

Исследование деформаций легких магниезиальных бетонов

Г.Ф. Аверина, Т.Н. Черных, Д.В. Ульрих, А.А. Орлов

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)

Аннотация: В статье приводятся результаты исследования склонности композитов на основе магниезиальных вяжущих к деформационным изменениям. Определена зависимость степени деформаций легких магниезиальных бетонов от условий их твердения. Установлены основные факторы, влияющие на деформации легких магниезиальных бетонов. Показано влияние условий твердения на интенсивность деформационных изменений. Выявлены причины, вызывающие неравномерность деформаций легких магниезиальных бетонов. Определен способ изготовления легких магниезиальных бетонов, предотвращающий их неравномерное деформирование и последующее нарушение геометрии конструкции. Установлено, что введение добавок-модификаторов, таких, как эфиры целлюлозы способствуют снижению расслаиваемости бетонных магниезиальных смесей, улучшают их однородность и снижают неравномерность деформационных изменений по объему образца.

Ключевые слова: магниезиальные вяжущие, объемные деформации, усадка, расширение, коробление, условия твердения, расслоение, магниезиальный бетон, стекломагниезиальный лист, растрескивание.

Введение

Магниезиальные вяжущие вещества – воздушные вяжущие, состоящие в основном из мелкодисперсного порошка оксида магния, затворяемого водными растворами солей [1, 2]. На сегодняшний день все порошки оксида магния для магниезиальных вяжущих получают путем термической обработки высокомагниезиального сырья, такого, как магнезиты, бруситы и доломиты [3, 4]. Особенность магниезиальных вяжущих заключается в том, что в качестве затворителя используются растворы хлористого или сернокислого магния [5, 6]. При затворении оксида магния растворами солей прочность на сжатие затвердевшего магниезиального камня может достигать 30 – 70 МПа [7, 8]. Наиболее распространены магниезиальные цементы, затворенные хлоридом магния, так как они имеют наибольшую прочность [9].

Процесс твердения магниезиальных вяжущих может сопровождаться объёмными деформациями [10]. На длинномерных изделиях, например, стекломагниезиальных листах возможно возникновение неравномерных

деформаций, что приводит к их короблению. Нужно отметить, что коробление проявляется на стабильном вяжущем с равномерным изменением объема [11].

Так как наиболее часто данная проблема возникает у производителей стекломagneзиальных листов, эксперименты проводили с магнезиальным камнем и легким магнезиальным бетоном – основой этих листов.

Целью данной работы является исследование деформаций легких магнезиальных бетонов.

Для достижения поставленной цели были поставлены и реализованы следующие задачи:

1. Определить степень деформации легких магнезиальных бетонов в зависимости от условий твердения.
2. Выявить факторы, в наибольшей степени влияющие на деформации легких магнезиальных бетонов.
3. Выявить причины, вызывающие неравномерное деформирование легких магнезиальных бетонов.
4. Выбрать способ изготовления легких магнезиальных бетонов, предотвращающий их неравномерное деформирование.

Материалы и методы исследования

Для изготовления легкого магнезиального бетона использовали вяжущее – порошок магнезиальный каустический (ПМК 75), затворитель – раствор хлористого магния (бишофита), наполнитель – доменный гранулированный шлак и легкий заполнитель – вермикулит. Свойства материалов перечислены ниже.

Вермикулит:

- Наибольшая крупность – 1,25 мм;
- Насыпная плотность – 180 кг/м³.

ПМК-75:

- Нормальная густота (погружения пестика прибора Вика 4...10 мм) 28 %;
- Насыпная плотность – 1,27 г/см³;
- Тонкость помола по остаткам на сите 0,08 % - 13;
- Начало схватывания, не ранее - 70 минут;
- Конец схватывания, не позднее - 130 минут;
- Отсутствие трещин при равномерном изменении объема;
- Прочность при сжатии в 28 сутки – 71,4 Мпа;
- Прочность при изгибе в 7 сутки – 13,7 Мпа.

Доменный гранулированный молотый шлак:

- Удельная поверхность – 391,7 м²/кг*;
- Содержание фракции менее 0,08 мм – 97,2 %;
- Содержание фракции менее 0,02 мм – 48,3 %.

Технический хлористый магний (бишофит), соответствовал требованиями ГОСТ 7759-73.

Для оценки качества сырьевых материалов и свойств бетонных смесей, изготовленных на их основе, использовали как стандартные методики, так и специально разработанные методы исследования. Перечень применяемых в работе стандартных испытаний приведен в таблице № 1.

Таблица № 1

Стандартные методы испытаний

Вид испытаний	Метод испытаний
Нормальная густота, сроки схватывания	ГОСТ 1216-87
Прочность при сжатии и изгибе магниезиального вяжущего и легкого бетона, равномерность изменения объема, тонкость помола	ТУ 5744-001-60779432-2009
Расслаиваемость легкой бетонной смеси	ГОСТ 10181-2014

Для определения склонности образцов к короблению изготавливали 9 образцов размерами 4x4x16 см. Через 24 часа нормального твердения (температура 20 ± 2 °С, влажность 95 ± 5 %) образцы извлекали из форм, на них наносили разметку с шагом в один сантиметр (рис. 1). Контрольные метки впоследствии использовали для контроля деформационных изменений.



Рис. 1. – Размеченные образцы

После подготовки образцов три образца поместили в сушильный шкаф на 27 суток при температуре 30 °С и влажности 0 % в вертикальном положении. Другие 3 образца твердели в нормальных условиях (температура 20 ± 2 °С, влажность 95 ± 5 %).

Последние 3 образца того же состава помещены в ванну с гидравлическим затвором (рис. 2.), в данной среде образцы набирают прочность в течение 28 суток при влажности 100 %, в вертикальном положении (рис. 3).

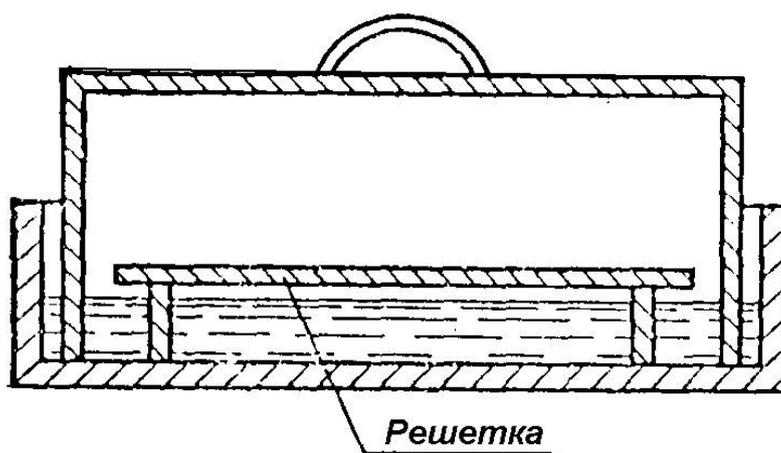


Рис. 2. – Схема ванны с гидравлическим затвором



Рис. 3. – Образцы в ванной с гидравлическим затвором

Каждые сутки контролировали деформаций образцов, по изменению расстояния между рисками с помощью штангенциркуля.

Результаты и обсуждение

Для оценки склонности легкого магниального бетона к расширению/усадке, а также равномерности этих деформаций был проведен эксперимент: изготавливали легкую магниальную бетонную смесь по составу, представленному в таблице № 2. Плотность бетонной смеси составила 1585 кг/м^3 . У полученной на основе данного состава бетонной смеси определяли расслаиваемость, также изготавливали образцы-балочки

4x4x16 см, для оценки пределов прочности при сжатии в 7 и 28 сутки твердения и склонности образцов к расширению/усадке.

Таблица № 2

Состав легкой бетонной смеси на 1 м³

Компонент	Содержание
ПМК-75, кг	690
Вермикулит, кг	136
Шлак, кг	124
Бишофит, кг	317
Вода, кг	317

Так как одной из вероятных причин неравномерных деформаций магниезиального легкого бетона может являться неоднородность состава бетона по объему, мы оценили расслаиваемость бетонной смеси. Результаты представлены в таблице № 3.

Таблица № 3

Расслаиваемость магниезиальной легкой бетонной смеси

№ п/п	Часть формы	Масса бетонной смеси, г	Масса заполнителя, г	Высота слоя, мм	Масса растворной части с уч. Н	Раствороотделение, %
1.	Верхняя	2082	106,5	60	2469,4	3,6
	Нижняя	3270	87,0	90	2652,5	
2.	Верхняя	2448	125,2	70	2488,7	3,5
	Нижняя	2921	74,8	80	2668,3	
3.	Верхняя	2444	125,0	70	2484,6	3,5
	Нижняя	2914	70,0	80	2666,3	
	Среднее значение					3,5

Достоверность полученных результатов оценивали по ошибке эксперимента, которая составила 0,17 %, что составляет менее 5 % от раствоороотделения. Значение раствоороотделения – 3,5 % является незначительным. Однако, разница в составе бетонной смеси, а значит, и бетона присутствует, что может оказать влияние на процесс гидратации

магнезиального вяжущего, что в свою очередь может привести к формированию камня различного фазового состава в верхней и нижней частях изделия.

Для оценки влияния расслоения бетонной смеси на свойства бетона были изготовлены образцы-балочки 4x4x16 см, из верхней, средней и нижней части бетонной смеси, отбор осуществляли из форм 15x15x15 см после уплотнения. У образцов определяли: пределы прочности при сжатии и изгибе в 7 и 28 суток твердения, деформации расширения/усадки. Образцы твердели в нормальных условиях.

Результаты испытаний представлены в таблицах №№ 4 и 5.

Таблица № 4

Результаты определения предела прочности образцов

Свойства в 7 суток твердения			
	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Средняя плотность, г/см ³
Из нижней части	4,9	14,4	1,762
Из средней части	4,0	11,3	1,580
Из верхней части	3,8	6,3	1,422
Свойства в 28 суток твердения			
Из нижней части	9,7	20,6	1,738
Из средней части	9,4	17,7	1,563
Из верхней части	7,1	7,8	1,398

Для оценки достоверности полученных данных рассчитывали ошибку эксперимента при требуемом количестве повторов, ошибка для всех испытаний составила менее 5 %.

Из данных, представленных в таблице № 4, можно сделать вывод, что расслоение бетонной смеси оказывает значительное влияние на все свойства легкого бетона. Плотность образцов, изготовленных из верхней части бетонной смеси, на 20 % меньше плотности образцов из нижней части,

аналогично, прочность при сжатии образцов из верхней части бетонной смеси почти на 60 % меньше.

В таблице № 5 показаны деформации образцов легкого магнезиального бетона в зависимости от условий их твердения и уровня отбора бетонной смеси. Образцы твердели в нормальных условиях, при температуре 30 °С и влажности 0 %, при влажности 100 % и температуре 20 °С.

Таблица № 5

Определение деформаций усадки/расширения легкого магнезиального бетона

Часть образца, для которой определялись деформации	№ стороны образца	Твердение температур 30 °С и влажности 0 %			Твердение в нормальных условиях			Твердение при влажности 100 % и температуре 20 °С		
		усредненное изменение измене отрезка								
		1 сутки	7 сутки	28 сутки	1 сутки	7 сутки	28 сутки	1 сутки	7 сутки	28 сутки
Нижняя	1	0,0%	0,1%	0,2%	0,0%	0,4%	1,2%	0,0%	4,5%	6,2%
	2	0,0%	0,1%	0,2%	0,0%	0,5%	1,3%	0,0%	5,1%	7,1%
	3	0,0%	0,1%	0,2%	0,0%	0,6%	1,4%	0,0%	6,1%	10,1%
	4	0,0%	0,1%	0,2%	0,0%	0,5%	1,3%	0,0%	5,1%	6,9%
Средняя	1	0,0%	0,1%	0,2%	0,0%	0,2%	1,0%	0,0%	4,3%	5,8%
	2	0,0%	0,2%	0,3%	0,0%	0,3%	1,1%	0,0%	4,9%	6,4%
	3	0,0%	0,1%	0,2%	0,0%	0,4%	1,2%	0,0%	5,9%	7,4%
	4	0,0%	0,1%	0,2%	0,0%	0,3%	1,1%	0,0%	4,9%	6,4%
Верхняя	1	0,0%	0,1%	0,2%	0,0%	0,1%	0,9%	0,0%	4,0%	5,5%
	2	0,0%	0,2%	0,3%	0,0%	0,2%	1,0%	0,0%	4,6%	6,1%
	3	0,0%	0,3%	0,4%	0,0%	0,3%	1,1%	0,0%	5,6%	7,1%
	4	0,0%	0,2%	0,3%	0,0%	0,2%	1,0%	0,0%	4,6%	6,1%

Для оценки достоверности полученных данных рассчитывали ошибку эксперимента при 3-х повторах, ошибка для всех испытаний составила менее 5 %.

Анализируя данные в таблице можно сделать несколько выводов.

Образцы, изготовленные из бетонной смеси, отобранной из верхней части формы, имеют меньшие деформации, чем образцы, изготовленные из бетонной смеси, отобранной из средней или нижней части формы. Таким образом, чем больше в образцах растворной части, тем значительно они расширяются.

Условия твердения значительно влияют на деформации образцов. Повышение влажности образцов стимулирует их твердение, что усиливает деформации. Высушивание образцов предотвращает их расширение, однако, при возобновлении нормального твердения, деформации начинают нарастать.

Образцы по-разному деформируются с разных сторон, т.е. происходит их коробление, причиной этого может являться расслоение смеси при изготовлении образцов 4x4x16см.

Деформации значительно нарастают после 7 суток твердения, что может свидетельствовать о том, что причина значительных деформаций и коробления образцов – перекристаллизация магнезиального камня.

Таким образом, условия твердения образцов оказывают влияние на их деформации, однако к короблению приводит именно расслоение бетонной смеси в процессе формования.

Так как причиной коробления легкого магнезиального бетона является расслоение бетонной смеси, были предложены способы для его снижения: введение в бетонную смесь суперпластификатора на поликарбоксилатной основе Melflux 5691 F (0,5 % от массы магнезиального вяжущего); введение в бетонную смесь эфиров целлюлозы Vermocol 379 (0,1 % от массы магнезиального вяжущего). Обе добавки позволяют значительно повысить вязкость бетонной смеси, что должно снизить ее растворотделение. Melflux также позволит снизить количество затворителя без изменения подвижности бетонной смеси, уменьшение количества затворителя позволит сформировать более стабильный магнезиальный камень, не склонный к деформированию.

Так как одной из вероятных причин неравномерных деформаций магнезиального легкого бетона может являться неоднородность состава бетона по объему, мы оценили расслаиваемость бетонной смеси с предложенными добавками. Результаты представлены в таблице № 6.

Таблица № 6

Расслаиваемость магнизиальной легкой бетонной смеси

№ п/п	Часть формы	Масса бетонной смеси, г	Масса заполнителя, г	Высота слоя, мм	Масса растворной части с уч. Н	Раствороотделение, %
Бетон с добавкой Melflux 5691 F						
1.	Верхняя	2392	96	70,0	2460	2,5
	Нижняя	2850	90	80,0	2587,5	
2.	Верхняя	2395	96	70,0	2463,214	2,4
	Нижняя	2853	96	80,0	2584,688	
3.	Верхняя	2520	100	73,0	2486,301	2,2
	Нижняя	2758	90	77,0	2598,701	
	Среднее значение					2,4
Бетон с добавкой эфиров целлюлозы Vermocoll 379						
4.	Верхняя	2496	95	72,0	2501,042	1,3
	Нижняя	2763	92	78,0	2568,269	
5.	Верхняя	2486	96	72,0	2489,583	1,3
	Нижняя	2753	96	78,0	2554,808	
6.	Верхняя	2501	95	72,0	2506,25	1,1
	Нижняя	2758	94	78,0	2561,538	
	Среднее значение					1,2

Достоверность полученных результатов оценивали по ошибке эксперимента, которая составила: для эксперимента с Melflux 5691 F – 0,44 %, для эксперимента с Vermocoll 379 – 0,33 %, что составляет менее 5 % от раствороотделения. Раствороотделение снизилось при введении обеих добавок, однако, добавка Vermocoll более эффективна, и снижает раствороотделение в 3 раза.

Для оценки влияния предложенных добавок на расслоения бетонной смеси были изготовлены образцы-балочки 4x4x16 см, из верхней, средней и нижней части бетонной смеси, отбор осуществляли из форм 15x15x15 см после уплотнения. У образцов определяли: пределы прочности при сжатии и изгибе в 7 и 28 сутки твердения, деформации расширения/усадки. Образцы твердели в нормальных условиях.

Результаты испытаний представлены в таблицах №№ 7 и 8.

Таблица № 7

Результаты определения предела прочности образцов

	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа	Средняя плотность, г/см ³
Бетон с добавкой Melflux 5691 F			
Свойства за 7 суток твердения			
Из нижней части	5,5	22,0	1,762
Из средней части	5,2	17,6	1,580
Из верхней части	5,0	12,9	1,422
Свойства за 28 суток твердения			
Из нижней части	10,0	30,4	1,736
Из средней части	6,7	12,0	1,680
Из верхней части	7,1	9,9	1,563
Бетон с добавкой эфиров целлюлозы Vermocol 379			
Свойства за 7 суток твердения			
Из нижней части	5,3	16,5	1,562
Из средней части	4,8	15,0	1,540
Из верхней части	4,3	14,9	1,522
Свойства за 28 суток твердения			
Из нижней части	9,7	20,6	1,538
Из средней части	9,4	18,7	1,523
Из верхней части	9,1	17,8	1,501

Для оценки достоверности полученных данных рассчитывали ошибку эксперимента при требуемом количестве повторов, ошибка для всех испытаний составила менее 5 %.

Сравнивая изменения свойств бетонных образцов в зависимости от уровня отбора смеси из формы 15x15x15 см, можно сделать вывод, что добавка Melflux не позволяет получить бетон с однородными свойствами. Разница в прочности стала более значительной, что может быть связано с влиянием щелочности среды на эффективность добавки, так как расслоение магниальной бетонной смеси приводит к изменению количества

затворителя в различных частях формы. Добавка Vermocoll значительно снижает неоднородность свойств бетона, разница по прочности в 28 сутки твердения становится менее 15 %.

В таблице 8 показаны деформации образцов легкого магнезиального бетона в зависимости от условий их твердения и уровня отбора бетонной смеси. Образцы твердели в нормальных условиях.

Таблица № 8

Определение деформаций усадки/расширения легкого магнезиального бетона

Часть образца, для которой определялись деформации	№ стороны образца	Бетон с добавкой эфиров целлюлозы Vermocoll 379			Бетон с добавкой Melflux 5691 F		
		Усредненное изменение измене отрезка					
		1 сутки	7 сутки	28 сутки	1 сутки	7 сутки	28 сутки
Нижняя	1	0,0%	0,1%	0,2%	0,0%	0,1%	1,1%
	2	0,0%	0,1%	0,2%	0,0%	0,2%	1,2%
	3	0,0%	0,1%	0,2%	0,0%	0,3%	1,3%
	4	0,0%	0,0%	0,2%	0,0%	0,2%	1,2%
Средняя	1	0,0%	0,1%	0,2%	0,0%	0,1%	0,9%
	2	0,0%	0,2%	0,3%	0,0%	0,0%	1,0%
	3	0,0%	0,1%	0,2%	0,0%	0,1%	1,1%
	4	0,0%	0,1%	0,2%	0,0%	0,1%	1,0%
Верхняя	1	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,1%	0,8%
	2	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%	0,1%	0,9%
	3	0,0%	0,3%	0,1%	0,0%	0,2%	1,0%
	4	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%

Для оценки достоверности полученных данных рассчитывали ошибку эксперимента при 3-х повторях, ошибка для всех испытаний составила менее 5 %.

Как видно из данных, представленных в таблице 9, добавка Vermocoll способствует снижению расширения образцов магнезиального бетона, а главное, снижает разницу в деформациях между образцами, изготовленными из бетонной смеси, отобранной из разных уровней формы.

Выводы

1. Установлено, что в процессе уплотнения легких бетонных магнезиальных смесей происходит их расслоение, что приводит к короблению образцов бетона.

2. Выявлено, что условия твердения значительно влияют на деформации расширения магнезиального бетона, в связи с чем, хоть и не являются причиной коробления, но значительно его усугубляют.

3. Доказано, что расслоение бетонной смеси влияет на прочность и плотность получаемого материала.

4. Установлено, что введение добавки эфиров целлюлозы Vermocol 379 способствует снижению расслаиваемости, повышению однородности бетонной смеси и бетона, снижению его склонности к короблению.

Литература

1. Козлова В.К., Сутула И.Г., Гущина Е.Н., Маноха А.М. Применение низкообжиговых магнезиальных вяжущих при получении теплоизоляционных и теплоизоляционно-конструкционных материалов // Ползуновский вестник. – №3. – 2008. – С. 232-235.

2. Крамар Л.Я., Черных Т.Н. Обжиг бруситовой породы для получения магнезиального вяжущего строительного назначения // Популярное бетоноведение, 2009. – №5. – С. 47-53.

3. Wenqing, Y. X. G. C. L., Xiuying B. J. A. Study on hydration mechanism of magnesium oxychloride cement prepared by caustic dolomite // Journal of the chinese ceramic society. – 1998. – Т. 4.

4. Namsone E., Sahmenko G., Korjakins A. Production of Magnesium Binder Composites Using Local Raw Materials and Technogenic Products // Environment. Technologies. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. – 2021. – Т. 3. – pp. 236-241.

5. Зимич В.В., Крамар Л. Я., Трофимов Б. Я. Влияние различных видов затворителей на гигроскопичность магнезиального камня // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – Вып. 6.– № 12 (112). – 2008. – С. 13-15.

6. Мирюк О. А. Фазовые превращения при твердении магнезиального вяжущего // Вестник Национальной инженерной академии РК. – 2009. – №. 4. – С. 128-132.

7. Крамар, Л.Я. О требованиях стандарта к магнезиальному вяжущему строительного назначения // Строительные материалы. 2006. №1. – С. 47-53.

8. Зимич В.В., Крамар Л.Я. Формирование структуры и свойств магнезиального камня, модифицированного соединениями двух- и трехвалентных металлов // Сб. докладов. – М.: РХТУ им. Менделеева, 2009. – С. 93-97.

9. Аверина, Г.Ф., Черных Т.Н., Крамар Л.Я. Влияние фактора фракционной неоднородности магнезиального сырья на свойства получаемого вяжущего // Тенденции развития науки и образования. – 2016. – №. 13-1. – С. 5-7.

10. Войтович В.А., Спирын Г.В. Полы на основе магнезиальных вяжущих веществ // Строительные материалы. 2003. – №9. – С. 8-9.

11. Шелягин, В.В. Магнезиальный цемент (сырье, технология получения и свойства). – Санкт-Петербург: «Перспектива науки», 2006. – 206 с.

References

1. Kozlova V.K., Sutula I.G., Gushchina E.N., Manokha A.M. Polzunovskiy vestnik. №3. 2008. pp. 232-235.
2. Kramar L.Ya., Chernykh T.N. Populyarnoe betonovedenie, 2009. №5. pp. 47-53.
3. Wenqing, Y. X. G. C. L., Xiuying B. J. A. Journal of the chinese ceramic society. 1998. T. 4.



4. Namsone E., Sahmenko G., Korjakins A. Environment. Technologies. Resources. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference. 2021. T. 3. pp. 236-241.
5. Zimich V.V., Kramar L. Ya., Trofimov B. Ya. Vestnik YuUrGU. Seriya Stroitelstvo i arkhitektura. V. 6. № 12 (112). 2008. pp. 13-15.
6. Miryuk O. A. Vestnik Natsional'noy inzhenernoy akademii RK. 2009. №. 4. pp. 128-132.
7. Kramar, L.Ya. Stroitel'nye materialy №1. 2006. pp. 47-53.
8. Zimich V.V., Kramar L. Ya. Sb. dokladov. M.: RKhTU im. Mendeleeva, 2009. pp. 93-97.
9. Averina, G.F., Chernykh T.N., Kramar L.Ya. Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya. 2016. №. 13-1. pp. 5-7.
10. Voytovich V.A., Spirin G.V. Stroitel'nye materialy. 2003. №9. pp. 8-9.
11. Shelyagin, V.V. Magnezial'nyj cement (syr'e, tekhnologiya polucheniya i svoystva) [Magnesia cement (raw materials, production technology and properties)]. Sankt-Peterburg: «Prospekt nauki», 2006. 206 p.