

МОНСЕФ БЕЛАИД

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УКАТАННОГО БЕТОНА И ГРУНТОЦЕМЕНТА
В ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ
ТУНИСА**

Специальность – 05.23.07 – Гидротехническое строительство

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

**Санкт-Петербург
2001**

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном техническом университете

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор *А.Л. Гольдин*

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

И.Б.Соколов

кандидат технических наук

В.М.Бертов

Ведущая организация – ОАО "Ленгидропроект"

Защита состоится «_____» _____ 2002 г. в _____ часов
на заседании диссертационного совета Д 212.229.15 при СПбГТУ
по адресу: 195251 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГТУ
Гидрокорпус – II, ауд. 411

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
СПбГТУ

Автореферат разослан «_____» _____ 2002 ____ г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.т.н., проф.

А.Е.Андреев

Общая характеристика работы

Актуальность темы

После получения независимости Тунис проводит политику мобилизации водных ресурсов. Несмотря на континентальный климат, Тунис остается одной из немногих стран средиземноморского бассейна, которые не вводят ограничений на использование воды. Разработана программа освоения водных ресурсов страны на 1990-2011 годы. Планируется до 2004 года строительство 21 больших, 203 средних и 1000 малых гидроузлов.

В результате реализации этого плана будет достигнуто:

- ❖ Удовлетворение растущих потребностей населения, промышленности и сельского хозяйства в воде.
- ❖ Повышение запасов воды и предотвращение засоления грунтовых вод, вызванное интенсивной эксплуатацией подземных горизонтов.
- ❖ Защита территории от паводков.
- ❖ И как следствие всего вышесказанного, закрепление сельского населения на орошаемых землях.

Выполнение этой программы потребует больших капиталовложений, что является основным препятствием для ее реализаций.

В последние годы во многих странах отмечается широкий интерес к проблеме возведения гидротехнических и других массивных сооружений из укатанного бетона, представляющего собой жесткую бетонную смесь с пониженным содержанием цемента и воды, уплотняемую вибрационными катками. Применение для транспортировки, укладки и уплотнения укатанного бетона высокоэффективного оборудования, используемого для возведения грунтовых сооружений, позволяет существенно сократить стоимость и продолжительность возведения плотин, перемычек, фундаментов, автодорог по сравнению с такими же сооружениями из вибрированного бетона.

Использование укатанного бетона позволяет повысить прочность и водонепроницаемость плотин; значительно уменьшить объем сооружения, отказаться от устройства обязательных для грунтовых плотин водонепроницаемых элементов (ядра, экрана, диафрагмы); снизить эксплуатационные расходы, улучшить компоновку сооружений гидроузла. С другой стороны, дает возможности избавить массивные бетонные сооружения от их основного недостатка – неблагоприятного термонапряженного состояния за счет резкого снижения количества цемента в бетоне.

Существенное сокращение расхода цемента в укатанном бетоне предопределяет малый экзотермический разогрев и усадку, что приводит к увеличению плановых размеров блоков плотины и темпов роста ее по высоте, уменьшению потребности в опалубке, исключению дорогостоящих работ по регулированию температурного режима бетонной кладки.

Опыт применения укатанного бетона и, в частности, грунтоцемента, в Тунисе показывает, что использование нового материала и технологии его

укладки позволяет резко сократить трудоемкость, сроки строительства и снизить стоимость гидроузлов.

В настоящее время, применение укатанного бетона должно быть обязательно рассмотрено как один из вариантов при разработке проекта плотины.

Целью данной работы является всестороннее изучение в лабораторных и полевых условиях физико-механических свойств и технологии приготовления грунтоцементов и укатанных бетонов применительно к гидротехническому строительству в Тунисе с учетом специфики природных грунтовых материалов; выбор оптимальных составов заполнителей для повышения прочности и понижения проницаемости грунтоцементов; отработка способов получения прочных и малопроницаемых швов в теле плотин из укатанного бетона.

Научная новизна

Впервые в Тунисе выполнены комплексные исследования для приготовления грунтоцемента:

1. выполнен анализ зернового состава аллювия, установлено число фракций, максимальный и минимальных размер заполнителя, которые могут быть использованы для приготовления грунтоцемента;

2. исследовано влияния грансостава заполнителя на прочностные и деформационные свойства грунтоцемента (зависимость модулей упругости и деформации от процентного содержания в материале фракции 0-5 и 5-40 мм);

3. выявлено влияние содержания в материале фракции 0-5 и 5-40 мм и количества цемента на фильтрационные характеристики грунтоцемента;

4. определена оптимальная влажность и ее влияние на прочность грунтоцемента при сжатии.

Проведены исследования дробленых и отсортированных материалов из карьеров для приготовления укатанного бетона.

1. Изучено влияние типа песка (окатанный или дробленый) на прочность при сжатии для укатанного бетона различного возрасте (28-90 дней).

2. Расчетными методами определены оптимальные зерновые составы, которые позволяют получить максимальную плотности укатанного бетона.

3. Исследовано влияние количества цемента на максимальную плотность во влажном состоянии и сроков выдерживания на прочность образцов.

4. Проведен анализ эмпирической формулы расчета прочности для укатанного бетон

5. Изучена фильтрация в контактных швах укатанного бетон при различных методах их подготовки.

Практическая ценность

На основе проведенных исследования рекомендованы к применению новые материалы (грунтоцемент и укатанный бетон) с использованием

естественных аллювиальных отложений или дробленых и отсортированных материалов из карьера. Определены основные параметры укатанного бетона в зависимости от основных факторов и технологии производства работ.

Разработанные рекомендации использованы при строительстве плотин Фум-Ханга и Рмил.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пять глав, заключения, списка литературы и приложений; содержит 85 страниц текста, 24 рисунка, 35 таблиц.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели исследований, приводится краткое содержание работы и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации рассматривается опыт применения укатанного бетона в практике гидротехнического строительства: история вопроса, основные преимущества, конструкции плотин, технология укладки и особенности укатанного бетона.

За последние 20 лет строительство плотин из укатанного бетона получило широкое распространение в США, Японии, Китае, Пакистане, Канада, Австралии, Индии, Странах Европы, Африки, Центральной и Южной Америки.

Описание возведения плотин из укатанного бетона и исследования его свойств содержатся в трудах Berkani A., Bokyge B., Dunstan M., Johnson J., Hirose T., Holligworth F., Hooper D.J., Kokubu M., Langois A., Lino M., Londe P., Lowe J., Shen C., Simada S., Shimizu S., Vanagida T., Wang B и др.

В России (СССР) изучение особо жестких, малоцементных, укатанных бетонов проводятся с 1975 года. Комплексные исследования были выполнены на специальных полигонах Курпсайской, Ташкумырской, Бурейской, Саяно-Шушенской ГЭС, гидроузле Котешвар в Индии. С 1985 года укатанный бетон укладывался в подпорные и водосливные стенки Бурейской и Курейской ГЭС; русловую, высотой 75м, и левобережную плотины Ташкумырской ГЭС; из укатанного бетона по российскому проекту строится 110 метровая плотина гидроузла Капанда в Анголе.

Проблемами строительства плотин из укатанного бетона в России (СССР) занимались К.А.Аниканов, В.М.Бертов, Е.П.Дерюгин, С.М.Гинзбург, Б.М.Ерахтин, О.М.Зальцман, М.А.Картелева, Е.А.Коган, Г.К.Симаков, В.И.Сильницкий, В.Б.Судаков, Г.П.Суханкин, Л.А.Толкачев, В.С.Шангин и др.

Факторами, определяющими преимущество плотин из укатанного бетона перед плотинами, из вибрированного бетона, возводимыми по традиционной технологии, являются:

- резкое уменьшение расхода цемента;
- высокие темпы производства работы и сокращение сроков строительства;

- отказ от разрезки бетонного массива плотины на небольшие секции и блоки, что резко снижает объем опалубочных работ, упрощает производство работ;

- отказ от охлаждения компонентов бетонной смеси, что позволяет отказаться

от оборудования по охлаждению и сопутствующих конструкции;

- отказ от трубного охлаждения бетона и последующей цементации швов.

Факторы, определяющие преимущества плотин из укатанного бетона перед грунтовыми и набросными.

- Обжатый профиль плотины из укатанного бетона сокращает объемы работ.

- Исключение противофильтрационных элементов в теле плотины.

- Возможность размещения водослива в теле плотины, что уменьшает габариты сооружений.

- Отказ от обводного туннеля для пропуска расходов реки в период строительства.

Во второй главе приводятся результаты исследования влияния зернового состава заполнителя на физические показатели грунтоцемента.

Проблемы, связанные с производством бетонных работ в жаркую и морозную пору, менее остры для укатанного бетона, чем для традиционного, из-за уменьшения содержания цемента и воды в бетонной смеси и используемых методов ее транспортировки, укладки и уплотнения.

Опыты проводились на гидроузле Фум- Ханга, расположенном на юге Туниса. При строительстве объекта использовались естественные аллювиальные отложения. Главная цель гидроузла Фум- Ханга создание водохранилища для удержания паводковых вод и пополнение запасов подземных вод. Были выбраны аллювиальные отложения, у которых гранулометрический состав находится в следующих пределах: фракций проходящих через сито 80 мкм - 8 % , фракций проходящих через сито 5 мм - 53 % , (5-60) мм - 37 %.

Исследования состава грунтоцемента в лабораторных условиях

Определение оптимальной влажности

- Исследования состава без цемента

Оптимальная влажность определяется в лабораторных условиях по методу модифицированного Проктора. В опытах используются цилиндрические приборы диаметром 15,24 см и высотой 30,34 см при максимальной крупности заполнителя 40 мм. Смесь уплотняется в шесть слоев под грузом массой 4,5 кг, каждый из слоев уплотняется 25 ударами.

Оптимальная влажность выбирается в зависимости от максимальной плотности.

Кривая зависимости плотности от влажности получается сравнительно плоской из-за большого количества песка (рис. 1).

Как показали экспериментальные исследования, оптимальная влажность равна 3,44 %. При этом удастся получить максимальную плотность материала до 1,96 т/м³.

Таблица 1

Влажность, %	2	2,5	3	3,44	4	5
Плотность, т/м ³	1,86	1,88	1,94	1,96	1,93	1,89

- Определение оптимальной влажности по Проктору с дозировкой цемента 80 кг/м³

Определялись значения оптимальной влажности, при которой имеет место максимальная плотность грунтоцемента. Как показали экспериментальные исследования, оптимальная влажность (рис. 2) лежит в пределах 6-7%. При этом удастся получить плотность материала 2,30 т/м³.

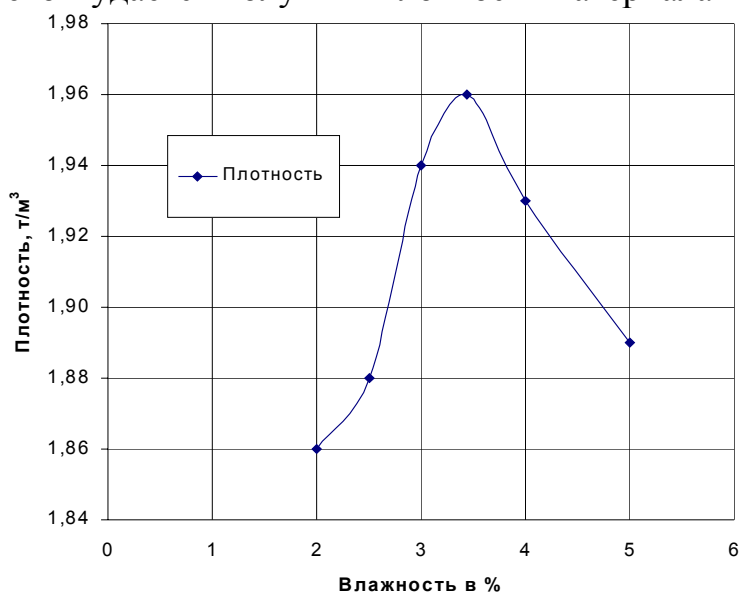


Рис.1. Определение оптимальной влажности по Проктору, образцы без цемента

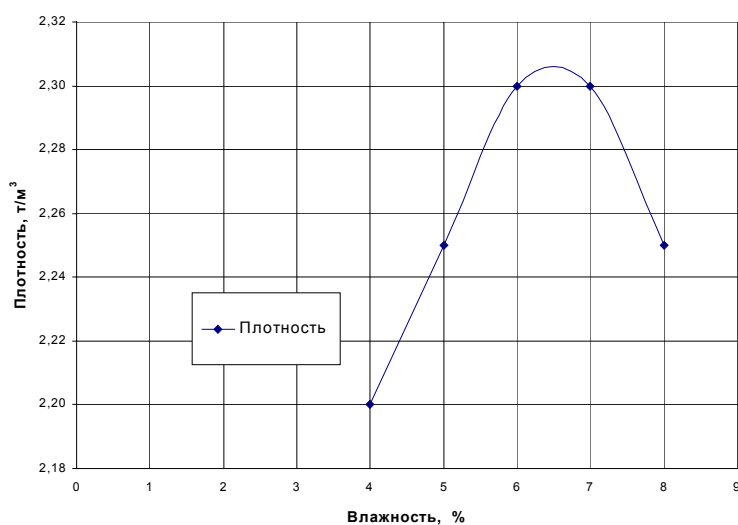
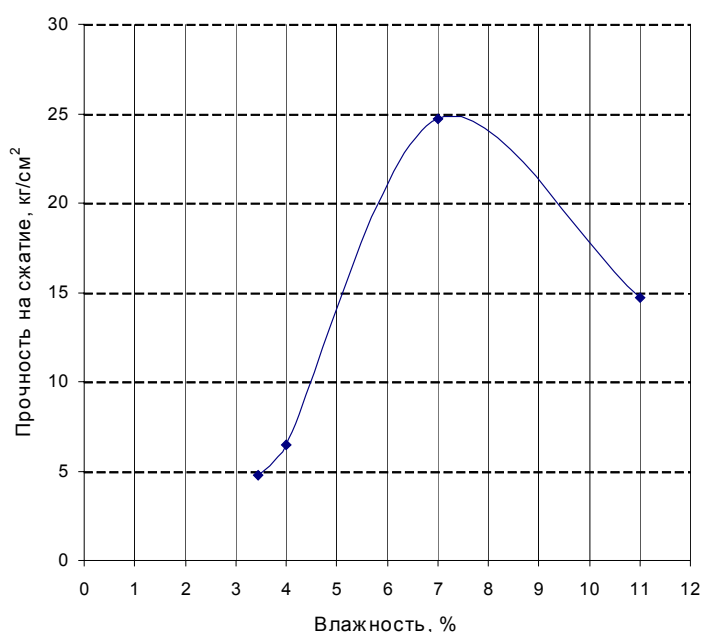


Рис.2. Определение оптимальной влажности по Проктору с дозировкой цемента 80 кг/м³

Таблица 2

Влажность, %	4	5	6	7	8
Плотность во влажном состоянии, т/м ³	2,20	2,25	2,30	2,30	2,25

- Оценка оптимальной влажности для получения максимальной прочности грунтоцемента на сжатие с дозировкой цемента 80кг/м³ (рис .3)

Рис.3. Прочность на сжатие через 7 дней кг/см²

Опытные образцы (16.32) см были приготовлены в приборах Проктора. Грунтоцемент с дозировкой 80 кг цемента на 1 м³ уложен в два слоя при уплотнении каждого 25-ю ударами, затем помещен в течение 90 сек на вибростол под нагрузкой 13 кг. Образцы были приготовлены при разном значении влажности для определения оптимальной влажности, при которой имеет место максимальная прочность. Образцы сохранялись под специальной защитой, чтобы избежать переувлажнения или высыхания. Через 7 дней были проведены опыты на прессе. Опыты показали, что оптимальная влажность составляет 7%. Максимальная прочность на сжатие грунтоцемента 24,85 кг/см² при содержании цемента 80 кг/ м³.

Таблица .3

Влажность, %	3,44	4	7	11
Прочность на сжатие через 7 дней, кг/см ²	4,80	6,50	24,86	14,71

Можно сделать вывод о том, что существует связь между консистенцией и сопротивлением на сжатие. Эта связь определена экспериментальным путем в лаборатории для грунтоцемента плотности Фум

Ханга, отклонение содержания воды от оптимального значения вызывает резкое снижение прочности.

В третьей главе рассматриваются исследования физико-механических и фильтрационных свойств грунтоцемента.

Изучение физико-механических свойств грунтоцемента проводилось применительно к материалам природных карьеров гидроузла на реке Фум-Ханга с гравитационной плотиной из грунтоцемента высотой 27м, состоящей из глухой и водосливной частей. Исследовались прочностные, деформационные и фильтрационные свойства грунтоцемента в зависимости от содержания цемента и фракционного состава заполнителя.

Опытные образцы (16.32) см были приготовлены по стандартной методике. Грунтоцемент с дозировкой 100 кг цемента на 1 м³ уложен в два слоя, при уплотнении каждого 25-ю ударами, затем помещен в течение 90 с на вибростол под нагрузкой 13 кг. Образцы сохранялись под защитой, чтобы избежать переувлажнения или высыхания, через 28 дней были проведены опыты на прессе с постоянной скоростью приложения нагрузки.

Исследование деформационных свойств грунтоцемента проводилось с целью определению зависимости модулей упругости и деформации от процентного содержания в материале фракции 0-5 и 5-40 мм. Одновременно определялась и прочность образцов в возрасте 28 дней. Опыты проводились на образцах четырех разновидностей материала, в которых содержание фракции 0-5 мм (мелкозема) составляло 25,35,45 и 55% от веса заполнителя и заданная содержанием двух других фракции (5-20) и (20-40) мм, содержание цемента было постоянным 100 кг/ м³, влажность 7%.

Полученная в результате этих опытов связь между нагрузкой и осадкой штампа свидетельствует о том, что грунтоцемент ведет себя как нелинейно упругое тело. По всей видимости, при разгрузке образцов имела бы место остаточная (пластическая) составляющая.

При рассмотрении кривых зависимостей «напряжения – перемещения» σ – u (рис. 4), полученных для разных образцов, можно констатировать, что они состоят из двух участков:

- первый прямолинеен, соответствует линейным упругим деформациям грунтоцемента,
- второй соответствует нелинейной связи σ – u .

Модуль упругости E_y при сжатии определялся по формуле:

$$E_y = \sigma/\varepsilon,$$

где E_y – модуль упругости,

ε – относительная деформация, соответствующая данному напряжению σ .

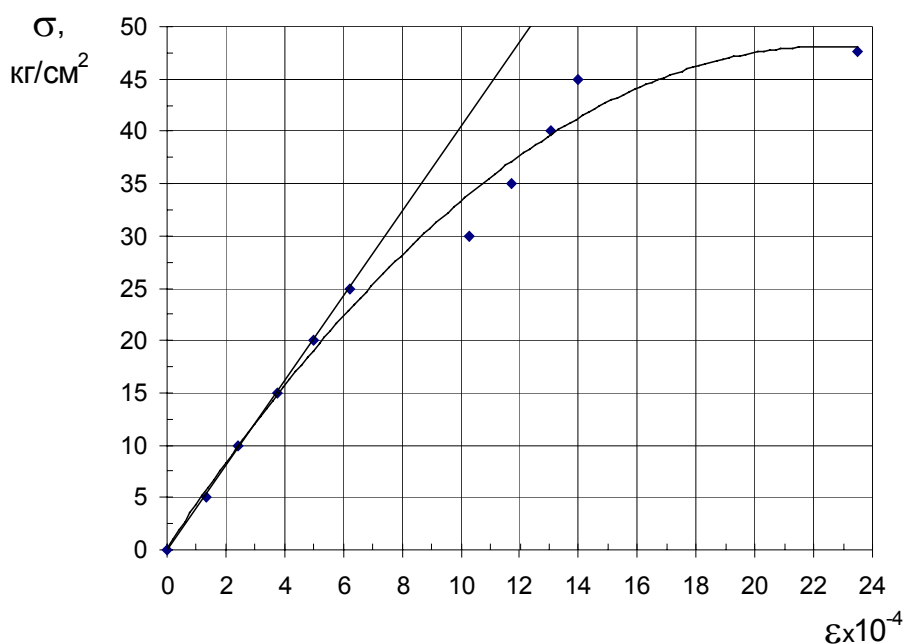


Рис.4. Кривая связи напряжений и деформаций (мелкозем 45%)

Полученные при испытании образцов результаты сведены в таблицу 4.

Таблица 4

N п/ п	Содержание цемента кг/м ³	Влаж- ность %	Содержание фракции		Модуль упругости E _y ×10 ³ МПа	Модуль деформации E _d ×10 ³ МПа	Проч- ность на сжатие [R] ₂₈ МПа
			0-5 мм %	5-40 мм %			
1	100	7	25	75	11,44	2,72	3,95
2	100	7	35	65	20,09	7,58	9,72
3	100	7	45	55	12,08	6,22	4,77
4	100	7	55	45	8,48	5,96	4,77

Проведенные опыты показали, что наименьшей деформируемостью и наибольшей прочностью обладает грунтоцемент с содержанием мелкозема 35%.

Изучение фильтрационных свойств грунтоцемента

Фильтрационные испытания материала проводились в лабораторных условиях на образцах высотой 120 мм, диаметром 100 мм, предварительно насыщенных при давлении 0,3 бара. Исследования проходили при напоре равном 20 м. В образцах варьировалось содержание мелкозема, а содержание цемента оставалось одинаковым.

В таблице 5 приводятся средние значения коэффициентов фильтрации, полученные в испытаниях.

Таблица 5

N п/п	Содержание цемента	Содержание фракции 0-5 мм	Содержание фракции 5-40 мм	Градиент I	Коэффициент фильтрации
	кг/м ³	%	%		×10 ⁻⁷ см/с
1	100	35	65	166,6	6,75
2	100	45	55	166,6	4,23
3	100	55	45	166,6	3,64

Как видно из таблицы, для заданных грансоставов с увеличением содержания мелкозема происходит уменьшение коэффициента фильтрации, что вполне естественно, так как при увеличении содержания мелких фракции происходит уменьшение пористости (пористости) материала.

Дополнительно были проведены опыты с образцами грунтоцемента, содержащими 55% мелкозема, но 200 кг/ м³ цемента. Эти опыты показали, что с увеличением содержания цемента коэффициент фильтрации составил в среднем $4,82 \cdot 10^{-8}$ см/с, что фактически на порядок меньше, чем при содержании цемента, равном 100 кг/ м³.

Этот результат указывает на то, что данный состав грунтоцемента может быть использован для укладки в зону напорной грани плотины, то есть практически (с точки зрения водонепроницаемости), он может заменить вибрированный бетон низких марок.

В четвертой главе изложены результаты исследований дробленых и отсортированных материалов из карьеров для изготовления укатанного бетона.

Изучение физико-механических свойств укатанного бетона проводилось применительно к строительству гидроузла на реке РМИЛ с гравитационной плотиной высотой 24 м. Исследовались фильтрационные свойства швов, при перерыве в укладке. Контактные поверхности в экспериментах принимались трех видов: без очистки предыдущего слоя, с очисткой его водой и воздухом, заливка контактных поверхностей тонким слоем цементного раствора.

Исследование деформационных свойств укатанного бетона проводилось с целью определения модулей упругости и деформации. Одновременно определялась и прочность образцов в возрасте 28 дней. Опыты проводились на образцах трех разновидностей.

Результаты определения модуля упругости приведены в табл. 6.

Таблица 6

N п/п	содержание цемента	влажность	прочность на сжатие [R] ₂₈	модуль упругости E _y
	кг/ м ³	%	МПА	×10 ³ МПА
1	100	6	10,96	13,44
2	100	6	9,74	12,14
3	100	6	11,81	21,10

Влияние типа песка (окатанный или дробленый) на прочность укатанного бетона

Исследование проводилось при постоянной дозе цемента = 80 кг/м³, постоянной влажности = 6,5% и $D_{max} = 31,5$ мм..

Полученные при испытании образцов результаты сведены в таблицу 7

Таблица 7

Тип песка	Плотность, т/м ³	Плотность во влажном состоянии		Сопротивление сжатию, МПА	
		28-ой день	90-ый день	28-ой день	90-ый день
Дробленый 100%	2,371	2,269	2,250	4,36	4,43
50% окат. и 50% дробленый	2,476		2,351		4,72
75% окат. и 25% дробленый	2,487	2,353		4,83	5,36
100% окатанный	2,510	2,384		4,96	

При увеличении процентного содержания окатанного песка от 0 до 100% отмечается среднее увеличение на 6% плотности во влажном состоянии и среднее увеличение на 14% сопротивления сжатию на 28-ой день.

Изучение влияния содержания цемента и влажности на плотность

Оптимальная влажность определяется в лаборатории методом модифицированного Проктора и при помощи опыта на удобоукладываемость на вибростоле за 90 секунд. Опыты на удобоукладываемость, определение оптимальной плотности на стандартном вибростоле и времени VB (времени появления цементного молока) производились в лаборатории по методике .

Опыты на вибростоле выполнялись на стадии разработки укатанного бетона, когда определялось время вибрирования (VB) и оптимальные плотности во влажном состоянии. Бетон помещался в стандартную форму (диаметром 240 мм, высотой 200 мм). Укладка осуществлялась в два слоя со штыкованием каждого слоя (25 ударов штыковкой). Затем приступали к вибрированию в течение 90 секунд, слегка поворачивая пригрузку весом 20 кг.

Время от начала вибрирования и до момента, когда появляется цементное молоко, является временем вибрирования, которое тесно связано с влажностью смеси. Плотность во влажном состоянии измеряется после 90-секундного уплотнения.

- Определение оптимальной влажности на основе опыта на удобоукладываемость с дозировкой цемента 80 кг/м³ (табл. 8).

Таблица 8

Влажность %	4	5	6	7	8
Время VB, с	цем. молока нет	60	15	5	3
Плотность во влажном состоянии, т/м ³	2,343	2,436	2,457	2,456	2,423

- Определение оптимальной влажности на основе опыта на удобоукладываемость с дозировкой цемента 90 кг/м^3 (табл. 4.9).

Таблица 9

Влажность %	4	5	6	7	8
Время VB, с	цем.молока нет	60	15	5	3
Плотность во влажном состоянии, т/ м^3	2,364	2,457	2,455	2,456	2,345

- Определение оптимальной влажности на основе опыта на удобоукладываемость с дозировкой цемента 100 кг/м^3 (табл. 10).

Таблица 10

Влажность, %	4	5	6	7	8
Время VB, с	цем.молока нет	60	15	5	3
Плотность во влажном состоянии, т/ м^3	2,381	2,438	2,474	2,481	2,453

- Определение оптимальной влажности на основе опыта на удобоукладываемость с дозировкой цемента 110 кг/м^3 (табл. 11).

Таблица 11

Влажность %	4	5	6	7	8
Время VB, с	цем. молока нет	40	15	6	3
Плотность во влажном состоянии, т/ м^3	2,401	2,429	2,470	2,490	2,432

Для каждой дозы цемента существует оптимальная консистенция (влажность и максимальная плотность во влажном состоянии), которую необходимо определить и поддерживать постоянной во время укладки укатанного бетона; при этом удобоукладываемость характеризуется временем VB, следовательно, контроль за удобоукладываемостью осуществляется с помощью времени VB.

Существует связь между консистенцией и прочностью на сжатие. Эта связь была определена экспериментальным путем в лаборатории для грунтов плотины Фум Ханга: содержание воды больше или меньше оптимальной влажности вызывает снижение прочности.

Коррекция значения оптимальной влажности должна определяться при опытных укатках.

Влияние количества цемента на максимальную плотность во влажном состоянии

Полученные результаты, приведенные в табл. 12, указывают на слабое влияние изменения количества цемента на максимальную плотность, так, при увеличении содержания на 30 кг/м^3 отмечается очень слабое увеличение максимальной плотности: порядка 2-х %. Из этого можно заключить, что содержание цемента в диапазоне от 80 до 110 кг/м^3 не влияет на плотность и что максимальной плотности можно добиться лишь подбором зернового состава заполнителей.

Таблица 12

доза цемента, кг/м^3	влажность по Проктору, %	максимальная плотность во влажном состоянии, т/ м^3
80	6	2,457
90	6,3	2,460
100	6,5	2,481
110	7	2,490

Исследование влияния количества цемента и сроков выдерживания на прочность образцов сжатия

Исследовалось влияние содержания цемента в укатанном бетоне (от 80 до 110 кг/м^3) и сроков его выдерживания (от 7 до 180 суток) на прочность укатанного бетона при сжатии. Результаты исследований представлены в табл.13

Таблица 13

возраст, дней	сопротивление сжатию, МПа			
	80 кг/м^3 цемента	90 кг/м^3 цемента	100 кг/м^3 цемента	110 кг/м^3 цемента
7	3.1	4.3	5.8	6.4
14	4.3	5.6	6.1	6.9
28	4.3	6.1	7.3	8.1
55	5.2	6.8	8.2	9.2
90	5.2	6.9	8.3	9.8
180	5.3	6.9	8.4	10

Прочность укатанного бетона постоянно возрастает, в первые 7-14 дней – быстро, затем (к 28-му дню) замедляется и постепенно стабилизируется. Отметим, что средняя прочность образцов на 7-ой день достигает 60-70% от прочности образцов на 28-ой день.

Прочность образцов в возрасте 3 месяца на 12-18% выше, чем прочность образцов на 28-ой день выдержки.

Анализ эмпирической формулы для оценки прочности укатанного бетона

Исследовались возможности применение известной формулы для определения прочности укатанного бетона в любом возрасте.

Для расчета прочности бетона использована эмпирическая формула:

$$R_n = R_{28} \cdot \lg_n / \lg_{28},$$

где R_n - прочность через n дней, R_{28} - прочность через 28 дней.

Таблица 14

Кол-во дней	80 кг/м ³ цемента		90 кг/м ³ цемента		100 кг/м ³ цемента		110 кг/м ³ цемента	
	R_n эксп. МПа	R_n по формуле МПа	R_n эксп. МПа	R_n по формуле МПа	R_n эксп. МПа	R_n по формуле МПа	R_n эксп. МПа	R_n по формуле МПа
7	3,1	2,5	4,3	3,6	5,8	4,3	6,4	4,7
14	4,3	3,4	5,6	4,8	6,1	5,8	6,9	6,4
28	4,3	4,3	6,1	6,1	7,3	7,3	8,1	8,1
55	5,2	5,2	6,8	7,3	8,2	8,8	9,2	9,7
90	5,2	5,8	6,9	8,2	8,3	9,9	9,8	10,9
180	5,3	6,7	6,9	9,5	8,4	11,4	10	12,6

Приближенная эмпирическая формула для расчета прочности бетона разных возрастов дает результаты, на 10-20% отличающиеся от реального значения, установленного в лаборатории. Эмпирическая формула может применяться для оценки прочности укатанного бетона только по 28-му дню. Для других сроков выдержки образцов необходимо введение поправки: понижающей – для $n < 28$ дн. и повышающей – для $n > 28$ дн.

Изучение прочности и фильтрации строительных швов в плотинах из укатанного бетона

Сложной проблемой в плотинах из укатанного бетона является достижение водонепроницаемости верховой грани плотины. Для снижения проницаемости были разработаны два способа, один из которых состоял в использовании вибрированного бетона в зоне верховой грани шириной 2-3 м, с большим содержанием цемента (200...250) кг/м³; а другой – в применении полимерных материалов для покрытия напорной грани.

Образцы были уложены в две слоя, с различным интервалом. Предварительно образцы были насыщены водой при давлении 0,3 бара.

Исследования проводились при напоре равном 25м после 28 дней выдержки. Контактные поверхности в экспериментальных принимались трех видах – без очистки предыдущего слоя, с очистки его водой и воздухом и с использования заливки тонким слоем цементного раствора.

Фильтрация в швах при перерыве в 30 часов

– Без очистки слоя при укладке

Таблица 15

Объем воды в сосуде	Время измерения	Расход	Скорость	Градиент I	Коэффициент фильтрации
мл	с	$\times 10^{-3}$ мл/с	$\times 10^{-5}$ см/с		$\times 10^{-7}$ см/с
184,130	86400	2,13	2,71	208,33	1,30
177,030	86400	2,04	2,61	208,33	1,25
161,547	79200	2,03	2,59	208,33	1,24

Среднее значение коэффициента фильтрации, полученное в испытаниях, составляет $1,27 \cdot 10^{-7}$ см/с.

– С очисткой слоя воздухом и водой

Таблица 16

Объем воды в сосуде	Время измерения	Расход	Скорость	Градиент I	Коэффициент фильтрации
мл	с	$\times 10^{-3}$ мл/с	$\times 10^{-5}$ см/с		$\times 10^{-7}$ см/с
135,341	86400	1,56	1,99	208,33	0,96
138,501	86400	1,60	2,04	208,33	0,98
126,297	79200	1,59	2,03	208,33	0,97

Среднее значение коэффициента фильтрации, полученное в испытаниях, составляет $0,97 \cdot 10^{-7}$ см/с.

– С использованием цементного раствора, уложенного между слоями

Таблица 17

Объем воды в сосуде	Время измерения	Расход	Скорость	Градиент I	Коэффициент фильтрации
мл	С	$\times 10^{-3}$ мл/с	$\times 10^{-5}$ см/с		$\times 10^{-7}$ см/с
79,485	86400	0,92	1,17	208,33	5,6
81,001	86400	0,94	1,19	208,33	5,7
77,969	79200	0,98	1,25	208,33	6,0

Среднее значение коэффициента фильтрации, полученное в испытаниях, составляет $5,8 \cdot 10^{-8}$ см/с.

Фильтрация в швах при разрыве в укладке 4 часа

– Без очистки слоя при укладке

Таблица 18

Объем воды в сосуде	Время измерения	Расход	Скорость	Градиент I	Коэффициент фильтрации
мл	с	$\times 10^{-3}$ мл/с	$\times 10^{-5}$ см/с		$\times 10^{-7}$ см/с
58,869	94680	0,62	0,79	208,33	0,38
39,940	72000	0,55	0,70	208,33	0,34

Среднее (по двум образцам) значение коэффициента фильтрации, полученное в испытаниях, равно $0,36 \cdot 10^{-7}$ см/с.

– С очисткой слоя воздухом и водой

Таблица 19

Объем воды в сосуде	Время измерения	Расход	Скорость	Градиент I	Коэффициент фильтрации
мл	с	$\times 10^{-3}$ мл/с	$\times 10^{-5}$ см/с		$\times 10^{-7}$ см/с
33,065	94680	0,35	0,44	208,33	0,21
23,277	72000	0,32	0,41	208,33	0,20

Среднее (по двум образцам) значение коэффициента фильтрации, полученное в испытаниях, равно $0,20 \cdot 10^{-7}$ см/с.

– С использованием цементного раствора, уложенного между слоями

Таблица 20

Объем воды в сосуде	Время измерения	Расход	Скорость	Градиент I	Коэффициент фильтрации
мл	с	$\times 10^{-3}$ мл/с	$\times 10^{-5}$ см/с		$\times 10^{-7}$ см/с
49,937	94680	0,53	0,67	208,33	0,32
30,550	72000	0,42	0,54	208,33	0,26

Среднее значение коэффициента фильтрации, полученное в испытаниях, составляет $0,29 \cdot 10^{-7}$ см/с.

Изучение зависимости проницаемости швов от времени укладки проводилось для двух вариантов.

- время укладки следующего слоя на предыдущий довольно значительно (30 часов), что позволяет цементу в бетоне предыдущего слоя полностью схватиться (так называемый «холодный шов»);

- время укладки следующего слоя на предыдущий довольно незначительно (4 часа), цемент в предыдущем слое еще не успел полностью схватиться (так называемый «горячий шов»).

Как следует из результатов исследований, проницаемость шва практически не отличается от проницаемости сплошных образцов укатанного бетона, за исключением «холодного шва» без очистки контактных поверхностей. Причем, естественно, горячий шов предпочтительнее холодного.

Изучение прочности швов при укладке 2 ого слоя через 70 часов

Прочностные испытания материала на растяжение проводились в лабораторных условиях на образцах-цилиндрах высотой 320 мм и диаметром 160 мм бразильским методом.

Опыт состоит в раздавливании опытного цилиндра вдоль плоскости шва между сходящимися плоскостями пресса. Разрыв происходит перпендикулярно плоскости шва. Контакт плоскостей с цилиндром обеспечивается рейками толщиной 5 мм и шириной в 1/10 диаметра цилиндра. Для получения надежных результатов необходимо точное центрирование цилиндра.

Образцы были уложены в два слоя, с разрывом по времени между укладкой слоев в 70 часов.

Прочность швов при укладке второго слоя через 70 часов

- Без очистки слоя при укладке

Таблица 21

Диаметр образца	Высота образца	Разрушающая нагрузка	Прочность на растяжение R_{28}
см	см	кг	кг/см ²
30,5	16	7033	9,179
30,5	16	6116	7,982

Среднее значение прочности на растяжение R_{28} , полученное в испытаниях, равно 8,58 кг/см².

- С использованием цементного раствора, уложенного между слоями

Таблица 22

Диаметр образца	Высота образца	Разрушающая нагрузка	Прочность на растяжение R_{28}
см	см	кг	кг/см ²
30,4	16	9378	12,444
30,5	16	9174	11,974

Среднее значение прочности на растяжение R_{28} , полученное в испытаниях, составило $12,21 \text{ кг/см}^2$.

В результате исследований установлено, что средняя прочность на растяжение образцов со швами в возрасте 28 суток составляет:

- для образцов с контактными швами без очистки – $8,58 \text{ кг/см}^2$;
- с контактными швами, залитым цементным раствором – $12,21 \text{ кг/см}^2$.

Это весьма высокие показатели прочности на растяжение, соответствующие по СНиП 2.06.08-87 расчетным сопротивлениям для предельных состояний первой группы бетона класса В15-В30. Однако, можно предположить, что бразильский метод дает более высокие показатели прочности бетона на растяжение, чем традиционный метод на разрыв образцов.

При столь низкой проницаемости швов и их высокой прочности на растяжение для плотин с низким и средним напором можно отказаться от специальных мероприятий при конструировании напорной грани плотины (применение литых бетонов в напорной зоне, устройства гидроизоляционных экранов, и т.п.).

В пятой главе представлены результаты полевых опытов по приготовлению укладки укатанного бетона.

Общая организация контроля качества укатанного бетона отвечала следующим требованиям:

- приготовление бетонных смесей производилось с точным соблюдением рецептуры укатанного бетона; с этой целью на бетонном заводе имелась контрольно-измерительная аппаратура, регистрирующая показания дозаторов;
- оценка жесткости бетонной смеси осуществлялась по значению времени V_B – периоду от начала вибрирования до момента появления цементного молока;
- температура уложенного слоя укатанного бетона не допускалась более 25°C ;
- не допускалось временного разрыва при перекрытии предыдущего слоя в зависимости от температуры воздуха;
- прочность укатанного бетона оценивалась по контрольным образцам и результатам испытаний кернов, выбуренных из сооружения.

В соответствии с требованиями регламентирующих документов, для сооружений 1-2 классов перед их бетонированием должны быть проведены опытные работы для отработки технологии укладки бетонной смеси.

Экспериментальная площадка для опытной укатки на плотине РМИЛ имела следующие размеры:

длина 50 м, ширина 15 м и объем 1500 м^3 , заложение напорной грани 0,4/1 (с опалубкой); заложение низовой грани 0,9/1.

Для получения высококачественного укатанного бетона было необходимо выполнение следующих мероприятий.

- Измерение влажности заполнителей на складах для уточнения оптимальной влажности.
- Исследование образцов на бетонном заводе для проверки состава.
- Определение значения оптимальной влажности (по Проктору и на выбростоле), при которой имеет место максимальная плотность.
- Измерение температуры бетонной смеси.
- Оценка жесткости бетонной смеси, при этом контроль за удобоукладываемостью осуществлялся по времени VB (как минимум, 4 измерения в каждом слое).
- Определение времени схватывания в зависимости от температуры воздуха.

В настоящее время наиболее распространены следующие три способа определения времени схватывания бетонной смеси.

Так называемый «китайский» способ состоит в погружении иглы на приборе Проктора в образец с максимальным заполнителем $D_{\max}=5$ мм, уплотненный на выбростоле в цилиндрической форме 160 мм. При этом обычно принято считать началом схватывания момент времени, когда для погружения иглы необходимо приложить нагрузку, равную 50 МПа.

Так называемый «американский» способ состоит в определении показателя зрелости бетонной смеси, который определяется произведением температуры на поверхности слоя и периода времени, прошедшего до укладки следующего слоя. Было указано на несостоятельность этого способа. Действительно, значение показателя зрелости смеси, допустим, равное 200 может быть получено как произведение 10 час. на 20°C, или как 50 час. на 4°C, 6,6 час. на 30°C и т.п., что нелогично.

С помощью ультразвука.

Контроль на стройплощадке

Контроль за процессом укладки бетона включал следующие операции.

- Визуальный контроль укладки бетонной смеси во избежание ее расслоения во время выгрузки и разравнивания.
- Измерение температуры бетона с помощью двух датчиков, установленных в массиве.
- Измерение влажности и плотности с помощью прибора ТРОКСЛЕР.
- Выбор необходимого числа проходов виброкатка в зависимости от влажности и плотности (первые два прохода виброкатка должны производиться с выключенным вибровозбудителем).
- Измерение осадки после укатки, осуществляемое геодезическими методами.
- Оценка прочности и плотности укатанного бетона по результатам испытаний кернов, выбуренных из тела плотины.

В результате опытных укаток были подобраны составляющие укатанного бетона, уточнена оптимальная влажность и определено число проходов (в количестве 8 проходов) уплотняющего механизма для получения необходимой плотности материала сооружения.

Основные выводы и рекомендации

На основании анализа и обобщения мирового опыта применения укатанного бетона и грунтоцемента, результатов лабораторных и полевых исследований, выполненных в настоящей работе, можно сделать следующие выводы и рекомендации.

1. Применение укатанного бетона на основе отсортированного карьерного материала и грунтоцемента из естественных гравийно-галечниковых смесей с содержанием цемента в диапазоне 60-100 кг/м³ позволяет сократить стоимость и продолжительность возведения гидротехнических сооружений без снижения их прочности и устойчивости и в целом надежности в процессе их эксплуатации.

2. Исследования естественных аллювиальных отложений для получения грунтоцемента показали следующее.

Существует связь между плотностью, влажностью и прочностью на сжатие. Эта связь определена экспериментальным путем в лаборатории для грунтоцемента плотины Фум-Ханга.

Отклонение содержания воды от оптимальной его величины вызывает резкое снижение прочности.

Наименьшей деформируемостью и наибольшей прочностью обладает грунтоцемент с содержанием мелкозема 35%.

Для заданных гранулометрических составов с увеличением содержания мелкозема происходит уменьшение коэффициента фильтрации, так как при увеличении содержания мелких фракций происходит уменьшение пустотности (пористости) материала.

С увеличением содержания цемента до 200 кг/ м³ коэффициент фильтрации составил в среднем $4,82 \cdot 10^{-8}$ см/с, что на порядок меньше, чем при содержании цемента, равном 100 кг/м³.

Естественные гравийно-галечниковые смеси могут быть использованы для приготовления грунтоцемента. При содержании цемента равном 200 кг/ м³ грунтоцемент может укладываться в зону напорной грани плотины. С точки зрения водонепроницаемости такой грунтоцемент может заменить вибрированный бетон.

3. Исследования дробленых и отсортированных материалов горной массы из карьеров для изготовления укатанного бетона позволяют сделать следующие выводы.

При увеличении процентного содержания окатанного песка от 0 до 100% отмечается среднее увеличение на 6% плотности и на 14% прочности на сжатие.

Для каждой дозы цемента существует оптимальная консистенция (влажность и максимальная плотность во влажном состоянии), которую необходимо определить и поддерживать постоянной во время укладки свежего укатанного бетона. При этом удобоукладываемость характеризуется временем V_B , и контроль за удобоукладываемостью осуществляется по значению времени V_B . Существует связь между плотностью и прочностью на сжатие. Эта связь была определена экспериментальным путем в лаборатории

грунтов гидроузла Фум-эль-Ханга, отклонение от оптимальной влажности вызывает снижение прочности на сжатие. Коррекция значения оптимальной влажности должна вводиться при опытных укатках.

Прочность укатанного бетона постоянно возрастает, в первые 7-14 дней – быстро, затем (к 28-му дню) замедляется и постепенно стабилизируется. Средняя прочность образцов на 7-ой день достигает 60-70% от прочности образцов на 28-ой день. Прочность образцов в возрасте 3 месяца на 12-18% выше, чем прочность образцов на 28-ой день.

Приближенная эмпирическая формула для расчета прочности бетона разных возрастов дает результаты на 10-20% выше по отношению к реальному значению, установленному в лаборатории. Эмпирическая формула может применяться для оценки прочности укатанного бетона только при введении дополнительных коэффициентов, отличающихся для $n < 28$ и $n > 28$ дней.

4. Как следует из результатов исследований, проницаемость шва практически не отличается от проницаемости сплошных образцов укатанного бетона, за исключением так называемого «холодного» шва без очистки контактных поверхностей. Причем, естественно, горячий шов предпочтительнее холодного.

5. В результате исследований установлено, что средняя прочность на растяжение образцов со швами в возрасте 28 суток составляет:

для образцов с контактным швом без очистки – $8,58 \text{ кг/см}^2$;

с контактным швом, залитым цементным раствором – $12,21 \text{ кг/см}^2$.

Это весьма высокие показатели прочности на растяжение, соответствующие по СНиП 2.06.08-87 расчетным сопротивлениям для предельных состояний первой группы классам бетона В15-В30. Однако, можно предположить, что бразильский метод дает более высокие показатели прочности бетона на растяжение, чем традиционный метод на разрыв образцов.

При столь низкой проницаемости швов и их высокой прочности на растяжение для плотин с низким и средним напором можно отказаться от специальных мероприятий при конструировании напорной грани плотины (применение литых бетонов в напорной зоне, устройство гидроизоляционных экранов и т.п.).

6. Грунтоцементы и укатанный бетон, исследованные в диссертационной работе, успешно применяются при строительстве двух плотин вТунисе: Фум-Ханга и Рмил.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Гольдин А.Л., Белаид М. Некоторые результаты изучения физико-механических свойств грунтоцементов. Научно-технич. и производственный сборник «Безопасность энергетических сооружений» НИИЭС, вып.9 2001.

2. Гольдин А.Л., Белаид М. Проницаемость укатанного бетона и межслойных швов. Научно-технич. и производственный сборник «Безопасность энергетических сооружений». НИИЭС, вып.9 2001.

Монсеф Белаид
Использование укатанного бетона и грунтоцемента в
гидротехническом строительстве Туниса

Типография ОАО "ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева"
Подписано к печати 26.11.2001
Объем 1.5 п.л. Номер заказа 213
Тираж 100.