

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНОЙ ПРОСЛОЙКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДЕФОРМАЦИЙ КЕРАМЗИТА В СВЕЖЕОТФОРМОВАННОМ БЕТОНЕ.

Кучеренко А.А. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

Предложена новая модель структурной ячейки бетона. Теоретически рассчитаны напряжения в цементной прослойке. Изучены прочностные свойства прослоек и факторы, их определяющие.

Влажностные деформации составляющих бетона (заполнителя и матрицы), особенно легкого, различны по знаку и по величине. Это может быть источником дефектности структуры бетона твердеющего или зрелого. Изучают эту проблему на различных моделях. Они помогают понять сущность происходящих процессов, совместность работы заполнителя и матрицы и на базе этого наметить пути ликвидации возможных недостатков. Основные из них: модели Р. Лермита, В. Хенка и Ж.М. Смита, а также Т. Хсю. Однако, они не отражают главного: поведения цементной прослойки (ЦП) в пространстве между рядом расположенными зернами пористого заполнителя, подверженного влажностно-деформативным изменениям. Именно это обстоятельство мы пытаемся учесть в нашей модели. В ней приняты два зерна заполнителя и цементная (цементно-песчаная) матрица с реальными физико-механическими свойствами, рис. 1.

Анализируются две модели – «мелкий заполнитель – цементное тесто (камень)» и «крупный заполнитель – растворная смесь (растворный камень)». Допущения: форма заполнителя – шар; в нейтральных линиях цементного теста (раствора), НЛТ, и осевых линиях заполнителя, ОЛЗ, влажностные деформации равны нулю; между двумя рядом расположенными зернами заполнителя в расчетах принят элементный объем цементного теста (раствора) в виде куба с размером ребра, равным толщине цементной прослойки.

Усадка теста начинается в месте наибольшего отбора воды затворения, т.е. от заполнителя и, удаляясь, приближается к нейтральной линии теста, НЛТ. Это происходит как со стороны одного, так и другого, рядом расположенного заполнителя. В расчетах принимаем половину толщины прослойки со стороны одного зерна и половину – со стороны другого. Если через зерно заполнителя провести осевую линию, ОЛЗ, и учесть, что от набухания одна половина зерна перемещается вверх, а другая – вниз, то рассуждения

относительно прослойки теста справедливы и для другого зерна заполнителя. Тогда в расчетах принимается не диаметр, D_3 , а радиус заполнителя, r_3 . Структурная ячейка «крупный заполнитель – раствор» рассматривается также, как и модель «мелкий заполнитель – тесто», но с учетом физико-механических характеристик растворной составляющей.

Расчет напряжений сжатия в цементной прослойке ведем исходя из

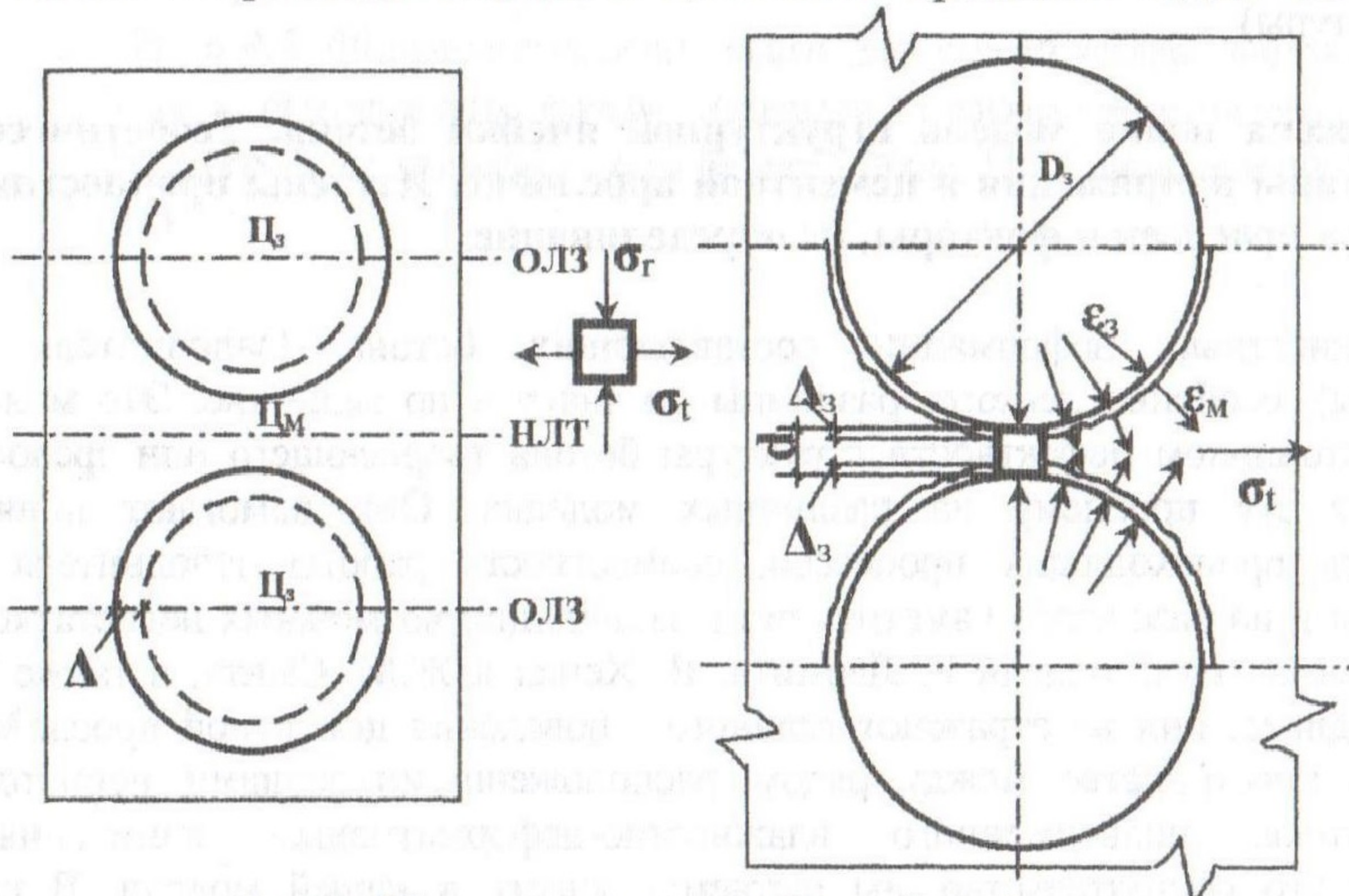


Рис. 1. Модель структурной ячейки бетона.

Π_3 – центральная точка ядра заполнителя; $\Pi_м$ – то же, матрицы; ОЛЗ – осевая линия заполнителя; НЛГГ – нейтральная линия теста (матрицы); Δ – величина натяга матрицы; σ_r , σ_t – радиальное и тангенциальное напряжения в матрице; $\epsilon_3, \epsilon_м$ – деформации заполнителя и матрицы; d – толщина цементной прослойки; Δ_3 – величина продольного перемещения набухающего заполнителя.

следующих соображений. Два соседних, набухающих зерна пористого заполнителя, с исходным радиусом r_3 или диаметром D_3 , сжимают, находящуюся между ними, цементную прослойку. При этом величина сжимаемости цементной прослойки $\delta_{ц}$ равна двум величинам продольного перемещения каждого из зерен заполнителя от их набухания, Δ_3 , т.е. $\delta_{ц} = 2\Delta_3$. Всестороннее набухание заполнителя сопровождается увеличением объема $\Delta V: V = [\frac{3}{4}\pi(R_3^3 - r_3^3)] : [\frac{3}{4}\pi r_3^3] = (R_3:r_3)^3 - 1$,

где $R = r_3 + \Delta_3$ – радиус набухающего зерна заполнителя, мм.

Тогда: $\Delta V: V = [(r_3 + \Delta_3):r_3]^3 - 1 = 1 + 3(\Delta_3:r_3) + (\Delta_3:r_3)^2 + (\Delta_3:r_3)^3 - 1$

Пренебрегая 3-м и 4-м членами в правой части уравнения, т.к. квадрат и куб их дают малый вклад, получим: $\Delta V: V = 3\Delta_3:r_3$.

От всестороннего набухания зёрна заполнителя создают в цементной прослойке напряжения сжатия, величину которых можно определить по формуле Л.Ван Флек [1]:

$$\sigma_3 = K(\Delta V:V) = 3K(\Delta_3:r_3),$$

где K – объемный модуль упругости или коэффициент всестороннего сжатия.

Откуда
$$\Delta_3 = (\sigma_3 r_3) : 3K.$$

В цементной прослойке возникают напряжения сжатия согласно:

$$\sigma_r = E \varepsilon_m = E(\delta_{ц} : d),$$

где: ε – относительные деформации цементной прослойки;

E – модуль деформации цементной прослойки, МПа;

d – исходная толщина цементной прослойки между соседними зёрнами заполнителя, мм.

Откуда,
$$\delta_{ц} = (\sigma_r : E)d.$$

Решаем два уравнения $(\sigma_r : E)d = 2[(\sigma_3 r_3) : 3K]$

где: $\sigma_3 : K = \Delta V : V = 3\Delta_3 : r_3$ и $\sigma_r = (2F\sigma_3) : 3Kd$;

где $\varepsilon_3 = \Delta_3 : r_3$ – относительные деформации набухания заполнителя.

Тогда напряжения в цементной прослойке определяют по формуле:

$$\sigma_r = (D_3 : d)E\varepsilon_3.$$

В период твердения бетона зёрна керамзита набухают и, увеличиваясь в объеме, давят на цементные прослойки (ЦП), сжимая их. Если же зёрна керамзита претерпевают усадку, то в цементных прослойках возникают напряжения растяжения. Какова же величина изменений толщины ЦП, если она находится между двумя разными по размерам зёрнами заполнителя? С этой целью изучали три модельные системы: 1) МЗ+МЗ, т.е. между двумя зёрнами керамзита диаметром 5 мм расположена цементная прослойка; 2) МЗ+КЗ – то же, между зёрнами размером 5 и 20 мм, 3) КЗ+КЗ – то же, между двумя зёрнами по 20 мм.

Известна кинетика влажностных деформаций керамзита в цементном тесте [2]. Взяв результаты ее за основу, рассчитаем величины набухания или усадки рядом расположенных зерен керамзита разного размера. А взяв за основу, предложенную автором модель структурной ячейки бетона, определим величины перемещений ЦП при сжатии или растяжении, табл. 1.

Таблица 1.

Кинетика набухания (числитель) или усадки (знаменатель) зерен керамзита и перемещения при сжатии (числитель) или растяжении (знаменатель) цементной прослойки между ними

Возраст образца, сут.	Деформация керамзита в цементном тесте, мм/м	Величины перемещений ЦП, мкм, в модельных ячейках бетона		
		МЗ + МЗ	МЗ + КЗ	КЗ + КЗ
1	0,32/0,22	1,6/1,1	4,2/2,7	6,4/4,4
2	0,49/0,23	2,5/1,5	6,1/2,9	9,8/4,6
4	0,82/0,69	4,1/3,5	10,3/6,6	16,4/13,8
6	0,87/0,62	4,4/3,1	10,9/7,8	17,4/12,4
8	0,70/0,32	3,5/1,6	9,0/4,0	14,0/6,4
10	0,53/0,15	2,6/0,8	0,6/1,9	10,6/3,0

Прочностные характеристики ЦП оценивали по результатам испытания модельных образцов-кубов с ребром 2 см. Прочность при сжатии ($R_{сж}$) образцов и напряжения (σ) в них определяли в период набухания зерен керамзита, т.е. в возрасте до 6 ч, а прочность при разрыве (R_p) – в период усадки керамзита, т.е. в возрасте до 10 ч с момента затворения смеси, табл. 2.

Таблица 2.

Прочностные свойства цементных прослоек

Структурная ячейка бетона	Время разрушения модельного образца, час-мин	Прочность, кПа, образцов				Напряжения, кПа, в ЦП в возрасте, час-мин	
		модельных		контрольных			
		$R_{сж}$	R_p	$R_{сж}$	R_p	3-00	4-15
Свойства ЦП в период набухания, т.е. в возрасте до 6 ч							
МЗ+МЗ	6-00	Не разр.	-	432	-	210	-
МЗ+КЗ	5-00	720	-	363	-	405	-
КЗ+КЗ	3-00	495	-	202	-	447	-
Свойства ЦП в период набухания и усадки, т.е. в возрасте до 10 ч.							
МЗ+МЗ	8-15	-	79	-	57	-	232
МЗ+КЗ	7-00	-	55	-	35	-	395
КЗ +КЗ	4-15	464	-	320	-	-	464

Для сравнения были испытаны контрольные образцы тех же размеров, которые не подвергались деформациям во времени. Их прочность при сжатии и растяжении во времени (τ) составила:

τ , час	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_{сж}$ кПа	51	70	109	294	363	432	500	886	1065	1448
R_p кПа	5	5	15	20	25	29	36	55	76	107

Из-за масштабного фактора величины прочностных характеристик модельных образцов и ЦП нельзя считать одинаковыми. Однако, одинаковая закономерность их изменения, от воздействия изучаемых факторов, не вызывает сомнения. Поэтому мы можем считать, что более долговечной является система структурной ячейки МЗ+МЗ (раствор), менее долговечна МЗ+КЗ (бетон) и хуже КЗ+КЗ (крупнопористый бетон). ЦП последней системы разрушаются почти в 2 раза раньше первой от напряжений сжатия в период набухания керамзита, далеко не достигая его максимальных значений набухания. В ней и напряжения (например, в возрасте 3 ч) почти в 2 раза выше, чем в системе МЗ+МЗ. Чем крупнее зерна керамзита, тем больше дефектов в цементных прослойках. Это говорит о том, что должна существовать оптимальная величина крупности легкого пористого заполнителя, на котором можно получить максимальную прочность легкого бетона. Иными словами, каждой требуемой прочности легкого бетона должна отвечать соответствующая по экономичности фракция крупного заполнителя с оптимальной наибольшей крупностью зёрен. Это особенно важно для получения высокопрочного бетона. Совершенно очевидно, что зёрна керамзита размером около 40 мм должны применяться для бетонов марок до 100, хотя с экономической точки зрения и это допущение сомнительно. Известно, что зерна керамзита состоят из плотной и прочной обожженной корки толщиной около 2 мм и очень пористой и мало прочной сердцевины. И если принять за коэффициент плотности ($K_{пл}$) зёрен отношение объема корки к объему сердцевины, то простые арифметические подсчеты показывают его тесную зависимость от размера зерен керамзита. Например, для зерен керамзита крупностью 40 мм $K_{пл} = 0,33$, а крупностью 10 мм $K_{пл} = 3,64$. Это значит, что 10-ти мм зёрна имеют плотного материала практически в 10 раз больше, чем керамзит диаметром 40 мм. А это дает нам смелость предположить, что для легкого бетона экономически более выгодно выпускать и применять пористый заполнитель с размером зерен не более 20 мм.

Модельные образцы прочнее контрольных почти в 2 раза в одном и том же возрасте. Это трудно понять: мы постоянно сжимаем или растягиваем, как бы послойно сдвигаем, быть может где-то прессуем твердеющий в течение нескольких часов цементный образец, а он не разрушается, а упрочняется. В этом таится какой-то скрытый резерв прочности, который

технологи пока не могут использовать, хотя понятие трибохимии нам известно. Очевидно, твердение цементного теста под постоянно увеличивающейся нагрузкой – это постоянное спрессовывание и самоуплотнение его, смещение зерен цемента друг относительно друга и от этого обнажение новых поверхностей для гидратации и, в итоге, повышение степени гидратации, плотности и прочности цементного камня. Возникает также вопрос: являются ли средства приготовления и вибрации, с существующими параметрами, достойным инструментом уплотнения бетонных смесей, если мы их используем более полувека, а выше марки 500 практически бетона у нас нет? При всестороннем и объемном перетирании смеси эффект выше.

Между гидрофобизированными гранулами керамзита напряжения сжатия в ЦП в возрасте 10 ч составляют, кПа: 96 между МЗ+МЗ, 248 – МЗ+КЗ и 794 между КЗ+КЗ. В этом же возрасте прочность контрольных образцов равна 1430 кПа. Это значит, что запас прочности цементных прослоек составляет от 1,8 до 15 раз. В этих структурных ячейках бетона прочность модельных (деформируемых во времени) выше прочности идентичных контрольных (не деформируемых во времени) образцов: при сжатии в 1,4...2,4 раза и при растяжении в 1,4...1,6 раза. В самой сложной, по деформативности зерен, структурной ячейке КЗ+КЗ запас прочности минимальный (1,8), что свидетельствует о необходимости гидрофобизировать именно крупный заполнитель. И, наоборот, в структурной ячейке МЗ+МЗ запас прочности очень велик (15 раз) и потому мелкий заполнитель нет смысла гидрофобизировать.

Чем толще ЦП (60, 120 или 180 мкм), тем меньше величины напряжений в них (347, 200 или 98 кПа) и в тем более поздние сроки они разрушаются (4-15, 8-45 или 9ч30мин).

Таким образом, разработана новая модель структурной ячейки бетона, теоретически рассчитаны напряжения в цементной прослойке и экспериментально определены ее прочностные свойства. Дефектность цементных прослоек (цементного камня в бетоне) тем больше, чем крупнее заполнитель, выше влажностные деформации его и меньше толщина ЦП. Поставленные вопросы должны найти свое решение.

/ Литература.

1. Теоретическое и прикладное материаловедение. – М.: Атомиздат, -1975. – 472с.
2. Кучеренко А.А., Выровой В.Н. Набухание и усадка керамзита в структурообразовании бетона. Журнал «Будівельні матеріали та конструкції», 1975, №5, С.42-43.