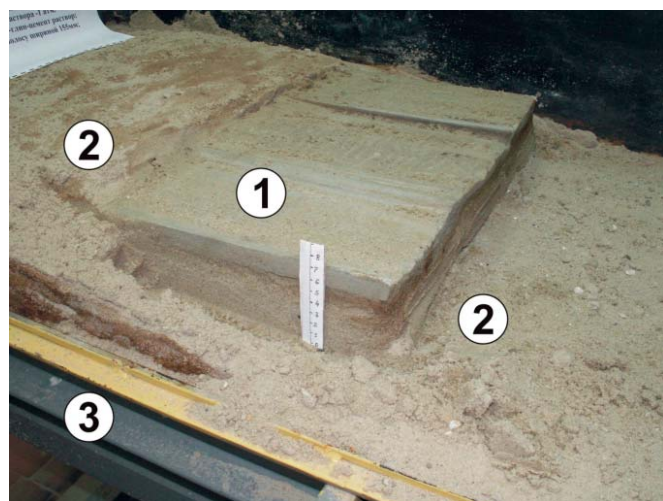


Рис.7. Горизонтальный экран из глино-цементно-песчаного материала
а) фрагмент полос экрана (1) в песке (2) на стенде (3);
б) фрагмент затвердевшего экрана для испытаний

Средние значения показателей фрагментов экрана, полученных на стенде

№ п/п	Наименование показателей	На 1-е сутки	На 14-е сутки	На 28-е сутки
При выдерживании фрагментов экрана на воздухе при температуре 21-22 °С				
1	Прочность при сжатии*, кг/см ²	4,65	16,72	24,73
2	Влажность, %	64,12	8,4	4,55
3	Плотность, г/см ³	1,63	1,02	0,9
4	Плотность скелета, г/см ³	1,0	0,93	0,86
5	Коэффициент пористости	1,82	2,1	2,27
При выдерживании фрагментов экрана во влажном песке (35-40 %) при температуре 21-22 °С				
6	Прочность при сжатии, кг/см ²	4,65	13,21	22,75
7	Влажность, %	64,12	52,21	47,1
8	Плотность, г/см ³	1,63	1,59	1,53
9	Плотность скелета, г/см ³	1,0	0,97	0,95
10	Коэффициент пористости	1,82	1,84	1,9

* Прочность при сжатии на 1-е сутки определялась с помощью пенетрометра

Выводы

1. В результате проведенных экспериментов по подбору состава твердеющего глино-цементно-песчаного раствора для ГПЭ было установлено, что наименьшая водопроницаемость экрана, характеризуемая коэффициентом фильтрации $K_f = 4,7 \cdot 10^{-7}$ см/с, достигается при таких соотношениях компонентов: бентонитовый глинопорошок – 106 г/л, цемент – 141 г/л, вода-792 г/л и песок – 317 г/л, при этом плотность жидкого раствора должна находиться в пределах 1,35-1,37 г/см³, а условная вязкость – 37-38 с. При таком соотношении компонентов затвердевший раствор на 28 суток будет иметь прочность при сжатии до 28 кг/см², прочность на растяжение при изгибе до 5,77 кг/см² и среднюю плотность – 1,702 г/см³.

2. Эксперименты, проведенные на крупномасштабном стенде, показывают, что технологические факторы оказывают влияние на характеристики затвердевшего раствора, при этом прочность экрана снижается на 12-19 % и находится в пределах 24,73-22,75 кг/см², плотность экрана за счет уменьшения его влажности уменьшается на 10,1-45 %, однако плотность скелета уменьшается всего на 5-14 %, а, следовательно, водопроницаемость экрана остается практически неизменной.

3. При разработке составов твердеющих растворов для устройства горизонтального противотрационного экрана в реальных условиях строительной площадки, необходимо в состав твердеющего раствора вводить химические добавки для бетонов и растворов, которые регулируют пластичность и сроки твердения раствора.

Литература:

1. Спосіб улаштування екрану під спорудою, /Деклараційний патент на винахід № 35065 А від 15.03.2001, бюл.№ 2.
2. Чернухин А.М., Галинский А.М. Исследование процесса образования полости для устройства подземного экрана под сооружением. Будівельне виробництво, Київ, 2000, № 41, с.37-40.
3. Чернухін О.М., Галінський О.М., Мандзюк І.О. Дослідження процесу укладки тампонажних матеріалів у порожнину для створення горизонтального екрану під спорудою Науково-технічний журнал «Нові технології в будівництві», Київ, НДІБВ, 2002, № 1(3), с. 44-49
4. A. Galinskiy. Research of technology of construction of horizontal impervious screen under the existing structures Conference proceedings. XV Danube-European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE 2014). 9-11September 2014, Vienna, Austria, volume 2.Paper No.1213-1219
5. ДСТУ Б В.2.1-17:2009. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення фізичних властивостей.

6. ДСТУ Б В.2.7-239:2010 (EN 1015-11:1999, NEQ). Будівельні матеріали. Розчини будівельні. Методи випробувань.
7. ДСТУ Б В.2.1-3-96 (ГОСТ 30416-96). Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Лабораторні випробування. Загальні положення
8. ДСТУ Б В.2.1-23:2009. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення коефіцієнта фільтрації.
9. Адлер Ю.П. Введение в планирование эксперимента. – М., «Металлургия», 1969, – 155с.
10. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М., «Наука», 1965, – 340с.
11. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – 2-е изд.– М. Финансы и статистика, 1981, –263с.
12. Винарский М.С., Лурье М.В. «Планирование эксперимента в технологических исследованиях. – К., «Техніка», 1975, – 168 с.