

ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ БЕТОНА ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ И ПЛАВУЧИХ СООРУЖЕНИЙ

Мишутин А.В. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

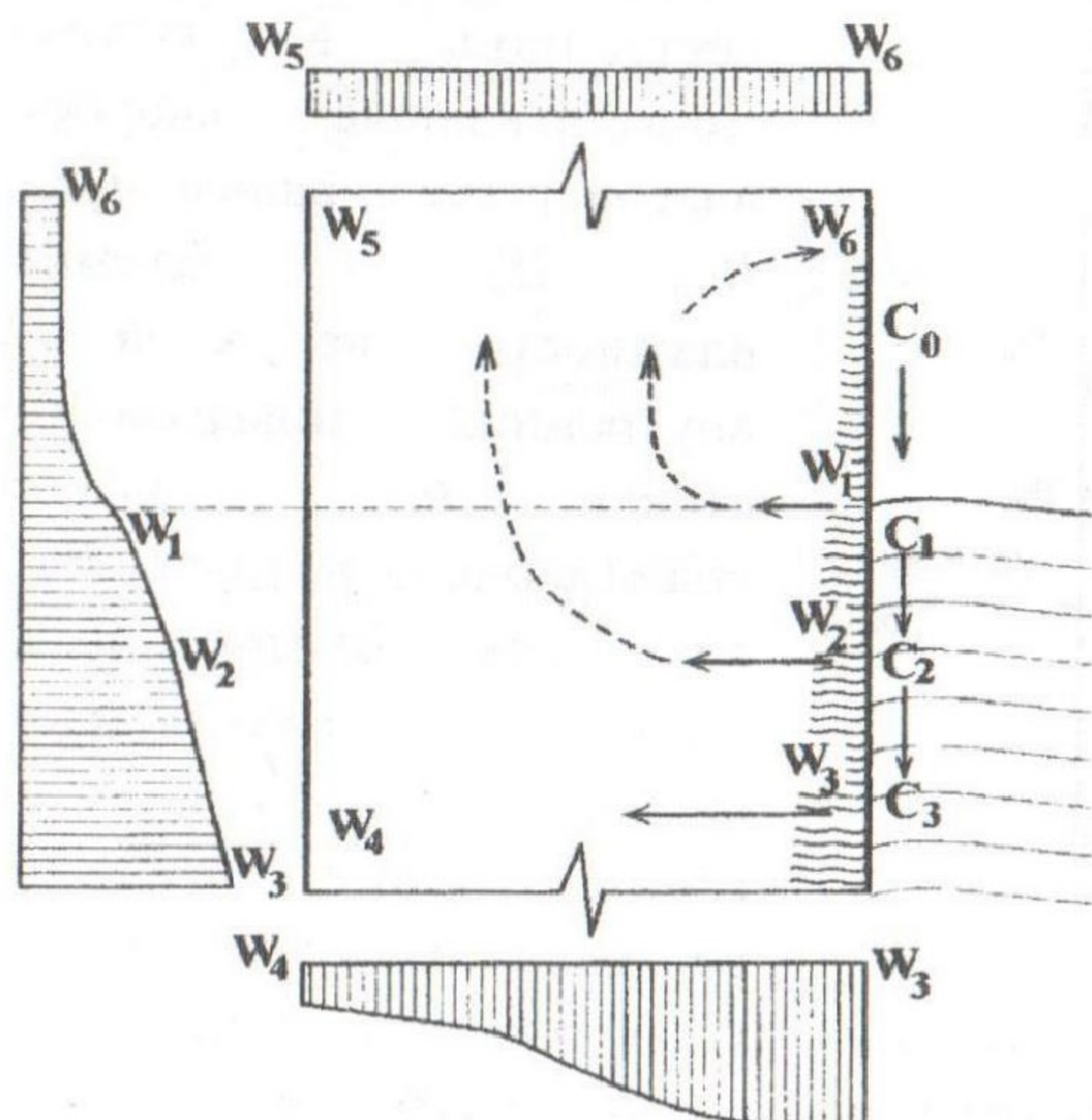
Проанализированы температурно-влажностные деформации, возникающие в материале конструкций тонкостенных гидротехнических и плавучих сооружений. Показано, что долговечность бетона конструкций повышается за счет создания структуры с сетью закрытых мелких пор и капилляров близкого размера с пониженной общей и капиллярной пористостью при дополнительном применении дисперсного армирования.

Строительство новых и реконструкция существующих плавучих и гидротехнических сооружений позволяет решать стратегические задачи для экономики Украины. Основным материалом, применяемым для гидротехнических сооружений, является бетон. Специфика работы материала в конструкциях плавучих сооружений обусловлена односторонним действием на них эксплуатационных нагрузок. Как показал проведенный анализ, к эксплуатационным нагрузкам следует отнести давление и динамические воздействия жидкости и льда, замораживание и оттаивание, увлажнение и высушивание, воздействие солей, обрастание водорослями и живыми организмами, удары, а также частую смену температуры.

Для судостроительных и гидротехнических конструкций характерно неравномерное распределение влажности по высоте. Как показано в работах [1-3] в структуре бетона как материала, организованного по принципу «структура в структуре» («композит в композите») активным структурным составляющим являются технологические трещины (ТТ), внутренние поверхности раздела (ВПР) [4] и капилляры. Соответственно они в первую очередь будут реагировать на воздействия, оказываемые водой. При этом может происходить изменение геометрических характеристик ТТ и ВПР, что вызовет общее изменение структуры материала и, следовательно, его свойств.

Следует также учитывать, что накопление солей ввиду специфики эксплуатационных воздействий среды на плавсооружение происходит неравномерно (рис.1). Наиболее интенсивное накопление солей

происходит в подводной части (C_3 и C_2 на рис.1), постоянно находящейся под напорным (фильтрационным) действием воды. Наиболее характерно данное явление при эксплуатации в морской воде. Достаточно интенсивно накапливаются соли в зоне переменного



уровня воды (C_1 на рис.1). Менее интенсивно, но также достаточно ощутимо ввиду капиллярного переноса влаги соли накапливаются в зоне, примыкающей к уровню воды (C_0).

Рис.1. Схема изменения градиента накопления солей (C) в конструкции плавсооружения с учетом внутренних градиентов влажности за счет напорного и капиллярного переноса влаги (W).

Кристаллизация солей и продуктов коррозии приводит к снижению фильтрации (кольматация пор). Таким образом, в ряде случаев происходит торможение процессов коррозии. Если продукты коррозии имеют малый коэффициент объемного расширения, происходит увеличение прочности бетона, в случае значительного - разрушение, либо процесс стабилизируется [5,6].

Установлено, что процессы коррозии бетона в зоне капиллярного подсоса с последующим испарением воды связаны с двумя взаимосвязанными процессами: влагопереноса и массопереноса сульфатов с учетом связывания их в результате химической реакции [7]. Степень заполнения порового пространства продуктами кристаллизации η определяется из зависимости

$$\eta = \frac{\varepsilon_k + \left(\frac{m_0}{\gamma_0}\right)}{\left(\frac{\psi}{\gamma_k}\right)} \quad (1)$$

где ε_k – начальное значение капиллярной пористости;

γ_0 – объемная масса растворимого компонента цементного камня (CaO);

γ_k – то же, продуктов кристаллизации.

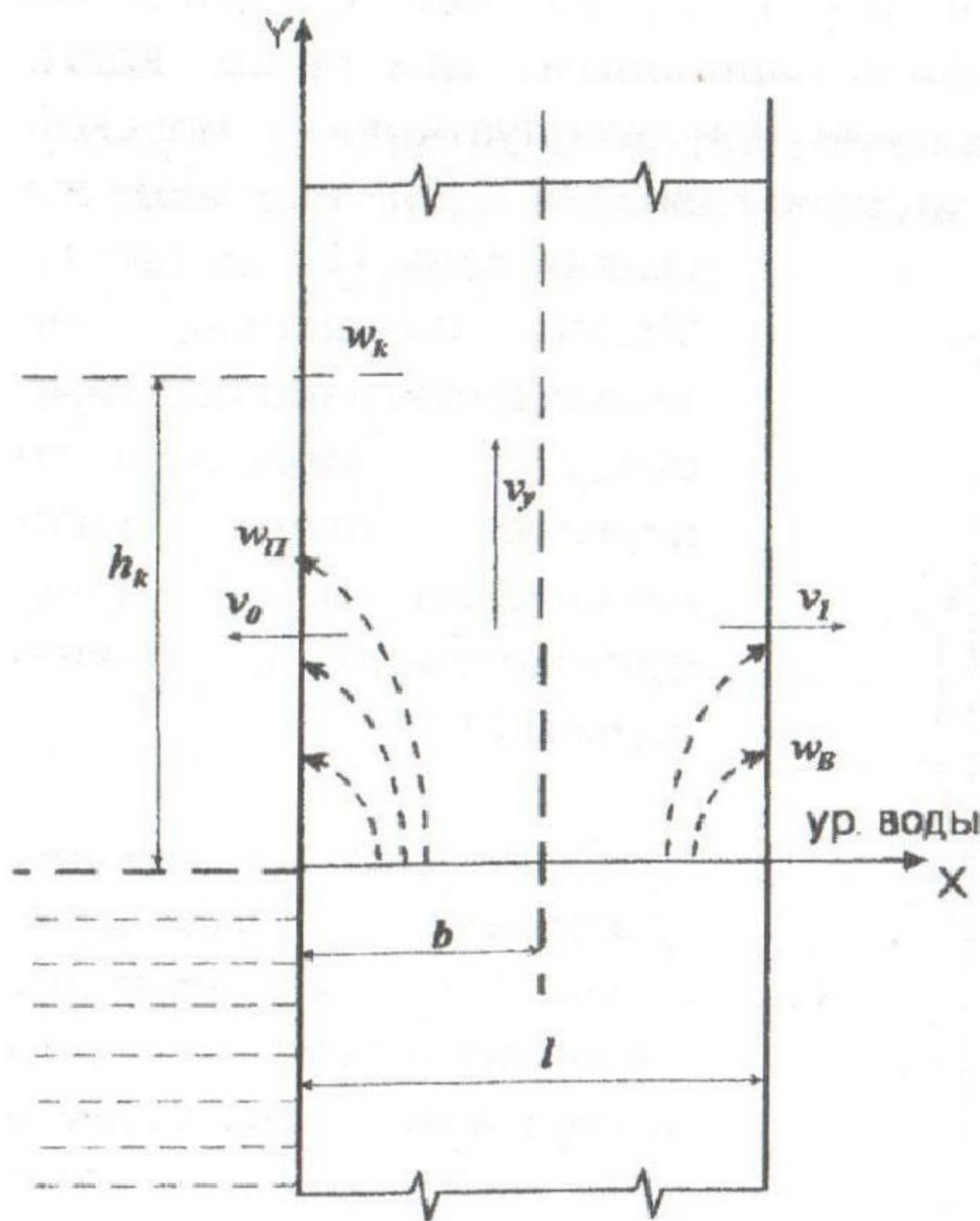


Рис. 2. Схема процессов влагопереноса в наружной стенке плавсооружения.

Схема процессов коррозии в стенке плавсооружения показана на рис.2, где: l - толщина стенки; b - координата, в которой горизонтальные скорости влагопереноса равны нулю; $W_{П}$, $W_{В}$ - объемная влажность наружной и внутренних поверхностей стенки; h_k - высота капиллярного подсоса; W_k - влажность бетона выше уровня капиллярного подсоса; v_0 , v_1 , v_y - горизонтальные и вертикальные составляющие скорости влагопереноса.

Концентрация продуктов коррозии, переходящих в твердую фазу, определяется

из зависимости:

$$q = \beta_{кр} (C_2 - C_{2\infty}) t_{П} \quad (2)$$

$C_{2\infty}$ - концентрация насыщения, зависящая от концентрации хлоридов и температуры; $C_2 = \mu_1 C$, где μ_1 - стехиометрический коэффициент, $\beta_{кр}$ - массообменный коэффициент скорости кристаллизации, $t_{П}$ - продолжительность процесса. Степень заполнения порового пространства продуктами кристаллизации η определяется из зависимости:

$$\eta = \frac{\varepsilon_k + \frac{m_0}{\gamma_0}}{\frac{q}{\gamma_k}} \quad (3)$$

где ε_k - начальное значение капиллярной пористости; γ_0 - объемная масса растворимого компонента цементного камня (CaO); γ_k - то же, продуктов кристаллизации.

Объемные знакопеременные влажностные и температурные деформации развиваются, как показал проведенный анализ, в наружных частях конструкции плавсооружений. При этом усадка вызывает деформации и напряжения растяжения, увеличение объема приводит к развитию деформаций и напряжений сжатия. Следует отметить, что данные объемные деформации развиваются по всему объему конструкции, а в участках переменного уровня воды имеют максимальные значения (рис.3).

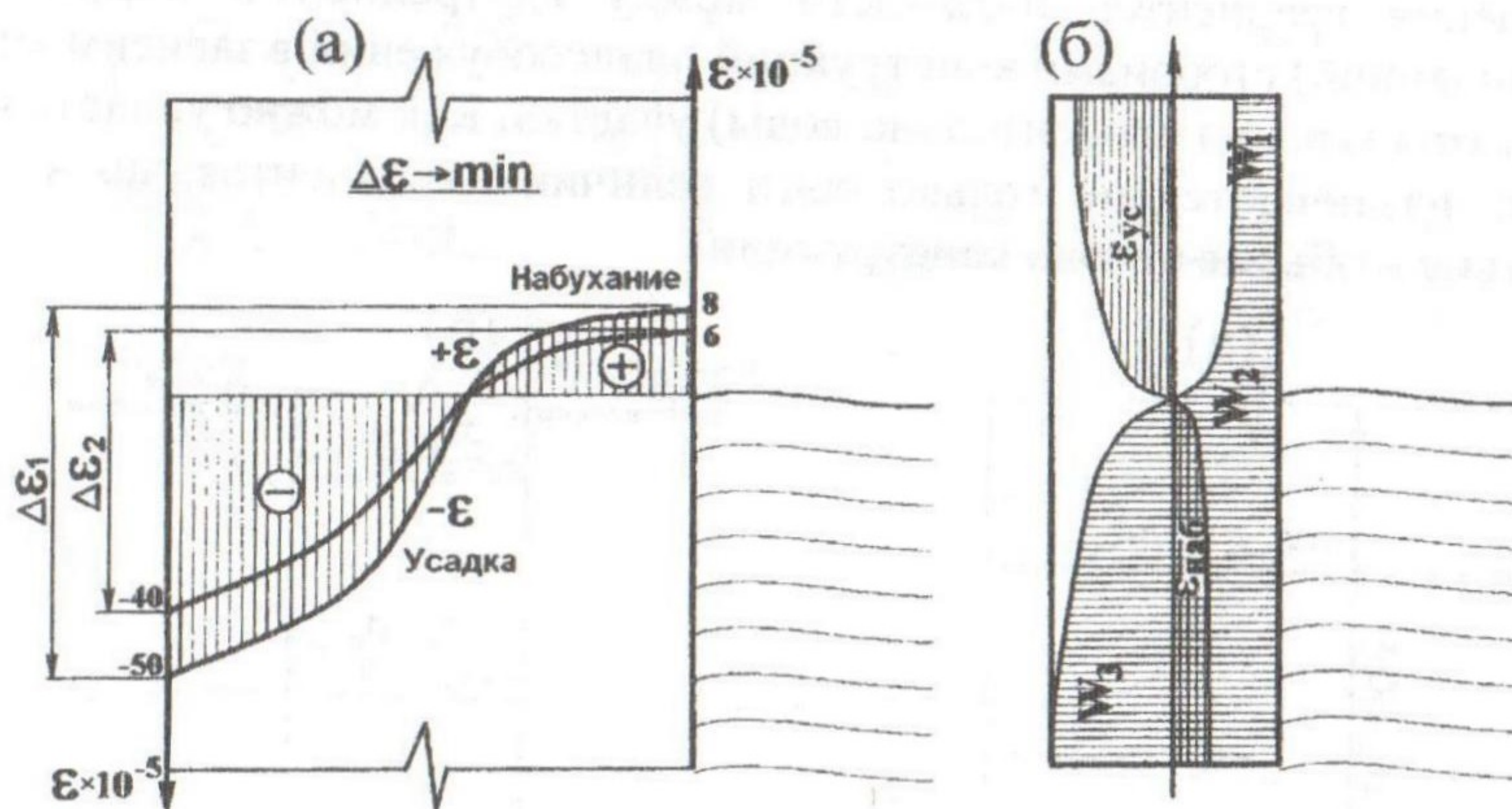


Рис.3. Объемные деформации в горизонтальном (а) и вертикальном (б) направлениях в участке переменного уровня воды плавсооружения.

Многочисленная смена деформаций сжатия и растяжения может привести к нарушению сплошности материала в объеме изделий. Если учесть, что объемные изменения развиваются неравномерно по высоте и по сечению конструкции, то можно предположить, что наряду с развитием интегральных знакопеременных деформаций растяжения и сжатия, возникают и развиваются деформации сдвига. Причиной возникновения деформаций сдвига можно считать градиенты объемных деформаций, вызванные так называемой «деформационной волной».

Влажностная усадка материалов как капиллярно-пористых тел связана с давлением мениска жидкости в капилляре на стенки капилляра [8], т.е. в трещине мениск жидкости давит на берега трещин, вызывая увеличение ширины ее раскрытия. В устье трещины при его заполнении водой реализуется «эффект Ребиндера», связанный с адсорбционным снижением прочности, что ведет к увеличению объема капиллярно-пористых тел при их насыщении водой. Стенки берегов трещины воспринимают возникающее

капиллярное давление, что может привести к увеличению ширины ее раскрытия. Увеличение ширины раскрытия приводит к увеличению объема незаполненного водой участка трещины.

Фактические градиенты увлажнения в конструкциях плавсооружений имеют достаточно сложный вид ввиду специфики эксплуатации. При этом они сочетаются с прочими градиентами – температуры, солёности и пр. (рис.4.а). На рис.4.б показан характер изменения градиентов влажности между внутренней и наружной (обводненной) сторонами конструкций плавсооружений в зависимости от высоты (уровня относительно воды) участка. Как можно увидеть на схеме, различаются не только сами величины градиентов, но и их действие в объеме бетона конструкции.

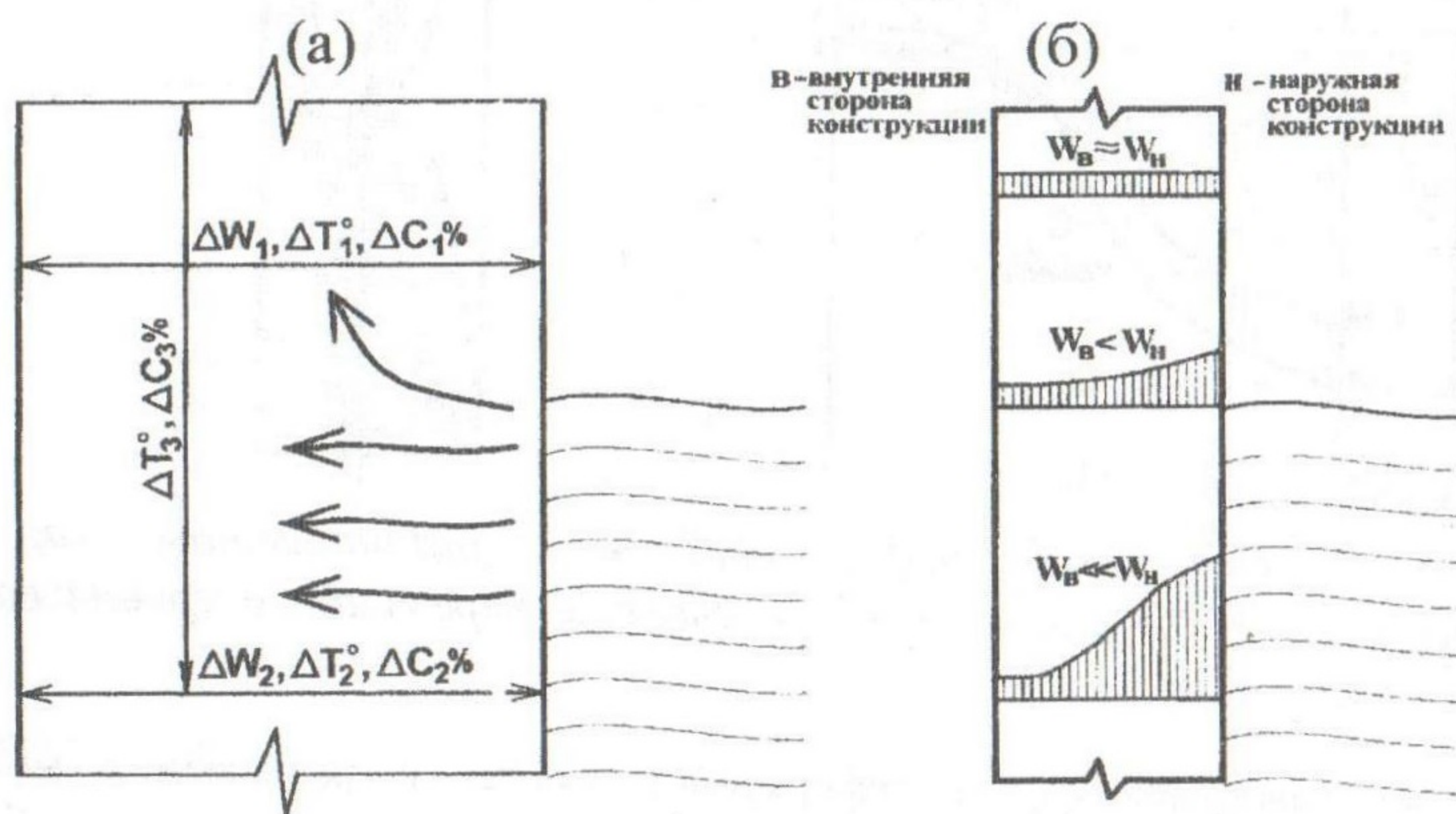


Рис.4. а - градиент влажности (W), температуры (T°), и концентрации солей (C) в стенке плавсооружения; б - изменение градиента влажности между внутренней и наружной (обводненной) сторонами конструкций плавсооружений.

Таким образом, как показано в [9], особенно нежелательны, градиенты капиллярного давления, которые возникают в микроструктуре бетона в локальных участках, в которых могут находиться капилляры с различным радиусом и ориентированием друг относительно друга. Развивающееся капиллярное давление при циклах насыщения и обезвоживания материала способствует появлению локальных деформаций и напряжений сдвига, что может быть причиной появления новых несплошностей, участвующих в дальнейших процессах влагообмена. Для снижения градиентов локальных знакопеременных влажностных и температурных деформаций необходимо создать условия для получения сети

закрытых пор и капилляров близкого размера при условии снижения общей пористости. Одним из способов получения необходимой структуры является применение специальных полифункциональных комплексных добавок. Это должно снизить влияние капиллярного давления на развитие деформаций сдвига в материале между рядом расположенными капиллярами (рис.5).

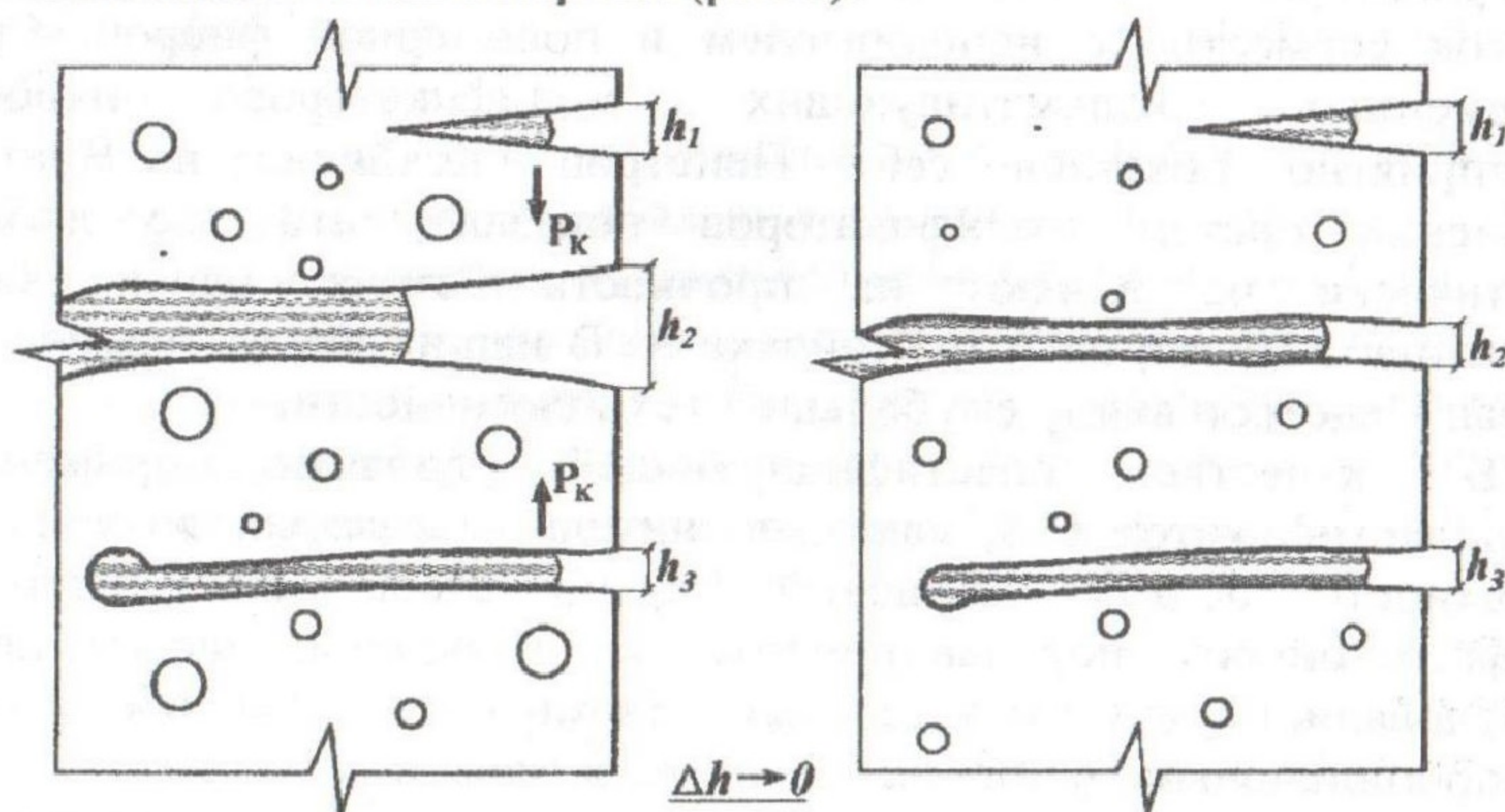


Рис.5. Снижения градиентов локальных знакопеременных деформаций за счет получения сети закрытых пор и капилляров близкого размера при условии снижения общей пористости.

Наиболее опасны воздействия капиллярного подсоса в сочетании с замораживанием и оттаиванием, поскольку повышают количество свободной воды в бетоне, или же при агрессивности водной среды, поскольку переносят агрессивные вещества вглубь конструкции.

Таким образом, проведенный анализ позволил сделать заключение, что повышение комплекса физико-механических характеристик, обеспечивающих долговечность конструкций тонкостенных плавучих и гидротехнических сооружений в условиях температурно-влажностные деформации, достигается за счет создания структуры с сетью закрытых мелких пор и капилляров близкого размера с пониженной общей и капиллярной пористостью.

С целью перераспределения локальных деформаций следует обеспечить мероприятия по передаче знакопеременных деформаций по объему конструкции. К таким мероприятиям можно отнести объемное армирование материала фиброй. Для обеспечения целостности материала на уровне конструкции при развитии в ней интегральных знакопеременных деформаций материал должен содержать армирующие компоненты, способные воспринимать и перераспределять объемные деформации и быть стойкими в

эксплуатационной среде. Одним из таких компонентов может выступать полимерная фибра, которая получает в современном бетоне все более широкое применение.

Исследовалась возможность повышения долговечности судостроительного бетона за счет применения комплексного модификатора, состоящего из кольматирующей и пластифицирующей добавок совместно с наполнителем и полимерной фиброй. Среди современных кольматирующих модификаторов наиболее благоприятно показали себя Пенетрон, Ксайпенс и Виатрон. Сравнение систем модификаторов показало, что все добавки практически не влияют на прочность бетона, однако более эффективны Пенетрон А и Ксайпекс А. В наших исследованиях был выбран Пенетрон ввиду его большей технологичности.

В качестве пластифицирующей добавки применялся суперпластификатор С-3, как наполнитель – молотый до удельной поверхности $300 \text{ м}^2/\text{кг}$ кварцевый. Варьировалось также количество сульфатостойкого портландцемента и отношение щебень/песок. Исследовались судостроительные бетоны и фибробетоны с полипропиленовыми фибрами Fibermesh и Baukon.

Анализ пористости композита показал, что за счет применения комплексного модификатора, состоящего из кольматирующей и пластифицирующей добавок совместно с наполнителем возможно получение микропористых бетонов и фибробетонов с высокой однородностью пор. Разработана комплексная добавка (Пенетрон А + С-3 + наполнитель), позволяющая не только уменьшить общий объем открытых пор, но и повысить их однородность. Получены микропористые ($\lambda \leq 0.5$) судостроительные бетоны и фибробетоны с высокой однородностью пор ($0.7 < \alpha \leq 1.0$).

Комплексная добавка позволяет в 1.5-2 раза увеличивать водонепроницаемость бетона и на 150-200 циклов его морозостойкость. За счет применения комплексной добавки совместно с дисперсным армированием морозостойкость судостроительного фибробетона достигает 600 циклов в морской воде.

Получены составы модифицированных судостроительных бетонов и фибробетонов повышенной долговечности. Разработанные составы обеспечивают подвижность смеси 18-20 см, прочность при сжатии в водонасыщенном состоянии до 80 МПа, при изгибе – до 9 МПа, морозостойкость не ниже 600 циклов в морской воде, водонепроницаемость не менее W16, трещиностойкость (уровень критического коэффициента интенсивности напряжений) K_{IC} не ниже $0.65 \text{ МПа} \times \text{м}^{0.5}$.

Результаты работы прошли промышленную реализацию. Получены патенты Украины:

№ 19814, Бетонная смесь с добавками Пененторон А + С-3;

№ 14937, Бетонная смесь с суперпластификатором, Пенетроном, наполнителем (молотым песком) и полимерной фиброй.

Разработаны и внедрены при постройке плавучих доков на Херсонском государственном заводе «Паллада» «Рекомендации по технологии приготовления и применения тяжелого судостроительного бетона при постройке морских плавучих железобетонных и композитных сооружений».

Также разработаны: «Регламент по технологии изготовления и применения бетонов с добавками системы Пенетрон и С-3 для изготовления и восстановления гидромелиоративных железобетонных сооружений», «Регламент по технологии приготовления и применения модифицированного бетона для гидротехнических сооружений мелиорации, водопропускных сооружений и автодорог с применением полимерной фибры» утвержденные Госводхозом Украины в 2005...2007 гг.

Литература

1. Соломатов В.И., Выровой В.Н. Аббасханов Н.А. Бетон как композиционный материал. - Ташкент: УзНИИНТИ, 1984. - 31 с.
2. Дорофеев В.С., Выровой В.Н. Технологическая поврежденность строительных материалов и конструкций. – Одесса: ИМК Город мастеров, 1998. - 168 с.
3. Композиционные строительные материалы и конструкции пониженной материалоемкости / В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, В.С. Дорофеев, А.В. Сиренко.- К.: Будивэльнык, 1991.- 144 с.
4. Суханов В.Г., Выровой В.Н. Моделирование структуры материала конструкций как открытых самоорганизующихся систем // Компьютерное материаловедение и прогрессивные технологии, - Одесса: Астропринт, 2008. – С. 201-202.
5. Чернявский В.Л. Адаптация бетона. – Днепропетровск: Нова ідеологія, 2002. – 115с.
6. Гусев Б.В., Файвусович А.С., Довгань И.В. Математическая модель процессов биокоррозии бетонов в газовых агрессивных средах// Проблемы долговечности зданий и сооружений в современном строительстве. Матер. междунар. конф. 10-12 окт.2007 г. – СПб., 2007. – С. 63-71.
7. Мишутин А.В., Файвусович А.С. Модель процессов коррозии бетона надводной части плавучих железобетонных сооружений / Бетони та розчини з застосуванням ефективних добавок і відходів промисловості. Мат-ли VII науково-практичного семінару „Структура, властивості та склад бетону” – Киев: Поліпром, 2008.
8. Цилосани З.Н. Усадка и ползучесть бетона. – Тбилиси: Мецниереба, 1979. – 230 с.
9. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Мишутин А.В., Резникова Л.И., Суханов Г.В. Механизм изменения структуры строительных композитов в условиях переменной влажности / Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, Випуск 29 - Одеса, 2008, – С. 54-63.

Література

1. Невинський О.Г. Композиційне в'язуче для одержання вермикуліто-силікатного матеріалу / О.Г. Невинський // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – Одеса: Місто майстрів. –2006. – Вип. 23. – С. 238-243.
2. Ахтямов Р. Я. К вопросу о разработке государственного стандарта «Вермикулит вспученный. Технические условия» / Р. Я. Ахтямов, Б. А. Бронский // Строительные материалы. – 2003. – № 1. – С. 5–7.
3. Теплоизоляционные материалы и изделия на основе вермикулита, минеральной ваты и ячеистого бетона : сб. науч. тр. Урал. н.-и. и проект. ин-т строит. материалов / [под ред. Г. В. Геммерлинга] – Челябинск: Уралнистромпроект. – 1990. – 178 с.
4. Никулина А.Ф. Влияние кремнийорганических гидрофобизирующих жидкостей на свойства межфазной границы раздела фаз / А. Ф. Никулина, В. Н. Пахомова // Композиційні матеріали: III Міжнарод. наук.-техн. конф., 9–11 червн. 2004 р.: тези доп. – К.: ІВЦ “Видавництво “Політехніка”, – 2004. –С.114–115.