ГИДРАВЛИКА. ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 626

**С.В. Сольский, Е.Е. Легина, Р.Н. Орищук, З.Г. Васильева,
А.С. Величко**

АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОМПОНЕНТОВ ГЛИНОЦЕМЕНТОБЕТОНА НА ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Аннотация. Приведены результаты выполненного анализа влияния компонентов, используемых при приготовлении глиноцементобетона (ГЦБ), на его прочностные и деформационные характеристики. Выявлено, что изменение количественного содержания одного или нескольких компонентов состава рецептуры смесей ГЦБ, наиболее часто используемых в гидротехническом строительстве, позволяет управлять физико-механическими характеристиками противофильтрационного элемента (ПФЭ), изготовленного из этого материала. Выполненный авторами анализ влияния рецептур ГЦБ на его физико-механические свойства может быть использован для подбора оптимального состава ГЦБ при решении конкретных гидротехнических задач.

Ключевые слова: глиноцементобетон (ГЦБ), компоненты ГЦБ, бурсекущиеся сваи, напряженно-деформированное состояние, модуль деформации, прочность на сжатие

DOI: 10.22227/1997-0935.2016.10.80-93

Высокие темпы строительства плотин и дамб при использовании водных ресурсов, а также интенсивное освоение подземного пространства при возведении зданий и сооружений, требуют обеспечения противофильтрационных мероприятий. Для эффективного перекрытия фильтрационных потоков применяется множество способов, таких как цементационные и инъекционные завесы, устройство зубьев, диафрагм, в т.ч. из грунтоцементных смесей, выполняемых методом «стена в грунте».

К основным критериям выбора состава материала «стены в грунте» относятся следующие характеристики: водопроницаемость, прочность, деформативность, экономичность. Одним из материалов удовлетворяющим вышеперечисленным характеристикам является глиноцементобетон (ГЦБ). В настоящее время существует достаточно много примеров успешного строительства и эксплуатации противофильтрационных элементов (ПФЭ) из ГЦБ, устроенных в основании гидротехнических сооружений [1–10]. Есть положительный опыт выполнения ремонтных работ противофильтрационных устройств традиционного типа (в случае нарушения их фильтрационной прочности) с использованием глиноцементобетонных материалов [11–13]. Также имеется некоторый опыт создания ПФЭ из ГЦБ в теле грунтовых плотин высотой до 15 м. ПФЭ, создаваемые методом «стена в грунте», отличаются высокой степенью надежности (при условии обеспечения их сплошности) и простотой технологии производства работ. В этом заключается одно из главных их преимуществ по срав-

нению с завесами инъекционного типа. Конструкция глиноцементобетонной «стены в грунте» выполняется поэлементно, отдельными круглыми скважинами или панелями. Распространению метода способствовало то, что данная технология обеспечена наличием специальных установок для проходки глубоких скважин и траншей. При этом данные установки могут быть модернизированы для решения специфических задач, зачастую возникающих в процессе строительства (например, связанных с геологическими или гидрогеологическими особенностями основания и др.). Кроме того, разработаны методы бурения с использованием тиксотропных жидких составов, противодействующих обрушению грунтов стенок при проходке глубоких выемок [1–4]. Также ГЦБ может иметь требуемую в конструкции деформируемость. По результатам [13–20] можно сделать вывод, что необходимым требованием к надежной работе «стены в грунте» является то, чтобы по деформативности материал тела стены был близок к свойствам окружающего грунта.

В АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» в последние годы ведутся исследования глиноцементобетонного материала, используемого в качестве ПФЭ. Был выполнен комплекс лабораторных, полевых исследований, моделирование (фильтрационно-суффозионных процессов) и аналитическое обоснование проектных решений на объектах Курейской ГЭС, Гоцатлинской ГЭС и Нижне-Бурейской ГЭС. Исследовались фильтрационно-суффозионные и физико-механические свойства ГЦБ, напряженно-деформированное состояние противо-фильтрационной стенки, морозостойкость ГЦБ и пр.

В состав ГЦБ, как правило, входят цемент, бентонитовая глина, вода, песок, щебень, фибра, противоморозные добавки, пластификаторы (например, лигносульфонат (ЛСТ)) и другие компоненты, используемые при необходимости изменения исходной рецептуры. Изменение соотношений компонентов ГЦБ позволяет обеспечить управляемость физико-механическими, прочностными и деформационными характеристиками ПФЭ, т.е. подобрать оптимальный состав для конкретного объекта строительства, для каждого из этапов его возведения или для ремонта гидротехнического сооружения. Управляемость характеристиками является важным преимуществом ГЦБ.

На практике встречаются самые различные составы ГЦБ: от практически чистой глины до железобетона. В ходе работы выполнен анализ приведенных в литературных источниках [11, 12, 20–22] данных по применяющимся на практике составам ГЦБ, на основе которого проведен покомпонентный анализ рецептур ГЦБ. В используемых рецептурах количество цемента, используемого как вяжущее, находится в пределах 75...200 кг/м³, бентонитовой глины — 40...100 кг/м³, крупный и мелкий заполнитель используют в равных количествах, но в некоторых случаях мелкого заполнителя берут больше.

Важным параметром является водоцементное отношение (В/Ц), так как количество используемой для затворения смеси воды влияет на прочность, пористость, трещиностойкость готового ГЦБ, а также на подвижность укладываемой смеси. Переизбыток воды может привести к нестабильности смеси — раствороотделению и водоотделению, в то время как ее недостаток препятствует равномерному распределению раствора и приводит к образованию воздушных пузырей и микротрещин. Количество используемой при приготовле-

нии ГЦБ воды зависит от того в каком виде вводится в состав бентонитовая глина (порошок или суспензия), так как бентонит впитывает воду при набухании и понижает В/Ц.

Для применения ГЦБ в холодный период времени необходимо использовать добавки в виде солевых растворов, чаще всего каменной соли. Несоблюдение рецептуры состава ГЦБ и технологии его приготовления при введении в состав солевых добавок может привести к развитию процессов коагуляции бентонитовой глины и снижению прочностных параметров ГЦБ относительно проектных. По этой причине необходимо строго следовать предусмотренной технологии затворения смеси.

В составах ГЦБ используются модифицирующие добавки, способные понижать свободную энергию на границе раздела контактирующих между собой фаз, например, ЛСТ. Эти вещества способны понижать вязкость глинистых растворов, а также ускорять процессы твердения бетона.

Для предотвращения трещинообразования, уменьшения усадки, повышения физико-механических свойств в состав рецептуры ГЦБ вводят волокна синтетической фибры, которые инертны по отношению к воде, не вступают в реакции гидратации, способствуют формированию устойчивой матрицы ГЦБ-систем. Микронаполнители (волокна фибры) могут выполнять в структуре ГЦБ роль демпфирующих и армирующих элементов, снижающих и перераспределяющих внутренние напряжения, возникающие в процессе твердения.

Важным условием для получения качественного противофильтрационного материала ГЦБ является осуществление сквозного контроля производства работ на всех этапах: при поставках компонентов для приготовления смеси, их хранении, во время приготовления рабочей смеси, доставки ее к месту производства работ, самого производства работ и твердения материала ГЦБ.

Основной задачей выполненного исследования являлся анализ влияния компонентов, используемых при приготовлении ГЦБ смесей, на его прочностные и деформационные характеристики. Для решения поставленной задачи были рассмотрены рецептуры ГЦБ, использованные на объектах гидротехнического строительства. Анализируемые составы ГЦБ приведены в табл. 1.

Следует отметить, что в настоящее время публикуется мало данных о составах ГЦБ смесей и методах их подбора. Сведения о составах ГЦБ смесей, применяемых в гидротехническом строительстве, в печати приводятся неохотно, характеризуются неполнотой и отсутствием количественных показателей.

В табл. 1 приведены сведения о рецептурах ГЦБ, использованных для возведения «стены в грунте» Гоцатлинской ГЭС и временных перемычек строительного котлована основных бетонных сооружений Нижне-Бурейской ГЭС. И в том и другом случае рецептура состава ГЦБ была разработана ООО «ГидроСПЕЦПРОЕКТ». В специализированных лабораториях АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» в рамках выполнения договоров с АО «Ленгидропроект» выполнялось исследование физико-механических, прочностных, деформационных и фильтрационно-суффозионных свойств данных материалов ГЦБ.

Также в табл. 1 приведены сведения о рецептурах ГЦБ, применяемых на гидротехнических объектах в Российской Федерации в целом.

Табл. 1. Составы ГЦБ

Номер смеси	Цемент, кг	Бентонит, кг	Вода, л	Фибра, кг	Песок, кг	Щебень, фр. 5...10 мм	Щебень, фр. 5...20 мм	Плотность ГЦБ, кг/м³	Прочность на сжатие, МПа		Модуль деформации, МПа	
									R ₇	R ₂₈	E ₇	E ₂₈
Расчетные составы ГЦБ по результатам работы [20]												
1	200	100	525	1,0	426	280	280	1811,0	—	0,94	—	290,4
2	100	100	350	—	668	435	435	2088,0	—	0,67	—	90,7
3	200	40	420	—	572	375	375	1982,0	—	0,99	—	463,7
4	100	40	245	1,0	810	532	532	2259,0	—	1,17	—	1020,0
5	200	100	360	—	613	405	405	2083,0	—	1,57	—	2494,0
6	100	100	240	1,0	789	520	520	2269,0	—	1,82	—	1561,2
7	200	40	288	1,0	671	500	500	2199,5	—	2,63	—	7345,4
8	100	40	168	—	896	591	591	2386,0	—	1,57	—	5874,1
9	150	70	324,5	0,5	688	451	451	2134,5	—	1,41	—	1398,7
Состав ГЦБ для возведения «стены в грунте» Гоцатлинской ГЭС												
10	120	140	450	—	635	—	583	1930,0	0,37	0,67	—	56,0
11	120	140	450	—	635	290	290	1930,0	0,37	0,72	—	63,0
Состав ГЦБ для возведения временных перемычек строительного котлована Нижне-Бурейской ГЭС												
12*	230	193	388	0,9	591	—	643	2090,0	0,75	2,20	—	75
13	210	143	453	0,9	558	—	605	2090,0	0,75	1,65	—	75
Расчетные составы ГЦБ по результатам работы [21]												
14	175	50	252	—	+	—	+	2306,0	1,55	2,83	—	—
15	204	51	264	—	+	—	+	2356,0	2,36	5,48	—	—
16	106	106	320	—	+	—	+	2330,0	0,74	1,04	—	—
17	100	100	286	—	+	—	+	2300,0	0,84	0,95	—	—
18	126	101	308	—	+	—	+	2350,0	1,02	1,44	—	—
19	150	100	304	—	+	—	+	2328,0	1,24	1,74	—	—
20	178	102	315	—	+	—	+	2328,0	1,50	1,72	—	—
21	196	98	299	—	+	—	+	2290,0	1,79	2,98	—	—
22	98	122	344	—	+	—	+	2285,0	0,72	0,81	—	—
23	125	125	325	—	+	—	+	2290,0	0,91	1,37	—	—
24	149	124	315	—	+	—	+	2260,0	0,97	1,97	—	—
25	177	126	322	—	+	—	+	2270,0	1,33	2,03	—	—
26	98	146	342	—	+	—	+	2255,0	0,60	0,94	—	—
27	98	147	314	—	+	—	+	2230,0	0,57	0,77	—	—
28	121	145	335	—	+	—	+	2227,0	0,96	1,17	—	—
29	149	149	350	—	+	—	+	2293,0	1,12	1,55	—	—
30	174	149	351	—	+	—	+	2278,0	1,04	1,67	—	—
31	76	177	335	—	+	—	+	2242,0	0,45	0,67	—	—
32	99	174	348	—	+	—	+	2240,0	0,60	0,74	—	—
33	124	174	344	—	+	—	+	2215,0	0,81	1,04	—	—
34	151	177	341	—	+	—	+	2227,0	1,09	1,43	—	—
35	180	180	338	—	+	—	+	2240,0	1,24	1,80	—	—
36	175	175	355	—	+	—	+	2205,0	1,13	1,79	—	—
37	75	200	375	—	+	—	+	2247,0	0,42	0,56	—	—
38	100	200	369	—	+	—	+	2245,0	0,57	0,94	—	—

В ходе выполнения анализа влияния компонентов, используемых при приготовлении ГЦБ смесей, на его прочностные и деформационные характеристики на основе приведенных в табл. 1 данных были построены следующие зависимости:

- прочности на сжатие ГЦБ от водоцементного (V/C) и водовяжущего ($V/(C+B)$) отношения;
- прочности на сжатие ГЦБ от соотношения цемент/бентонит (C/B);
- модуля деформации от водоцементного (V/C) и водовяжущего отношения ($V/(C+B)$).

Статистическая обработка данных выполнена в редакторе Microsoft Office Excel.

Для определения зависимости прочности на сжатие R от водоцементного, водоцементобentonитового и цементобentonитового отношений построены графики $R(V/C)$, $R(V/(C+B))$, $R(C/B)$, на каждом из которых определен тренд (для первых двух зависимостей в качестве аппроксимирующей функции выбрана степенная (вида $y = ax^b$), для третьей — линейная ($y = ax + b$)). Характеристики аппроксимации (уравнение аппроксимирующей функции, коэффициент корреляции r , ширина доверительного интервала 2σ , где σ — среднеквадратическое отклонение) приведены на самих графиках (рис. 1, 2).

На рис. 1 показаны зависимости прочности на сжатие ГЦБ от водоцементного (V/C) и водовяжущего ($V/(C+B)$) отношений. Водоцементное отношение (V/C) равно отношению массы воды к массе цемента в замесе. Водовяжущее отношение ($V/(C+B)$) — это отношение массы воды к массе вяжущего после затворения смеси.

Графики зависимости изменения величины прочности на сжатие образца ГЦБ от значения водоцементного и водовяжущего отношений, представленные на рис. 1, построены на основе анализа 38 рецептур составов ГЦБ, используемых в гидротехническом строительстве (см. табл. 1). В обоих случаях из анализа исключена точка, соответствующая $R = 5,48$ МПа, что позволило существенно уменьшить ширину доверительного интервала.

Рассмотрим зависимость $R(V/C)$, приведенную на рис. 1, а. Диапазон величин по оси абсцисс, на которой отложены значения водоцементного отношения (V/C), находится в пределах от 1,29 до 5,0. Диапазон величин по оси ординат, на которой отложены значения величины прочности на сжатие R , МПа, находится в пределах от 0,56 до 5,48 МПа. Для зависимости $R(V/C)$ коэффициент корреляции составил $r = 0,93$ (сильная корреляционная связь). Степенное уравнение регрессии имеет вид: $y = 4,0659x^{-1,28}$. График $R(V/C)$ имеет вид гиперболы, т.е. увеличение значения водоцементного отношения (V/C) приводит к монотонному уменьшению прочности на сжатие ГЦБ.

Теперь обратимся к зависимости $R(V/(C+B))$, представленной на рис. 1, б. Диапазон величин по оси абсцисс, на которой отложены значения водовяжущего отношения ($V/(C+B)$), находится в пределах от 0,92 до 1,75. Диапазон величин по оси ординат, на которой отложены значения величины прочности на сжатие (R , МПа), находится в пределах от 0,56 до 5,48 МПа. Для зависимости $R(V/(C+B))$ коэффициент корреляции составил $r = 0,70$ (средняя корреляционная связь). Степенное уравнение регрессии имеет вид: $y = 1,952x^{-1,682}$.

График зависимости $R(B/(Ц+Б))$ имеет вид гиперболы, т.е. увеличение значения водовяжущего отношения $(B/(Ц+Б))$ приводит к монотонному уменьшению прочности на сжатие ГЦБ.

Рис. 1. Зависимость прочности на сжатие R ГЦБ от водоцементного отношения $(B/Ц)$ (а) и водовяжущего отношения $(B/(Ц+Б))$ (б)

На рис. 2 приведена зависимость изменения величины прочности на сжатие образца ГЦБ от значения отношения цемент/бентонит в используемых рецептурах.

График зависимости $R(Ц/Б)$, представленный на рис. 2, также построен на основе анализа 38 рецептур составов ГЦБ, используемых в гидротехническом строительстве (см. табл. 1). Для получения зависимости $R(Ц/Б)$ из анализа исключены пять точек (показанных на графике красным цветом) из-за их значительного разброса относительно множества остальных точек. Тем не менее, корреляционная связь слабая или практически отсутствует (коэффициент корреляции $r < 0,5$).

Линейное уравнение регрессии имеет вид: $y = 0,5096x + 0,5009$. Как видно из графика, приведенного на рис. 2, при увеличении значения отношения цемент/бентонит растет значение величины прочности на сжатие ГЦБ.

Рис. 2. Зависимость прочности на сжатие R ГЦБ от отношения цемент/бентонит (Ц/Б)

На рис. 3 приведена зависимость модуля деформации образцов ГЦБ от значения водоцементного и водовязующего отношений в используемых рецептурах.

Рис. 3. Зависимость модуля деформации от водоцементного (a) и водовязующего ($б$) отношений

Для определения зависимости модуля деформации E от водоцементного (В/Ц) и водовяжущего (В/(Ц+Б)) отношений на основе анализа 13 рецептов составов ГЦБ, используемых в гидротехническом строительстве (см. табл. 1), построены графики зависимостей $E(\text{В/Ц})$, $E(\text{В/(Ц+Б)})$. В качестве аппроксимирующей функции выбрана степенная (вида $y = axb$). Для $E(\text{В/Ц})$ коэффициент корреляции составил $r = 0,68$ (средняя корреляционная связь). Однако объемы имеющихся данных являются недостаточными для выполнения статистического анализа, поскольку требуется не менее 30 элементов ряда, тогда как мы имеем только 13. Недостаточное для выполнения статистического анализа количество исходных данных обусловлено тем, что в открытых источниках публикуется мало материалов о характеристиках ГЦБ.

Графики зависимостей $E(\text{В/Ц})$ и $E(\text{В/(Ц+Б)})$ имеют вид гиперболы, из чего следует, что увеличение значения водоцементного (В/Ц) и водовяжущего (В/(Ц+Б)) отношений приводит к монотонному уменьшению величины модуля деформации ГЦБ. Однако для подтверждения достоверности такого прогноза необходимо дополнительное количество исходных данных.

Основываясь на результатах выполненного анализа данных по составам смесей ГЦБ, можно прийти к заключению о том, что прочность ГЦБ в первую очередь зависит от водоцементного отношения и количества используемого в составе смеси цемента.

Результаты проведенного анализа влияния компонентов рецептуры ГЦБ на его характеристики сведены в табл. 2, которая представляет собой перечень факторов, влияющих на параметры ГЦБ. При изменении долевого соотношения компонентов состава ГЦБ и использовании тех или иных добавок для приготовления смеси можно изменять характеристики ГЦБ.

Табл. 2. Факторы, влияющие на характеристики ГЦБ

Требуемый результат	Физический смысл	Управляющее воздействие	Примечания
Ведение работ при отрицательной температуре	Снижение температуры замерзания воды	Введение в состав смеси противоморозной добавки (чаще всего, каменной соли NaCl)	Использование соли при несоблюдении технологии производства работ или нарушении рецептуры состава может привести к коагуляции бентонитовой глины и снижению прочностных характеристик ГЦБ
Понижение вязкости глинистого раствора, ускорение твердения ГЦБ	Снижение свободной энергии на границе контактирующих фаз	Введение в состав смеси пластификаторов, в частности ЛСТ	При использовании максимальных дозировок ЛСТ схватывание смеси замедляется. Из-за передозировки добавки пластификатора может возникнуть расслоение смеси ГЦБ

Требуемый результат	Физический смысл	Управляющее воздействие	Примечания
Обеспечение стабильности и подвижности смеси ГЦБ. Предотвращение образования микротрещин	Предотвращение растроотделения и водоотделения. Равномерное распределение раствора	Изменение В/Ц отношения. Использование пластификаторов, в частности ЛСТ	При использовании ЛСТ смесь дольше сохраняется при транспортировке. Добавка пластификатора позволяет регулировать сроки схватывания
Обеспечение заданного значения прочности на сжатие	Обеспечение способности материала ГЦБ сопротивляться разрушению от действия внутренних напряжений, возникающих под действием внешней нагрузки или других факторов	Изменение В/Ц. Использование дополнительного количества цемента в рецептуре состава. Использование пластификаторов, в частности ЛСТ. Изменение состава заполнителя	
Предотвращение трещино-образования	Снижение и перераспределение внутренних напряжений	Использование микрофибры в составе ГЦБ	Микрофибра формирует устойчивую матрицу ГЦБ систем

Выводы. Изменение количественного содержания одного или нескольких компонентов состава рецептуры смесей ГЦБ позволяет обеспечить управляемость физико-механическими характеристиками ПФЭ, что является важным преимуществом ГЦБ.

Выполненный анализ влияния рецептур ГЦБ на его физико-механические свойства может быть использован для подбора оптимального состава ГЦБ для решения конкретных гидротехнических задач.

Увеличение значения водоцементного отношения (В/Ц) и водовяжущего отношения (В/(Ц+Б)) приводит к монотонному уменьшению прочности на сжатие R ГЦБ и модуля деформации E ГЦБ. При увеличении значения отношения цемент/бентонит растет значение величины прочности на сжатие R ГЦБ.

Библиографический список

1. Радченко В.Г., Лопатина М.Г., Николайчук Е.В., Радченко С.В. Опыт возведения противофильтрационных устройств из грунтоцементных смесей // Гидротехническое строительство. 2012. № 6. С. 46–54.
2. Королёв В.М., Смирнов О.Е., Аргал Э.С., Радзинский А.В. Новое в создании противофильтрационного элемента в теле грунтовой плотины // Гидротехническое строительство. 2013. № 8. С. 2–9.

3. Зубков Б.М., Перлей Е.М., Раюк В.Ф. Подземные сооружения, возводимые способом «стена в грунте» / под ред. Б.М. Зубкова. Л. : Стройиздат, 1977. 466 с.
4. Федосеев В.И., Шишов И.Н., Пехтин В.А., Кривоногова Н.Ф., Каган А.А. Противофильтрационные завесы гидротехнических сооружений на многолетней мерзлоте. Опыт проектирования и производства работ : в 2-х тт. СПб. : ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2009. Т. 2. С. 303–316.
5. Ганичев И.А., Мецераков А.Н., Хейфец В.Б. Новые способы устройства противофильтрационных завес // Гидротехническое строительство. 1961. № 2. С. 14–18.
6. Круглицкий Н.Н., Мильковский С.И., Шейнблум В.М. Траншейные стенки в грунтах. Киев : Наукова Думка, 1973. 304 с.
7. Насонов И.Д., Федюкин В.А., Шуплик М.Н., Ресин В.И. Технология строительства подземных сооружений. Специальные способы строительства. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Недра, 1992. С. 32–59. (Высшее образование)
8. Смородинов М.И., Федоров В.С. Устройство сооружений и фундаментов способом «стена в грунте». 2-е изд., перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1986. 216 с.
9. Филатов А.Л., Сапрыкин Л.Д., Ткаченко Р.Н. Строительство заглубленных сооружений методом «стена в грунте» // Строительство подземных сооружений методом «стена в грунте» / сост. Лазаревичус Г.-Вильнюс. 1978. 43 с.
10. Траншейные стенки в гидротехническом строительстве / сост. П.Ф. Собколов. М., 1981. № 2. 51 с.
11. Мальшиев Л.И., Шишов И.Н., Кудрин К.П., Бардюков В.Г. Технические решения и результаты первоочередных работ по сооружению противофильтрационной стены в грунте в ядре и основании плотины Курейской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2001. № 3.
12. Мальшиев Л.И., Рассказов Л.Н., Солдатов П.В. Состояние плотины Курейской ГЭС и технические решения по ее ремонту // Гидротехническое строительство. 1999. № 1. С. 31–36.
13. Мецераков А.Н., Хейфец В.Б. Противофильтрационные и несущие стенки в грунте. М. : Энергия, 1969. Вып. 10. 96 с. (Библиотека гидротехника и гидроэнергетика)
14. Рассказов Л.Н., Радзинский А.В., Саинов М.П. Прочность и деформативность глиноцементобетона в сложном напряженном состоянии // Гидротехническое строительство. 2014. № 8. С. 29–33.
15. Саинов М.П. Определение нагрузки на буробетонную сваю противофильтрационного элемента плотины // Сборник научных работ молодых ученых факультета гидротехнического и специального строительства. М. : МГСУ, 2000. Вып. 1. С. 50–55.
16. Рассказов Л.Н., Радзинский А.В., Саинов М.П. Плотины с глиноцементобетонной диафрагмой : напряженно-деформированное состояние и прочность // Гидротехническое строительство. 2014. № 9. С. 37–44.
17. Саинов М.П. Напряженно-деформированное состояние противофильтрационных «стен в грунте» грунтовых плотин : автореф. дисс. ... канд. тех. наук. М., 2001. 19 с.
18. Радзинский А.В., Рассказов Л.Н., Саинов М.П. Плотина стометровой высоты с глиноцементобетонной диафрагмой по типу «стена в грунте» // Вестник МГСУ. 2014. № 9. С. 106–115.
19. Кудрин К.П., Королев В.М., Аргал Э.С., Соловьева Е.В., Смирнов О.Е., Радзинский А.В. Использование инновационных решений при создании противофильтрационной диафрагмы в перемычке Нижнебурейской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2014. № 7. С. 22–28.
20. Рассказов Л.Н., Радзинский А.В., Саинов М.П. К прочности глиноцементобетона // Гидротехническое строительство. 2014. № 8. С. 26–28.

21. Рассказов Л.Н., Радзинский А.В., Саинов М.П. Выбор состава глиноцементобетона при создании «стены в грунте» // Гидротехническое строительство. 2014. № 3. С. 16–23.

22. Дерюгин Л.М. Свойства бентонито-цементных литых бетонов для конструкций типа «стена в грунте» из буросекущих свай // Гидротехническое строительство. 2008. № 4. С. 16–18.

Поступила в редакцию в августе 2016 г.

Об авторах: **Сольский Станислав Викторович** — доктор технических наук, заведующий отделом «Основания, грунтовые и подземные сооружения», **Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева» (АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»)**, 195220, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 21, solskiysv@vniig.ru;

Легина Екатерина Евгеньевна — старший научный сотрудник, **Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева» (АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»)**, 195220, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 21, leginaee@vniig.ru;

Орищук Роман Николаевич — генеральный директор, **Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева» (АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»)**, 195220, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 21, orishchukrn@vniig.ru;

Васильева Зоя Геннадьевна — ведущий инженер, **Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева» (АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»)**, 195220, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 21, vasiljevazg@vniig.ru;

Величко Алексей Сергеевич — инженер, **Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева» (АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»)**, 195220, г. Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 21, aleksej.velichko.26@mail.ru.

Для цитирования: *Сольский С.В., Легина Е.Е., Орищук Р.Н., Васильева З.Г., Величко А.С. Анализ влияния компонентов глиноцементобетона на его характеристики // Вестник МГСУ. 2016. № 10. С. 80–93. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.10.80-93*

S.V. Sol'skiy, E.E. Legina, R.N. Orishchuk, Z.G. Vasil'eva, A.S. Velichko

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF CLAY CEMENT CONCRETE COMPONENTS ON ITS CHARACTERISTICS

Abstract. A sustained pace of construction of dams and dikes using water resources and intensive development of underground space in the construction of buildings and structures require ensuring anti-seepage measures. For efficient stoppage of fluid flow a variety of methods are applied such as cement and grout curtains, teeth, core walls including ones made of soil-cement mixtures performed by the method of diaphragm wall. The following characteristics are the main selection criteria of the material composition for a diaphragm wall : permeability, strength, deformability, efficiency. Clay-cement-concrete (CCC) is one of the materials satisfying all the above characteristics.

The influence of the components used to prepare CCC mixtures on its strength and deformation characteristics was the main objective of the performed study. In order to solve the task, the formulas of CCC used at the objects of hydroengineering construction have been considered.

For analyzing the influence of the components of CCC on its characteristics, the dependences of compression strength and deformation modulus of CCC on water-cement and water-astringent ratios have been built. The dependence of compression strength of CCC on the cement/bentonite ratio was built as well.

The analysis of the dependences defined that the compression strength of CCC depends primarily on water-cement ratio and the amount of cement used in the composition. The increase in the value of water-cement ratio and water-astringent ratio leads to monotone decrease of the compression strength of CCC and the deformation modulus of CCC.

Change of the quantitative content of one or more components of CCC composition allows controlling physical-mechanical characteristics of the anti-seepage element which is an important advantage of clay-cement-concrete.

The performed analysis of the influence of CCC formula on its physical and mechanical properties can be used to select the optimal composition of CCC when solving specific hydroengineering tasks.

Key words: clay-cement-concrete (CCC), CCC components, bored-secant piles, stress-strain state, deformation modulus, compression strength

References

1. Radchenko V.G., Lopatina M.G., Nikolaychuk E.V., Radchenko S.V. Opyt vozvedeniya protivofil'tratsionnykh ustroystv iz gruntotsementnykh smesey [Method of Construction of Water Seals from Soil-Cement Mixtures]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2012, no. 6, pp. 46–54. (In Russian)
2. Korolev V.M., Smirnov O.E., Argal E.S., Radzinskiy A.V. Novoe v sozdanii protivofil'tratsionnogo elementa v tele gruntovoy plotiny [The New in the Creation of Grout Element in a Soil Dam]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2013, no. 8, pp. 2–9. (In Russian)
3. Zubkov B.M., Perley E.M., Rayuk V.F. *Podzemnye sooruzheniya, vozvodimye sposobom «stena v grunte»* [Underground Structures Constructed Using Diaphragm Wall Method]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1977, 466 p. (In Russian)
4. Fedoseev V.I., Shishov I.N., Pekhtin V.A., Krivonogova N.F., Kagan A.A. *Protivofil'tratsionnye zavesy gidrotekhnicheskikh sooruzheniy na mnogoletney merzloste. Opyt proektirovaniya i proizvodstva rabot* [Curtain Grouting of Hydraulic Structures in Eternal Frost Areas]. In 2 volumes. Saint Petersburg, VNIIG im. B.E. Vedeneeva Publ., 2009, vol. 2, pp. 303–316. (In Russian)
5. Ganichev I.A., Meshcheryakov A.N., Kheyfets V.B. Novye sposoby ustroystva protivofil'tratsionnykh zaves [New Ways of Arranging Curtain Grouting]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 1961, no. 2, pp. 14–18. (In Russian)
6. Kruglitskiy H.H., Mil'kovskiy S.I., Sheynblyum V.M. *Transheyne stenki v gruntakh* [Trench Walls in Soils]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1973, 304 p. (In Russian)
7. Nasonov I.D., Fedyukin V.A., Shuplik M.N., Resin V.I. *Tekhnologiya stroitel'stva podzemnykh sooruzheniy. Spetsial'nye sposoby stroitel'stva* [Construction Technology for Underground Structures. Special Construction Methods]. 2nd edition, revised and enlarged. Moscow, Nedra Publ., 1992, pp. 32–59. (Vysshee obrazovanie [Higher Education]) (In Russian)
8. Smorodinov M.I., Fedorov B.C. *Ustroystvo sooruzheniy i fundamentov sposobom «stena v grunte»* [Construction of Structures and Foundations Using the Diaphragm Wall Method]. 2nd edition, revised and enlarged. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986, 216 p. (In Russian)
9. Filatov A.L., Saprykin L.D., Tkachenko R.N. Stroitel'stvo zaglublennykh sooruzheniy metodom «stena v grunte» [Construction of Buried Structures Using the Diaphragm Wall Method]. Stroitel'stvo podzemnykh sooruzheniy metodom «stena v grunte» [Construction of Underground Structures Using the Diaphragm Wall Method]. Vilnius, 1978, 43 p. (In Russian)
10. Sobkolov P.F., editor. *Transheyne stenki v gidrotekhnicheskoy stroitel'stve* [Trench Walls in Hydraulic Engineering]. Moscow, 1981, no. 2, 51 p. (In Russian)

11. Malyshev L.I., Shishov I.N., Kudrin K.P., Bardukov V.G. Tekhnicheskie resheniya i rezul'taty pervoocherednykh rabot po sooruzheniyu protivofil'tratsionnoy steny v grunte v yadre i osnovanii plotiny Kureyskoy GES [Technical Solutions and Results of Top-Priority Works on Construction of Grout Diaphragm Wall in the Core and Foundation of Kureyskaya HPP Dam]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2001, no. 3. (In Russian)
12. Malyshev L.I., Rasskazov L.N., Soldatov P.V. Sostoyanie plotiny Kureyskoy GES i tekhnicheskie resheniya po ee remontu [The State of the Kureyskaya HPP Dam and Technical Solutions on its Repair]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 1999, no. 1, pp. 31–36. (In Russian)
13. Meshcheryakov A.N., Kheyfets V.B. *Protivofil'tratsionnye i nesushchie stenki v grunte* [Grout and Bearing Diaphragm Walls]. Moscow, Energiya Publ., 1969, no. 10, 96 p. (Biblioteka gidrotekhnika i gidroenergetika [Library of Hydrotechnologist and Hydraulic Power Engineer]) (In Russian)
14. Rasskazov L.N., Radzinskiy A.V., Sainov M.P. Prochnost' i deformativnost' glinotsementobetona v slozhnom napryazhennom sostoyanii [Strength and Deformability of Clay Cement Concrete in Complicated Stress State]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2014, no. 8, pp. 29–33. (In Russian)
15. Sainov M.P. Opredelenie nagruzki na burobetonnuyu svayu protivofil'tratsionnogo elementa plotiny [Determining the Load on Drilling-Concrete Pile of a Dam Grout Element]. *Sbornik nauchnykh rabot molodykh uchenykh fakul'teta gidrotekhnicheskogo i spetsial'nogo stroitel'stva* [Collection of Scientific Works of Young Scientists of the Department of Hydraulic and Special Construction]. Moscow, MGSU Publ., 2000, no. 1, pp. 50–55. (In Russian)
16. Rasskazov L.N., Radzinskiy A.V., Sainov M.P. Plotiny s glinotsementobetonnoy diafragmoy : napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie i prochnost' [Dams with Clay Cement Concrete Diaphragm : Stress-Strain State and Strength]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2014, no. 9, pp. 37–44. (In Russian)
17. Sainov M.P. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie protivofil'tratsionnykh «sten v grunte» gruntovykh plotin : avtoreferat dissertatsii kandidata tekhnicheskikh nauk* [Stress-Strain State of Grout Diaphragm Walls of Soil Dams : Abstract of the Dissertation of the Candidate of Technical Sciences]. Moscow, 2001, 19 p. (In Russian)
18. Radzinskiy A.V., Rasskazov L.N., Sainov M.P. Plotina stometrovoy vysoty s glinotsementobetonnoy diafragmoy po tipu «stena v grunte» [Clay-Cement Concrete Diaphragm of the Type «Slurry Wall» in the 100 Meter High Dam]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 9, pp. 106–115. (In Russian)
19. Kudrin K.P., Korolev V.M., Argal E.S., Solov'eva E.V., Smirnov O.E., Radzinskiy A.V. Ispol'zovanie innovatsionnykh resheniy pri sozdani protivofil'tratsionnoy diafragmy v peremylke Nizhnebureyskoy GES [Use of Innovative Solutions when Creating Grout Diaphragm in a Dike of Nizhnebureyskaya HPP]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2014, no. 7, pp. 22–28. (In Russian)
20. Rasskazov L.N., Radzinskiy A.V., Sainov M.P. K prochnosti glinotsementobetona [To the Strength of Clay Cement Concrete]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2014, no. 8, pp. 26–28. (In Russian)
21. Rasskazov L.N., Radzinskiy A.V., Sainov M.P. Vybora sostava glinotsementobetona pri sozdani «sten v grunte» [Choosing Clay Cement Concrete Composition when Constructing a Diaphragm Wall]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2014, no. 3, pp. 16–23. (In Russian)
22. Deryugin L.M. Svoystva bentonito-tsementnykh litykh betonov dlya konstruktsiy tipa «stena v grunte» iz burosekushchikh svay [Features of Bentonite-Concrete Casting Concrete for Structures of Diaphragm Wall Type of Bored-Secant Piles]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydrotechnical Construction]. 2008, no. 4, pp. 16–18. (In Russian)

About the authors: **Sol'skiy Stanislav Viktorovich** — Doctor of Technical Sciences, head, Department of Bases, Soil and Underground Structures, **B.E. Vedenev All Russia Institute of Hydraulic Engineering (B.E. Vedenev VNIIG)**, Saint Petersburg, 21 Gzhatskaya str., Saint Petersburg, 195220, Russian Federation; solskiysv@vniig.ru;

Legina Ekaterina Evgen'evna — senior research worker, **B.E. Vedeneev All Russia Institute of Hydraulic Engineering (B.E. Vedeneev VNIIG)**, Saint Petersburg, 21 Gzhatskaya str., Saint Petersburg, 195220, Russian Federation; leginaee@vniig.ru;

Orishchuk Roman Nikolaevich — Director General, **B.E. Vedeneev All Russia Institute of Hydraulic Engineering (B.E. Vedeneev VNIIG)**, Saint Petersburg, 21 Gzhatskaya str., Saint Petersburg, 195220, Russian Federation; orischukrn@vniig.ru;

Vasil'eva Zoya Gennad'evna — senior engineer, **B.E. Vedeneev All Russia Institute of Hydraulic Engineering (B.E. Vedeneev VNIIG)**, Saint Petersburg, 21 Gzhatskaya str., Saint Petersburg, 195220, Russian Federation; vasiljevazg@vniig.ru;

Velichko Aleksey Sergeevich — engineer, **B.E. Vedeneev All Russia Institute of Hydraulic Engineering (B.E. Vedeneev VNIIG)**, Saint Petersburg, 21 Gzhatskaya str., Saint Petersburg, 195220, Russian Federation; aleksej.velichko.26@mail.ru.

For citation: Sol'skiy S.V., Legina E.E., Orishchuk R.N., Vasil'eva Z.G., Velichko A.S. Analiz vliyaniya komponentov glinotsementobetona na ego kharakteristiki [Analysis of the Influence of Clay Cement Concrete Components on Its Characteristics]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016, no. 10, pp. 80–93. (In Russian) DOI: 10.22227/1997-0935.2016.10.80-93