

УДК 666.972:620.17

Блещик Н.П., Рак А.Н., Рыскин М.Н.

К ПОСТРОЕНИЮ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ УСАДКИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ С ПОЗИЦИЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема определения достоверных значений усадки бетона как на стадии проектирования железобетонных конструкций, так и в процессе их изготовления и возведения в условиях строительной площадки приобретает в последнее время все более важное значение. Усадка бетона в условиях ограничения деформаций «... вызывает появление дополнительных внутренних напряжений, приводящих к микротрещинообразованию структуры, а далее и к образованию в конструкции глобальных трещин, когда усадочные напряжения превосходят прочность бетона на растяжение. Многолетние опытные наблюдения показывают, что практически в любой эксплуатирующейся конструкции могут быть обнаружены трещины различных размеров, что приводит к снижению ее эксплуатационных свойств, а в первую очередь морозостойкости, водонепроницаемости, коррозионной стойкости в агрессивных средах, и, как следствие, к снижению долговечности» [1]. В этой связи исследователи многих стран мира продолжают изучать влияние структурно-технологических и физико-химических факторов на значения деформационных характеристик конструкций, эксплуатирующихся в различных температурно-влажностных условиях, с целью совершенствования методов нормирования усадки бетона и, соответственно, потерь предварительного напряжения арматуры.

Известно, что усадка бетона в значительной степени обуславливается усадкой цементного камня. В этой связи целесообразно начать рассмотрение проблемы усадки бетона с выявления основных закономерностей усадки цементного камня (ЦК).

Достаточно полный анализ различных гипотез и взглядов исследователей на природу усадки цементных композиций и на аналитические методы определения ее нормативных значений приведен в работах [2-8]. Эти методы основаны на результатах обобщения весьма широких экспериментальных исследований. В них, как правило, доминирует феноменологический подход к описанию закономерностей и получению корреляционных зависимостей, действительных лишь для конкретных условий эксперимента. Стремление распространить их на общие случаи собственных деформаций ЦК при усадке зачастую приводит к значительным расхождениям расчетных и опытных значений.

В предлагаемой работе делается попытка представить на обсуждение новые результаты аналитического описания закономерностей деформирования цементного камня в процессе формирования его структуры и влагообмена с окружающей средой. Расчетные модели деформирования получены с использованием основных положений физико-химической механики дисперсных систем [9] и последних достижений химии цемента [10-13 и др.].

2. КРАТКИЙ АНАЛИЗ ТЕОРИЙ И МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИЙ УСАДКИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И БЕТОНА

Деформации усадки ЦК обуславливаются многими физическими и химическими факторами. До сего времени не сложилось единого мнения об относительной важности тех или иных факторов в процессе развития усадочных деформаций на различных стадиях формирования структуры ЦК при отсутствии или наличии возможностей проявления влагообмена с окружающей средой. Среди многочисленных факторов основное внимание уделяется возникновению напряжений от воздействия капиллярных сил (капиллярная усадка), изменению свободной поверхностной энергии у твердых частиц, расклинивающему давлению молекул жидкости и миграции межслоевой воды [11].

Представления Ле Шателье о вкладе капиллярных сил в механизм усадки ЦК и бетона развил Е. Фрейсине [14]. Впоследствии исследования капиллярных явлений проводили А.А. Белов [15, 16], В.В. Михайлов [17] и другие исследователи. По мнению Х. Тейлора [11] «этот эффект существенен в интервале значений относительной влажности 90-45%. Маловероятно, чтобы это было важно при относительной влажности свыше 90%, так как поры, которые опустошаются, широки, а результирующие напряжения-малы. При относительной влажности ниже 45% не может образоваться стабильный мениск». Следовательно, роль капиллярного обжатия в процессе усадки имеет второстепенное значение.

ние. Об этом в более категоричной форме высказывается М.М. Холмянский [18, с.486]. Исходя из результатов анализа структурного трещинообразования он приходит к выводу: «... образование полостей ведет к обезвоживанию капилляров в некоторой окрестности разрыва; области, выполняющие роль связей между зернами макроструктуры бетона, оказываются обезвоженными, и потому усадочного обжатия связей не происходит; усадочное обжатие, если оно все-таки существует, в основном сосредотачивается в зернах модели и не оказывает влияния ни на прочность бетона при растяжении, которая от прочности зерен не зависит, ни на прочность при сжатии, когда имеет значение прочность зерен на сдвиг, и их обжатие большой роли не играет».

Эффект, сопутствующий процессу изменения свободной поверхностной энергии у твердых частиц, зависит от того, насколько плотная упаковка возможна внутри твердой частицы. Он должен быть наибольшим лишь при относительной влажности менее 20% [11].

Расклинивающее давление проявляется в том случае, когда силы притяжения между двумя соприкасающимися поверхностями перевешиваются силами притяжения с молекулами жидкости. Этот эффект может проявляться при набухании цементного камня в процессе повышения влажности окружающей среды.

Эффект миграции межслоевой воды в сущности аналогичен эффекту расклинивающего давления. Он может проявляться в виде движения между или в сторону от поверхности соседних частиц, а также в виде аналогичного движения, включающего слои внутри частиц. «Промежуточной ситуацией может быть движение воды внутрь или наружу из межслоевого пространства к выходам, при которых слои непрерывной структуры скапливаются отдельно» [11, с.323].

Рассмотренные выше факторы обуславливают обратимую влажностную усадку. Кроме нее в процессе химических реакций проявляются химическая или контракционная усадка и корбанизационная усадка.

Химическая усадка проявляется в результате объемных изменений, возникающих в системе «вяжущие - вода» в период образования продуктов гидратации вяжущего. Одной из составляющих химической усадки является аутогенная усадка, определяющая внешнее изменение объема системы. Разность значений химической и аутогенной усадки определяет уменьшение объема твердой фазы внутри системы и образование контракционной пористости. Химическая усадка определяется в условиях закрытой системы, т.е. при отсутствии влагообменных процессов с окружающей средой.

Еще Ю.А. Нилендером [19] было установлено, что химическая усадка в 5...10 раз меньше влажностной усадки. В опытах американских ученых [20] установлено, что образцы из раствора в трехмесячном возрасте имели деформации химической усадки в 3...15 раз меньше, чем образцы - близнецы, хранившиеся на воздухе с проявлением химической и воздушной усадки.

В.В. Некрасов [20, 21] показал, что химическая усадка зависит от химического состава цемента, его удельной поверхности, водоцементного отношения и вида химических добавок. Значение химической усадки пропорционально степени гидратации цемента. Н.А. Мощанский [22] полагает, что химическая усадка обуславливается более широким комплексом физико-химических процессов. С.В. Александровский на основе анализа значений различных видов усадки [3] утверждает, что «... контракционная усадка, несомненно играющая существенную роль в технологии бетона, не имеет практического значения для рассматриваемой нами проблемы усадочных напряжений в бетоне».

Корбанизационная усадка, представляющая собой результат физико-химического взаимодействия углекислого газа с кристаллами гидроокиси кальция, изучалась многими исследователями [23-25]. По мнению Ф.М. Ли [23] корбанизационная усадка «... не играет существенной роли с точки зрения деформации бетона, поскольку процесс карбонизации идет очень медленно и в малой степени, но она приобретает более важное значение в связи с растрескиванием поверхности».

Приведенные выше результаты краткого анализа предложенных видов и механизмов усадки бетона позволяют сделать вывод о том, что для практических целей следует развить теорию химической и влажностной усадки. Этот вывод подтверждается также и тем, что как в европейских [26], так и в республиканских [27] нормах по железобетонным конструкциям учитываются лишь эти два вида усадки. В этой связи рассмотрим их более подробно.

Как отмечалось выше, химическая усадка обуславливается объемными изменениями в цементном камне при формировании его структуры в процессе гидратации вяжущего. Объемные характеристики цементного камня рассмотрены Х. Тейлором [11, с. 298-299] на основе модели структуры затвердевшего теста Пауэрса - Брауньярда [28], уточненной впоследствии Т.С. Пауэрсом [29]. В соответствии с этой моделью затвердевшее тесто в общем случае состоит из трех компонентов: непрореа-

гировавших зерен вяжущего, продуктов гидратации и капиллярных пор. Находящаяся в тесте вода подразделяется на несвязанную, находящуюся в капиллярных и гелевых порах, и связанную, не испаряемую. Масса воды, находящаяся в гелевых порах (гелевая вода), составляет 21,1% от массы гидратированного цемента. Считалось также, что продукты гидратации имеют фиксированное содержание связанной воды, равное 0,227 кг на 1 кг гидратированного цемента, и фиксированный объем гелевых пор — 0,28 от объема продуктов гидратации. По уточненным данным Х. Тейлора этот объем, отнесенный ко всему объему продуктов гидратации, включая СН, составляет 0,30. Плотность порового раствора и гелевой воды принимались равными плотности свободной воды, т.е. $1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Плотность связанной воды принималась равной $1,35 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Объем продуктов гидратации на единицу массы прореагировавшего цемента принято определять из произведения $7,0 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha$, м³/кг, где α — степень гидратации цемента. Отношение объема продуктов гидратации к объему прореагировавшего цемента принято равным 2,20.

Фельдман и Середя [30, 31], рассматривая гель как трехмерное скопление слоев С – S – Н, сделали вывод, что большую часть гелевой воды в модели Пауэрса – Брауньярда составляет межслоевая вода и что ее потеря при сушке обратима. Х. Тейлор утверждает [11, с. 301], что «модель Фельдмана – Середы базировалась на исследованиях сорбционных свойств и связи между содержанием воды и физическими свойствами. Среди предложенных моделей она, единственная, хорошо согласуется с микроструктурными данными и с возможными связями между гелем С – S – Н и кристаллическими соединениями».

Позицию Фельдмана и Середы разделяют многие исследователи. Например, Л.Г. Филатов [13] утверждает, что «молекулы воды связываются поверхностью коллоидных частиц, и образуемая вокруг них сольватная оболочка, обладающая свойствами твердого тела, приводит к увеличению объема частицы». И.Н. Ахвердов [32] считает, что «изменения, вызванные адсорбцией и десорбцией паров воды в кристаллической структуре цементного камня, приводят к изменению микроразмеров всей структуры. При адсорбции паров воды структурные элементы набухают, а вследствие десорбции они претерпевают усадку». Очевидно этот механизм влагообмена испаряемой гелевой воды может быть положен в основу получения аналитических зависимостей самопроизвольных деформаций цементного камня, сопровождающих формирование его структуры.

Приведенные выше характеристики продуктов гидратации принимаются многими исследователями в качестве основополагающих параметров при моделировании структуры цементного камня и расчете его структурно-механических свойств. Однако следует иметь в виду, что они получены в результате исследований свойств затвердевшего цементного теста, приготовленного из цемента одного химического состава, без учета основных положений физико-химической механики дисперсных систем. Это относится прежде всего к количеству связанной воды, объему продуктов гидратации и к плотности гелевой воды.

Влажностная усадка цементных композиций изучалась многими исследователями, например [2, 3, 4, 6, 12, 32]. По результатам их исследований представляется возможным выделить следующие факторы, в той, или иной мере оказывающие влияние на величину влажностной усадки:

- водоцементное отношение;
- геометрические размеры элементов;
- относительная влажность окружающей среды;
- возраст бетона к началу влажностной усадки.

3. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЕФОРМАЦИЙ УСАДКИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Деформации усадки ЦК, как известно, определяются соотношением объема продуктов гидратации вяжущего с объемом исходных компонентов, вступающих в формирование структуры цементного камня.

Объем компонентов композиционного вяжущего, вступающих в гидратацию, зависит от относительного (в единице объема) содержания в вяжущем чисто клинкерного цемента $S_{ц}$ и минеральных добавок $G_{д}$, их плотностей $\rho_{ц}$ и $\rho_{д}$, а также степени гидратаций $\alpha_{ц}$ и $\alpha_{д}$. Кроме того, следует учесть объем воды, вступающей в химическую реакцию, и объем воды, идущей на образование пленок адсорбционно связанной воды на продуктах гидратации. Этот объем записывается в виде суммы объемов отдельных составляющих:

$$V_{\text{пр.г}} = \alpha_{\text{ц}} \frac{G_{\text{ц}}}{\rho_{\text{ц}}} + \alpha_{\text{д}} \frac{G_{\text{д}}}{\rho_{\text{д}}} + \alpha_{\text{ц}} \frac{G_{\text{ц}}(m_{\text{х.с.в}} + m_{\text{г.в}})}{\rho_{\text{в}}} + \alpha_{\text{д}} \frac{G_{\text{д}}(m_{\text{х.с.в}} + m_{\text{г.в}})}{\rho_{\text{в}}},$$

где $m_{\text{х.с.в}}$ — относительная масса воды, вступающей в химическую реакцию с компонентами вяжущего;

$m_{\text{г.в}}$ — относительная масса адсорбционно связанной испаряемой воды геля;

$\rho_{\text{в}}$ — плотность свободной воды, равной $1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Обозначая удельное содержание минеральных добавок в вяжущем как

$$r_{\text{д}} = \frac{G_{\text{д}}}{G_{\text{вяж}}}, \quad (1)$$

где $G_{\text{вяж}}$ — общее содержание вяжущего в единице объема системы, получим выражение объема порудуктов гидратации в виде:

$$V_{\text{пр.г}} = \alpha_{\text{ц}} \frac{G_{\text{вяж}}}{\rho_{\text{ц}}} (1 - r_{\text{д}}) \left(1 + (m_{\text{х.с.в}} + m_{\text{г.в}}) \frac{\rho_{\text{ц}}}{\rho_{\text{в}}} \right) + \alpha_{\text{д}} \frac{G_{\text{вяж}}}{\rho_{\text{д}}} r_{\text{д}} \left(1 + (m_{\text{х.с.в}} + m_{\text{г.в}}) \frac{\rho_{\text{д}}}{\rho_{\text{в}}} \right) \quad (2)$$

В [33] были обобщены многочисленные результаты исследований кинетики гидратации цемента, на основе которых предложено определять степень гидратации в виде произведений четырех функций:

$$\alpha_{\text{ц}} = \phi_{\text{МС}} \cdot \phi_{\text{SO}_3} \cdot \phi_{\text{S}} \cdot \phi_{\text{В/Ц}}, \quad (3)$$

где $\phi_{\text{МС}}$, ϕ_{SO_3} , ϕ_{S} , $\phi_{\text{В/Ц}}$ — функций, учитывающие влияние минералогического состава клинкера, содержание безводного гипса, удельной поверхности цемента, водоцементного отношения цементного теста.

Анализ экспериментальных данных по влиянию различных минералов клинкера на кинетику гидратации цемента при средних содержаниях гипса и щелочей позволил сделать вывод о том, что функция $\phi_{\text{МС}}$ может быть получена в виде:

$$\phi_{\text{МС}} = \frac{K_{1\tau} C_3 A + K_{2\tau} C_4 AF + K_{3\tau} C_3 S + K_{4\tau} C_2 S}{C_3 A + C_4 AF + C_3 S + C_2 S}, \quad (4)$$

в которой $C_3 A$, $C_4 AF$, $C_3 S$, $C_2 S$ — процентное содержание трехкальциевого алюмината, четырехкальциевого алюмоферрита, трехкальциевого силиката и двухкальциевого силиката; $K_{1\tau}$, $K_{2\tau}$, $K_{3\tau}$, $K_{4\tau}$ — их соответствующие временные функциональные коэффициенты, обуславливаемые взаимодействием основных минералов с водой при различной температуре превращения. Эти функциональные зависимости для бездобавочного цемента с удельной поверхностью $320 \text{ м}^2/\text{кг}$ при водоцементном отношении цементного теста 0,5, нормальных условиях твердения ($t = 20 \pm 2^\circ \text{C}$) и при $1 \leq \tau \leq 28$ сут. удалось представить в следующих видах:

$$K_1 = (0,52 + 0,4(1 - e^{-0,53(\tau-1)})) \cdot (1 - \frac{C_3 S - 8}{52} (0,1 + 0,05(1 - e^{-0,38(\tau-1)}))); \quad (5)$$

$$K_2 = (0,2 + 0,3(1 - e^{-0,36(\tau-1)})) \cdot (1,1 + 7,5 \cdot 10^{-3} (68 - C_3 S)); \quad (6)$$

$$K_3 = (0,25 + 0,55(1 - e^{-0,256(\tau-1)})) \cdot (K - 0,458 \cdot (K - 1)(\tau - 1)^{0,237}), \quad (7)$$

где $K = 1,15 + 0,1 \text{ ГМ}$ и ГМ — глиноземистый модуль, который для большинства цементов может определяться по формуле:

$$\text{ГМ} = 0,64 + 1,147 \frac{C_3 A}{C_4 AF}; \quad (8)$$

$$K_4 = (0,1 + 0,42(1 - e^{-0,047(\tau-1)})) \cdot ((0,4 + 0,465(1 - e^{-0,435(\tau-1)})) \times (1 - \frac{C_3 A - 1}{40}) + \frac{C_3 A - 1}{40}). \quad (9)$$

Другие функции, входящие в (3), определяются по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{\text{SO}_3} &= A + B \text{SO}_3; \\ A &= A_1 \frac{C_3 A - 2}{12} + A_2 \left(1 - \frac{C_3 A - 2}{12}\right); \\ B &= B_1 \frac{C_3 A - 2}{12} + B_2 \left(1 - \frac{C_3 A - 2}{12}\right); \\ A_1 &= 0,935 + 5,8 \cdot 10^{-2} (1 - e^{-0,75(\tau-1)}); \\ A_2 &= 0,803 + 0,144 (1 - e^{-0,3(\tau-1)}); \\ B_1 &= 0,043 - 3,75 \cdot 10^{-2} (1 - e^{-0,75(\tau-1)}); \\ B_2 &= 0,132 + 0,0975 (1 - e^{-0,3(\tau-1)}); \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\varphi_s = 1 + (0,815 - 0,63(1 - e^{-0,1(\tau-1)}))(1 - e^{-4,2 \cdot 10^{-3}(S_{\text{уд}} - 320)}), \quad (11)$$

где $S_{\text{уд}}$ — удельная поверхность цемента в м²/кг, определяемая по ГОСТ 310.2-76, или по формуле:

$$S_{\text{уд}} = \frac{0,126 \cdot 10^{-3}}{\rho_{\text{ц}} \left(0,384 - \frac{K_{\text{н.г}} - K_{\text{д.г}} r_{\text{д.г}}}{1 - r_{\text{д}}}\right)}, \text{ м}^2/\text{кг}, \quad (12)$$

в которой $r_{\text{д.г}}$ — относительное массовое содержание i -ой минеральной добавки в цементе;

$r_{\text{д}}$ — суммарное относительное содержание минеральных добавок в цементе;

$K_{\text{д.г}}$ — коэффициенты для конкретных видов минеральных добавок, принимаемые равными:

для шлака $K_{\text{д.шл}} = 0,37$;

для трепела $K_{\text{д.тр}} = 0,31$;

для опоки $K_{\text{д.оп}} = 0,49$;

для пемзы $K_{\text{д.п}} = 0,6$.

$$\varphi_{\text{в/ц}} = 1 + 1,5 \cdot 10^{-2} \left(1 - \exp\left(10 \left(0,5 - \frac{B - B_{\text{п}}}{\text{Ц}}\right)\right)\right), \quad (13)$$

где $(B - B_{\text{п}})/\text{Ц}$ — водоцементное отношение в бетонной смеси без учета воды, поглощенной заполнителем.

При твердении бетона в температурно-влажностных условиях, отличных от нормальных, степень гидратации цемента должна определяться с учетом влияния температуры по формуле:

$$\alpha_t = \alpha K_t, \quad (14)$$

где K_t — температурная зависимость степени гидратации цемента, определяемая по формулам:

при $0 \leq t \leq 20^\circ\text{C}$

$$K_t = 2^{\frac{t-20}{\xi}}, \quad (15)$$

в которой ξ — характерная температурная разность, °C, принимаемая для пуццолановых портландцементов равной 4,3 и для портландцементов с минеральными добавками шлака и трепела вычисляемая по формуле:

$$\xi = 11,7 - 16,5 r_{\text{д}}, \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (16)$$

при $20 \leq t \leq 100^\circ\text{C}$

$$K_t = \frac{1 + 0,5(1 - \exp(-0,16(t - 20)))}{\eta_t^2 + \frac{K^{(1-\eta_t^3)}}{t}}, \quad (17)$$

где η_t — вязкость воды при температуре $t^\circ\text{C}$, Па С 10³;

K — коэффициент, учитывающий влияние технологических факторов и вида цемента на скорость гидратации, °C ($K = 4$ для портландцемента; $K = 3$ для портландцемента с пуццолановой добавкой 4-5%; $K = 0$ для портландцемента с пуццолановой добавкой 10-14%; $K = -3$ для пуццолановых портландцементов; $K = -2$ для шлакопортландцементов).

Для портландцементов с другим содержанием минеральных добавок трепела и шлака коэффициент K следует вычислять по формуле:

$$K = 4 - 15 r_{\text{д}}, \quad (18)$$

Пределы степени гидратации цемента должны определяться по формулам:

$$\alpha_{пр,1} = 0,167 S_{уд}^{0,263}; \quad (19)$$

$$\alpha_{пр,2} = \left(\frac{B - B_p \rho_{ц}}{\Pi} + m_{в.см} \frac{\rho_{ц}}{\Pi} \right) / \left(1,25 \frac{\rho_{ц}}{\rho_r} - 1 \right), \quad (20)$$

где ρ_r — плотность геля, 1764 кг/м³ [28];

$m_{в.см}$ — относительное содержание воздуха в бетонной смеси.

Полученные зависимости степени гидратации цемента действительны для бездобавочных бетонов. Однако при введении в бетон химических добавок степень гидратации может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от вида добавок. Поэтому для бетона, модифицированного химическими добавками, степень гидратации цемента должна определяться по формуле:

$$\alpha_m = K_{пл} K_y \alpha, \quad (21)$$

где $K_{пл}, K_y$ — коэффициенты, зависящие от вида пластификаторов и ускорителей твердения, а также от времени гидратации. Для добавок С-3 и ПВК определяются по формулам:

для С-3
$$K_{пл} = 0,92 - 6,3 \cdot 10^{-3} (\tau - 1); \quad (22)$$

для CaCl₂, ПВК
$$K_y = 1,4 - 1,1 \cdot 10^{-2} (\tau - 1), \quad (23)$$

где τ — возраст ЦК в сутках.

Установлено также, что для ЦК, модифицированного добавкой С-3, степень гидратации не зависит от водоцементного отношения и поэтому значение коэффициента $\phi_{вц}$ должно приниматься равным единице.

Степень гидратации минеральных добавок α_d при отсутствии достоверных данных допускается для $\tau = 28$ сут. принимать равным 0,1.

Относительное количество химически связанной воды $m_{х.с.в}$ предлагается в [11] принимать равным 0,227 от массы гидратированного цемента. Однако его значение зависит от минералогического состава, т.е. от степени гидратации и количества воды, связываемой каждым минералом. Поэтому в [34] предложено значение $m_{х.с.в}$ определять по формуле:

$$m_{х.с.в} = \frac{0,4K_1 C_3 A + 0,114K_2 C_4 AF + 0,231K_3 C_3 S + 0,155K_4 C_2 S}{(C_3 A + C_4 AF + C_3 S + C_2 S) \phi_{мс}}, \quad (24)$$

где обозначения те же, что и в (4).

Плотность цемента допускается определять по формуле:

$$\rho_{ц} = \frac{3040C_3 A + 3770C_4 AF + 3150C_3 S + 3280C_2 S}{C_3 A + C_4 AF + C_3 S + C_2 S} \quad (25)$$

Количество адсорбционно связанной воды зависит от удельной поверхности геля и влажности окружающей среды. По данным [28], обобщенным Х. Тейлором [11], значение $m_{г.в}$ для насыщенного состояния можно принять равным 0,211 от массы гидратирующего вяжущего. Эти данные получены в результате исследований цементных композиций, в которых отсутствовали химические модификаторы. Введение в цементное тесто химических добавок, в особенности поверхностно активных веществ — супер- и гиперпластификаторов, очевидно изменит толщину межслоевой воды и, соответственно, значение $m_{г.в}$. В этой связи, в общем виде следует определять относительное содержание гелевой воды в насыщенном состоянии с учетом коэффициента модификации K_m , определяемого по экспериментальным данным, т.е.

$$m_{г.в} = 0,211 K_m. \quad (26)$$

При высыхании цементного камня количество адсорбционно связанной воды будет уменьшаться с уменьшением относительной влажности окружающей среды RH. Следовательно, при определении количества гелевой воды в процессе высыхания следует вместо $m_{г.в} = 0,211 K_m$ применять зависимость

$$m_{г.в} = 0,211 K_{RH} K_m, \quad (27)$$

где K_{RH} — функциональный коэффициент, определяемый по экспериментальным данным. Его зависимость будет представлена ниже.

Объем геля образуется из истинного объема продуктов гидратации вяжущего, $V_{к.г}$, объема гелевых пор, $V_{п.г}$ и объема гелевой воды, $V_{г.в}$, т.е.

$$V_{г.г} = V_{к.г} + V_{п.г} + V_{г.в}. \quad (28)$$

Зависимость $V_{к.г}$ из простых соображений записана в виде:

$$\rho_{к.г} = \frac{\alpha_{ц} G_{вяж} (1-r_d)(1+m_{х.с.в}) + \alpha_{д} G_{вяж} r_d (1+m_{х.с.в})}{\rho_{к.г}}, \quad (29)$$

где $\rho_{к.г}$ — плотность кристаллов геля в соответствии с [34] определяется по формуле:

$$\rho_{к.г} = \frac{((1-r_d)\alpha_{ц} + r_d\alpha_{д})m_{х.с.в}}{(1-r_d)\alpha_{ц} + r_d\alpha_{д} + ((1-r_d)\alpha_{ц} + r_d\alpha_{д})m_{х.с.в}}, \quad (30)$$

где $\rho_{х.с.в}$ — плотность химически связанной, равная 1351 кг/м³ [11].

Ранее отмечалось, что пористость геля составляет 30% от объема продуктов гидратации. В соответствии с этим нами принято, что:

$$V_{п} = 0,3V_{пр.г} \quad (31)$$

С учетом (27) формула для определения объема гелевой воды записана в виде:

$$V_{г.в} = (\alpha_{ц} G_{вяж} (1-r_d) + \alpha_{д} G_{вяж} r_d) 0,211 K_{RH} K_m / \rho_{г.в}, \quad (32)$$

где $\rho_{г.в}$ — плотность гелевой воды, принимаемая равной $2 \cdot 10^3$ кг/м³, по следующим предпосылкам.

В [11, 28] принимается плотность межслоевой воды равной $1 \cdot 10^3$ кг/м³. При этом отмечается, что толщина слоя или пленки на поверхности кристаллов составляет менее 0,05 мкм. Эта, физически связанная вода, существенно отличается от свободной воды. Ее свойства ближе соответствуют свойствам твердого тела. Она обладает определенной упругостью и значительной прочностью на сжатие [35]. Зависимость плотности пленочной прочно связанной воды получена в работе [36] на основе результатов исследований объемных изменений цементного теста с учетом закономерностей функционального распределения в поверхностных слоях [37]. При этом было установлено, что плотность физически связанной воды на поверхности частиц цемента при толщине пленки менее 0,05 мкм составляет $2 \cdot 10^3$ кг/м³.

После получения зависимостей объема новообразований (геля), V_g и объема продуктов, вступающих в гидратацию, $V_{пр.г}$ общая (контракционная) усадка определится как их разность:

$$\epsilon_{о.у.ц.к} = V_g - V_{пр.г} \quad (33)$$

Внешнее изменение объема системы (аутогенная усадка) будет соответствовать химической усадке до наступления момента, при котором гель полностью заполнит пространство в зоне контакта зерен цемента. Это состояние 1 наступит при некотором значении степени гидратации вяжущего $\alpha_{вяж.1}$, которое можно определить из выражения

$$\alpha_{вяж.1} = \frac{\frac{4}{3}\pi r_{вяж}^3 - \frac{4}{3}r_{я.вяж}^3}{\frac{4}{3}\pi r_{вяж}^3} = 1 - \left(\frac{r_{я.вяж}}{r_{вяж}} \right)^3, \quad (34)$$

где $r_{вяж}$ — условный радиус зерен вяжущего, соответствующий его удельной поверхности, определяемой по формуле [36]:

$$r_{вяж} = \frac{3}{S_{у.вяж} \cdot \rho_{вяж}}, \quad (35)$$

где $S_{у.вяж}$ и $\rho_{вяж}$ — соответственно удельная поверхность и плотность композиционного вяжущего, определяемые по формулам:

$$S_{у.вяж} = \frac{S_{у.ц} G_{ц} / \rho_{ц} + S_{у.д} G_{д} / \rho_{д}}{G_{ц} / \rho_{ц} + G_{д} / \rho_{д}} = \frac{S_{у.ц} + S_{у.д} r_d \rho_{ц} / (1-r_d) \rho_{д}}{1 + r_d \rho_{ц} / (1-r_d) \rho_{д}}, \quad (36)$$

$$\rho_{вяж} = \frac{\rho_{ц} + r_d \rho_{ц} / (1-r_d)}{1 + r_d \rho_{ц} / \rho_{д} (1-r_d)}. \quad (37)$$

Значение условного радиуса частиц вяжущего $r_{я.вяж}$ оставшегося после гидратации до $\alpha_{вяж.1}$, определим исходя из предпосылки о том, что процесс гидратации до степени $\alpha_{вяж.1}$ обуславливается количеством воды, иммобилизованной зернами вяжущего. Выражение для определения количества этой воды записано исходя из простых геометрических представлений в виде

$$V_{г.в.1} = \frac{4}{3} \pi \left(r_{\text{вяж}} + \delta_{\text{пл.вяж}} \rho_{\text{пл}} / \rho_{\text{в}} + \varphi_{\text{к}} \delta_{\text{к.вяж}} \right)^3 - \frac{4}{3} \pi r_{\text{вяж}}^3 \frac{G_{\text{вяж}}}{\rho_{\text{вяж}}} =$$

$$= \left(\frac{r_{\text{вяж}} + \delta_{\text{пл.вяж}} \rho_{\text{пл}} / \rho_{\text{вяж}} + \varphi_{\text{к}} \delta_{\text{к.вяж}}}{r_{\text{вяж}}} - 1 \right) \times \frac{G_{\text{вяж}}}{\rho_{\text{вяж}}} \quad (38)$$

где $\delta_{\text{пл.вяж}}$ — толщина пленки связанной воды на зернах вяжущего;

$\delta_{\text{к.вяж}}$ — половина толщины капиллярного манжета на зернах вяжущего;

$\varphi_{\text{к}}$ — функция приведения капиллярных манжетов на зернах вяжущего к пленке средней толщины;

$\rho_{\text{пл}}$ — плотность связанной воды.

С другой стороны этот объем воды может быть записан в виде:

$$V_{г.в.1} = V_{г.вяж.1} \rho_{\text{вяж}} (m_{\text{х.с.в}} + m_{\text{г.в}}) / \rho_{\text{в}} \quad (39)$$

Из (38) и (39) получаем:

$$V_{г.вяж.1} = \left(\left(\frac{r_{\text{вяж}} + \delta_{\text{пл.вяж}} \rho_{\text{пл}} / \rho_{\text{вяж}} + \varphi_{\text{к}} \delta_{\text{к.вяж}}}{r_{\text{вяж}}} - 1 \right) \frac{G_{\text{вяж}} \rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{вяж}}^2 (m_{\text{х.с.в}} + m_{\text{г.в}})} \right)^3 \quad (40)$$

где $V_{г.вяж.1}$ — объем гидратированного вяжущего на первой стадии гидратации (до значения $\alpha_{\text{вяж.1}}$), который может быть представлен также в виде:

$$V_{г.вяж.1} = \frac{4}{3} \pi (r_{\text{вяж}}^3 - r_{\text{вяж.м}}^3) \frac{G_{\text{вяж}}}{\rho_{\text{вяж}}} \quad (41)$$

Приравняв выражения (40) и (41) и выполнив ряд преобразований, получим зависимость функции $\varphi_{\alpha.1}$ в виде:

$$\varphi_{\alpha.1} = \left(\frac{r_{\text{вяж.м}}}{r_{\text{вяж}}} \right)^3 = 1 - \left(\left(\frac{r_{\text{вяж}} + \delta_{\text{пл.вяж}} \rho_{\text{пл}} / \rho_{\text{в}} + \varphi_{\text{к}} \delta_{\text{к.вяж}}}{r_{\text{вяж}}} - 1 \right) \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{вяж}} (m_{\text{х.с.в}} + m_{\text{г.в}})} \right)^3 \quad (42)$$

С учетом (34) зависимость степени гидратации $\alpha_{\text{вяж.1}}$ записана в виде:

$$\alpha_{\text{вяж.1}} = \left(\left(\frac{r_{\text{вяж}} + \delta_{\text{пл.вяж}} \rho_{\text{пл}} / \rho_{\text{в}} + \varphi_{\text{к}} \delta_{\text{к.вяж}}}{r_{\text{вяж}}} - 1 \right) \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{вяж}} (m_{\text{х.с.в}} + m_{\text{г.в}})} \right)^3 \quad (43)$$

Геометрические параметры иммобилизованной воды зернами вяжущего для цементного теста в отсутствии химических добавок и приближенно для модифицированного цементного теста могут определяться по зависимостям, представленным в [36]:

$$\delta_{\text{пл.вяж}} = (0,395 - K_{\text{н.г.вяж}}) \cdot 10^{-6}, \text{ м}; \quad (44)$$

$$\delta_{\text{к.вяж}} = ((0,44 - 25(K_{\text{н.г.вяж}} - 0,23))^2 \left(\frac{B - B_{\text{п}}}{G_{\text{вяж}} \cdot K_{\text{н.г.вяж}}} + 1 - \frac{B - B_{\text{п}}}{G_{\text{вяж}} \cdot K_{\text{н.г.вяж}}} \max \right) \cdot 10^{-6}, \text{ м}; \quad (45)$$

$$\frac{B - B_{\text{п}}}{G_{\text{вяж}} \cdot K_{\text{н.г.вяж}}} \max = 2,4 - 2,6 K_{\text{н.г.вяж}}; \quad (46)$$

$$\frac{B - B_{\text{п}}}{G_{\text{вяж}} \cdot K_{\text{н.г.вяж.м}}} \max = 2,15 - 2,35 K_{\text{н.г.вяж.м}} \quad (47)$$

где $K_{\text{н.г.вяж}}$ — коэффициент нормальной густоты композиционного вяжущего;

$K_{\text{н.г.вяж.м}}$ — то же модифицированного вяжущего;

Плотность пленочной воды определяется по формуле:

$$\rho_{\text{пл.вяж}} = 10^3 + \frac{5 \cdot 10^{-5}}{\delta_{\text{пл.вяж}}}, \text{ кг/м.} \quad (48)$$

Функцию φ_k найдем из геометрических соотношений модели цементного теста, представленных в [36], из которых с определенной степенью приближения можно принять линейную зависимость φ_k от характеристики водосодержания цементного теста $X_T = (B - B_p) / K_{\text{н.г.вяж}}$. Причем в предельных состояниях $X_T = 0,9$ и $X_T = X_{T,\text{max}}$ функция φ_k принимает соответственно значения 0,1 и 0,7. Исходя из этих предпосылок функция φ_k записана в виде:

$$\varphi_k = 0,1 + 0,6 \frac{(B - B_p) / K_{\text{н.г.вяж}} - 0,9}{\frac{B - B_p}{K_{\text{н.г.вяж}}} - \text{max} - 0,9} \quad (49)$$

После первого периода гидратации вяжущего внешнее изменение объема системы будет обуславливаться, по-видимому, лишь уплотнением структуры геля в зоне контакта зерен вяжущего. Процесс образования геля в межзерновом пространстве будет сопровождаться внутренней контракцией, вызываемой ограничением свободы деформацией. Общие зависимости объемных деформаций цементного камня представлены на рис. 1.

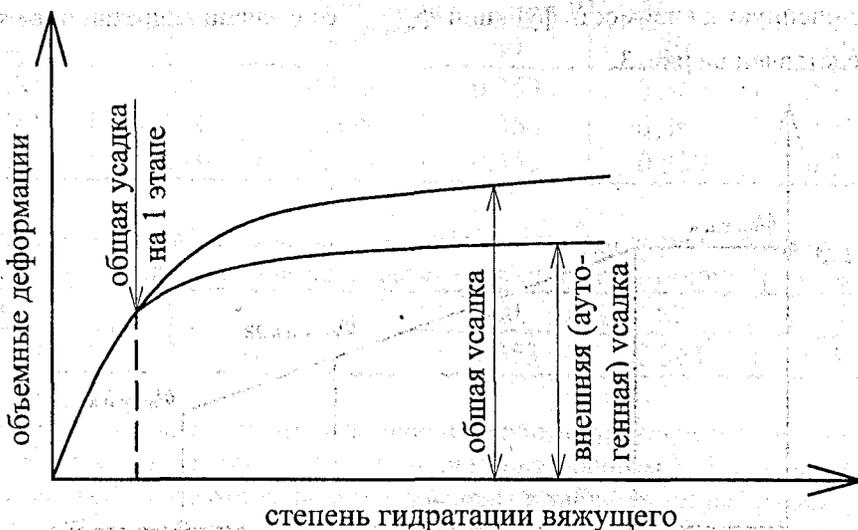


Рисунок 1 – Соотношение между общей и внешней усадками цементного камня

Обозначим отношение внешней (аутогенной) к общей усадке цементного камня функцией $\varphi_{\text{вн.у.ц.к}}$. Как видно из рис. 1, $\varphi_{\text{вн.у.ц.к}}$ при $\alpha_{\text{вяж}} > 1$ уменьшается от единицы до некоторого предела, соответствующего предельному значению $\alpha_{\text{вяж}}$.

Как следует из представленных выше зависимостей $\alpha_{\text{вяж}}$, ее значение при прочих равных условиях увеличивается с увеличением значений $\frac{B - B_p}{G_{\text{вяж}}}$, т.к. при увеличении $\frac{B - B_p}{G_{\text{вяж}}}$ увеличивается $\delta_{\text{к.вяж}}$. Следовательно, функция $\varphi_{\text{вн.у.ц.к}}$ также будет зависеть от водоцементного отношения цементного камня.

Анализ результатов исследований, представленных в работе [38, 39], позволил установить, что значения $\varphi_{\text{вн.у.ц.к}}$ для цементного камня с В/Ц = 0,3; 0,4; 0,5, твердеющего в течение 28 сут, составляют соответственно 0,538; 0,709 и 0,867. Как видно из рис. 2, график этой функции имеет линейный характер и может быть описан зависимостью:

$$\varphi_{\text{вн.у.ц.к}28} = 0,05 + 1,63(B - B_p) / \text{Ц}. \quad (50)$$

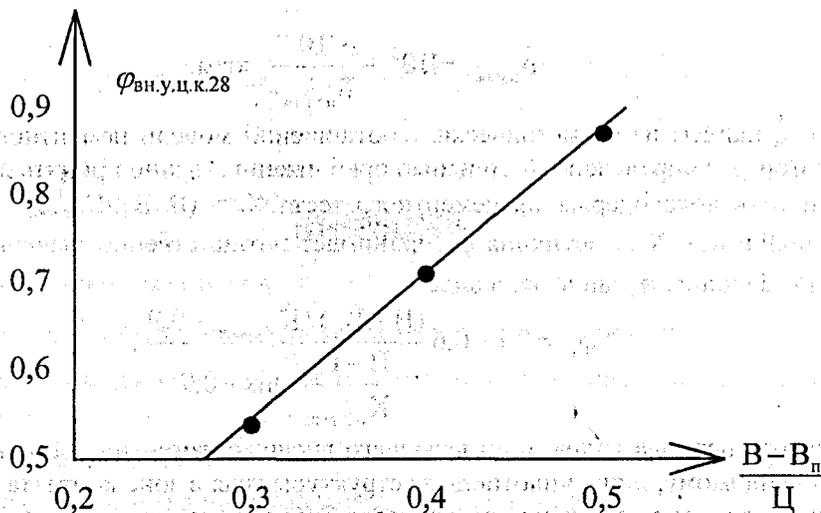


Рисунок 2 – Зависимость $\varphi_{\text{вн.у.ц.к}}$ от водоцементного отношения.

Принимая линейную зависимость функции $\varphi_{\text{вн.у.ц.к}}$ от степени гидратации вяжущего, её график в общем виде представлен на рис. 3.

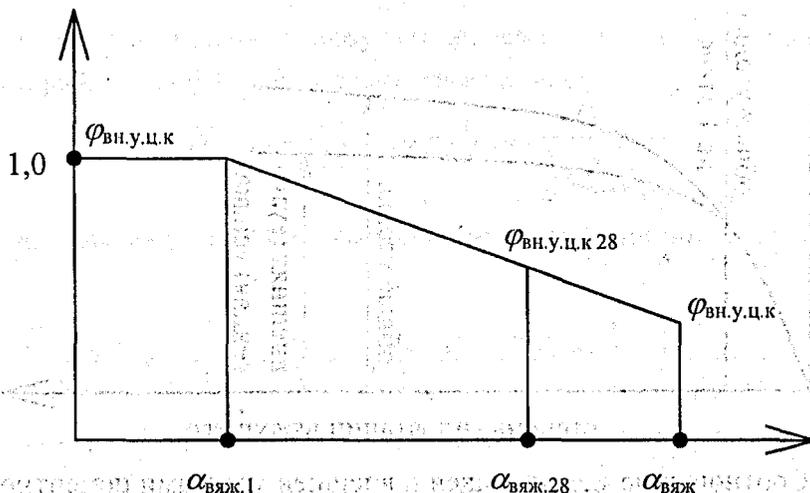


Рисунок 3 – Общий вид зависимости $\varphi_{\text{вн.у.ц.к}}$ от $\alpha_{\text{вяж.}}$.

Представленная на рис. 3 зависимость $\varphi_{\text{вн.у.ц.к}}$ записана в виде:

$$\varphi_{\text{вн.у.ц.к}} = 1 - (1 - \varphi_{\text{вн.у.ц.к.28}}) \frac{\alpha_{\text{вяж.}} - \alpha_{\text{вяж.1}}}{\alpha_{\text{вяж.28}} - \alpha_{\text{вяж.1}}} \leq 1. \quad (51)$$

С учетом функции $\varphi_{\text{вн.у.ц.к}}$ внешнее изменение объема цементного камня (аутогенная усадка) должна определяться по формуле:

$$e_{\text{вн.у.ц.к}} = (V_{\text{г}} - V_{\text{пр.г}}) \varphi_{\text{вн.у.ц.к}}. \quad (52)$$

Соответственно линейная усадка составит:

$$\epsilon_{\text{ц.к}} = \frac{1}{3} (V_{\text{г}} - V_{\text{пр.г}}) \varphi_{\text{вн.у.ц.к}}. \quad (53)$$

В соответствии с (27) относительное количество гелевой воды $m_{\text{г.в}}$ определяется с учетом функционального коэффициента K_{RH} , зависящего от относительной влажности среды. Для определения зависимости $K_{\text{RH}} = \varphi(\text{RH})$ воспользуемся экспериментальными данными З.Н. Цилосани [2] по кинетике потери влаги из цементного камня при изменении относительного давления пара от 0 до 1 и

соответствующей линейной внешней усадки. Эти данные, пересчитанные относительно влажности среды, представлены в табл. 1.

Таблица 1 — Линейные деформации внешней усадки цементного камня

В/Ц	Линейная усадка при RH в %, %.						
	0	20	40	60	80	90	97
0,3	-2,89	-2,50	-1,89	-1,55	-1,38	-1,11	0,00
0,4	-3,33	-2,72	-2,17	-1,83	-1,67	-1,44	0,00
0,5	-4,33	-3,44	-2,72	-2,33	-2,17	-2,05	0,00

Для определения значений φ_{RH} на основе опытных данных, приведенных в табл. 1, формулы (2, 28-32) разрешены относительно φ_{RH} . В результате получена следующая зависимость:

$$\varphi_{RH} = \frac{0,7V_{пр.г} - V_{к.г} + 3\alpha_{ц.к.оп} / \varphi_{вн.у.ц.к.28}}{0,211/\alpha_{ц} \cdot \rho_{г.в}} \quad (54)$$

Результаты расчета значений φ_{RH} по (54) приведены в табл. 2.

Таблица 2 — Значения функционального коэффициента φ_{RH}

В/Ц	Значения φ_{RH} при RH в %						
	0	20	40	60	80	90	97
0,3	0,283	0,303	0,335	0,353	0,362	0,376	0,434
0,4	0,281	0,316	0,339	0,354	0,361	0,370	0,432
0,5	0,276	0,310	0,338	0,353	0,359	0,364	0,442

Как следует из данных табл. 2, значения коэффициента φ_{RH} зависят только от относительной влажности среды. Поэтому для аналитических расчетов приняты следующие средние значения:

RH	0	20	40	60	80	90	97
φ_{RH}	0,280	0,310	0,337	0,353	0,361	0,370	0,433

Полученные аналитические зависимости использовались при расчете значений внешней (аутогенной) усадки цементного камня применительно к опытным данным З.Н. Цилосани [2]. Результаты расчета в сопоставлении с опытными данными приведены в таблице 3 и на графике (рис.4), из которых следует вполне удовлетворительная сходимость расчетных и опытных значений.

Таблица 3 — Сравнительные данные расчетных и опытных значений $\epsilon_{ц.к}$

В/Ц	Расчетные / опытные значения $\epsilon_{ц.к}$, % при относительной влажности RH в %						
	0	20	40	60	80	90	97
0,3	-2,94	-2,37	-1,86	-1,55	-1,40	-1,23	-0,009
	-2,89	-2,50	-1,89	-1,55	-1,38	-1,11	0,00
0,4	-3,56	-2,86	-2,23	-1,85	-1,66	-1,45	-0,41
	-3,53	-2,72	-2,17	-1,83	-1,67	-1,44	0,00
0,5	-4,22	-3,44	-2,74	-2,33	-2,12	-1,89	-0,025
	-4,33	-3,44	-2,72	-2,33	-2,17	-2,05	0,00

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные расчетные модели усадки цементного камня с позиций физико-химической механики дисперсных систем основаны на учете трансформаций компонентов цементного камня при деформировании его структуры в процессе гидратации вяжущего. При этом учитываются: минералогический состав клинкера, удельная поверхность цемента, содержание в нем минеральных добавок и химических модификаторов, водоцементное отношение, температурно-влажностные условия твердения. Деформации усадки в затвердевшем цементном камне обуславливаются процессом влагообмена свободной и гелевой воды с окружающей средой. Равновесное содержание влаги в цементном камне,

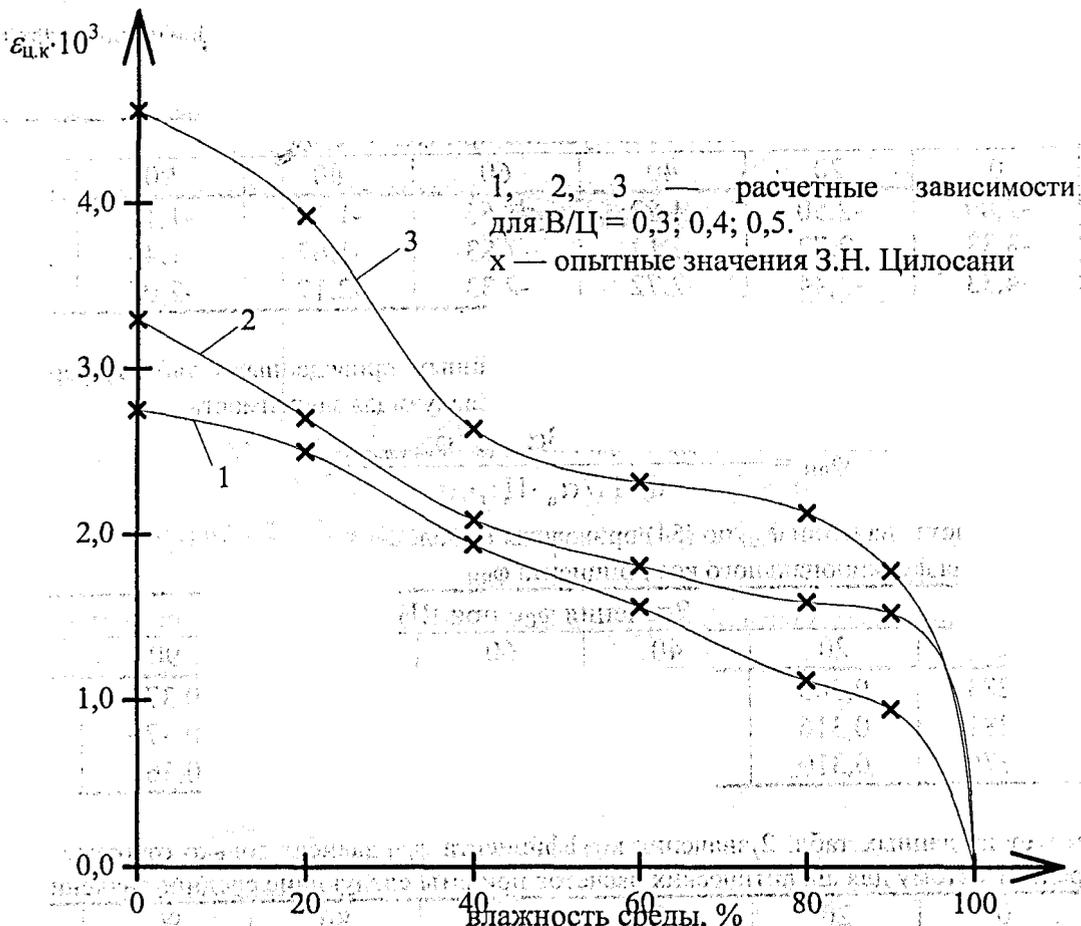


Рисунок 4 – Графики внешней (аутогенной) усадки цементного камня

определяющее уровень его свободных деформаций, определяется относительной влажностью окружающей среды и объемным содержанием геля.

Полученные расчетные модели удовлетворительно коррелируются с опытными данными и могут быть использованы при разработке методик прогнозирования усадки бетона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тур В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного напряжения конструкций при применении напрягающего бетона. - Брест, 1998-245с.
2. Цилосани З.Н. Усадка и ползучесть бетона. - Тбилиси, 1963.
3. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учетом ползучести. - М.: 1973-46с.
4. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. - М.: 1971-208с.
5. Десов А.Е. Некоторые вопросы теории усадки бетона // Ползучесть и усадка бетона и железобетонных конструкций. - М.: 1973.
6. Улицкий И.И. Определение величин деформаций ползучести и усадки бетонов. - Киев, 1963.
7. Voellmy A. Influence du temps sur la deformation du beton // Rizem Bulletin, №9, 1960.
8. Leviant i Einfluss der Betonzusammen-setzung auf daz Swinder // Betonzustein-Zeitung, 30, jg, Н.Ч., 1964.
9. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика. - М.: 1958.
10. Химия цементов. Под редакцией Х.Ф.У. Тейлора. - М.: 1969-501с.
11. Тейлор Х. Химия цемента. - М.: 1996-560с.
12. Красильников В.Г., Скотлинская Н.Н. Физико-механическая природа влажностных деформаций цементного камня // Ползучесть и усадка бетона. - М.: 1974.
13. Филатов Л.Г. Физико-механическая сущность самопроизвольных деформаций твердеющего цемента // В сб. Гидратация и твердение вяжущих.-Уфа, 1978-279-281с.
14. Фрейсине Е. Переворот в технике бетона. - М.: 1938.

15. Белов А.В. К вопросу об исследовании напряженного состояния в бетоне при его усадке // Изв. НИИГ. – Л.: 1941-Т.29.
16. Белов А.В. Опыт математической теории усадки бетона // Изв. НИИГ. – Л.: 1948-Т.35.
17. Михайлов В.В. Растяжимость бетона в условиях свободной и связанной деформации // Исследования прочности, пластичности и ползучести строительных материалов. – М.: 1955.
18. Холминский М.М. Бетон и железобетон. Деформативность и прочность. – М.: 1997- с 483-487.
19. Нилендер Ю.А. Исследование деформаций и температурного режима в теле плотины Днепроостроя. – М.: 1993.
20. Некрасов В.В. Изменение объема системы при твердении гидравлических вяжущих. Изд. АН СССР. ОТН, №6, 1945:
21. Некрасов В.В. Кинетика гидратации цементов различных типов // ЖПХ, Т. XXI, №3, 1948.
22. Мошанский Н.А. Плотность и стойкость бетонов. – М.: 1951.
23. Ли Ф.М. Химия цемента и бетона. – М.: 1961.
24. Powers Т.С. Journal of Portland Cement Assos, Res. and Dev. Lab. Vol. Ч, №2, 1962.
25. Силаенков Е.С., Тихомиров Г.В. и др. Влияние карбонизации автоклавных ячеистых бетонов на их долговечность. // В сб. Вопросы долговечности ячеистых бетонов и изделий из них. – Свердловск, 1962.
26. EN 1992-2-1, Eurocodez “Desing of concrete structures. Part 1: General Rules and Rules for Building.” – Com-mission of European Communities, Des 1991. p. 253.
27. СНБ 5.03.01-02 «Бетонные и железобетонные конструкции». – Мн.: 2003-139с.
28. Powers Т.С. and Brownyard T.L. Studies of the Physical Properlies of Hartland Cement Paste (Bull. 22), 999 pp., Portland Cement Association, Chicago (1948); reprinted from J.Am. Coner. Jnst. (proc.) 43, 101, 249, 469, 549, 669, 845, 993, 1947.
29. Powers Т.С., in 4TH JSCC, Vol. 2. 1962-p.577.
30. Feldman R.F. and Sereda P.J. in STH JSCC. Vol. 3. 1969-p.36.
31. Feldman R.F. and Sereda P.J. Engnrg J. 53, 1970.
32. Александровский С.В. О гистерезисе деформаций усадки и набухания бетона при его попеременных высу-шиваниях и увлажнениях // Бетон и железобетон, №9, 1958г.
33. Блещик Н.П., Протько Н.С., Рыскин М.Н. Математические модели кинетики гидратации цемента // В сб. Инженерные проблемы современного бетона и монолитного бетона и железобетона. – Мн. 1997-25-36с.
34. Провести исследование, разработать и внедрить нормативно-техническую документацию, обеспечивающую определение экспрессными методами характеристик физико-механических свойств цемента, рациональное использование его в бетонах с повышением качества и надежности железобетонных конструкций: Отчет о НИР (заключительный) / Ин-т БелНИИС; рук. Н.П. Блещик, - Мн., 1999-230с.
35. Дерягин Б.В. Свойства тонких жидких слоев и их роль в дисперсных системах, вып. 1. – М.: 1937.
36. Блещик Н.П. Структурно -механические свойства и реология бетонной смеси и пресс вакуумбетона. – Мн.: 1977-230с.
37. Русанов А., Куни Ф. Функция распределения в поверхностных слоях / эк ФХ, 1968, т. XII, вып. 5.
38. Несветаев Г.В., Тимонов С.А. О механизме раннего трещинообразования высокопрочных бетонов. / В сб. Бетон и железобетон в третьем тысячелетии. – Ростов-на-Дону, 2000- с266-270.
39. Несветаев Г.В., Тимонов С.А. Усадочные деформации и раннее трещинообразование бетона // Современные проблемы строительного материаловедения: Пятое академ. чтения-Воронеж ВГАСА, 1999

УДК 666.982.2.001.24

Блещик Н.П., Рак А.Н., Рыскин М.Н.

РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ УСАДКИ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

1. ВВЕДЕНИЕ

Важность проблемы определения усадки бетона на стадии проектирования бетонных и железобетонных конструкций отмечалась нами и другими исследователями в статье [1]. В ней приведены расчетные модели усадки цементного камня (ЦК), полученные нами с позиций физико-химической механики дисперсных систем. Расчетные модели учитывают влияние практически всех физико-химических факторов, условий твердения и выдерживания цементных композиций на их величину контракционной и аутогенной усадки. Показана удовлетворительная корреляция расчетных моделей с экспериментальными данными.