

## МЕХАНИЗМ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕМЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ

Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Мишутин А.В., Резникова Л.И.,  
Суханов В.Г. (*Одесская государственная академия строительства и  
архитектуры, г. Одесса*)

Проанализированы механизмы структурных изменений бетона в условиях изменения влажности. Показано, что происходит структурное изменение материала и превращение технологических трещин в эксплуатационные. Показано, что снизить градиенты локальных влажностных деформаций возможно за счет создания условий для получения капилляров одного размера при условии снижения общей пористости.

Анализ климатических условий эксплуатации бетонных и железобетонных различного назначения [1], судостроительных и гидротехнических конструкций [2] позволил заключить, что материал строительных конструкций находится практически под постоянным воздействием градиентов температуры и влажности. Температурно-влажностные воздействия вызывают изменение массы и объема материала конструкций, что, по мнению специалистов является одной из причин снижения его эксплуатационных свойств. В силу того, что технологические трещины (ТТ), внутренние поверхности раздела (ВПР) [3] и капилляры можно отнести к активным структурным составляющим материала, то можно предположить, что они в первую очередь будут реагировать на такие внешние воздействия. При этом может происходить изменение геометрических характеристик ТТ и ВПР, что вызовет общее изменение структуры материала и, следовательно, его свойств. В бетоне как материале, организованному по принципу «структура в структуре» («композит в композите»), ТТ, ВПР и капилляры являются одними из структурных составляющих микро- и макроструктур. Для выявления их роли в процессах, происходящих в бетоне при изменении температуры и влажности, стоит задача анализа возможных механизмов трансформации начальных (технологических, наследственных, остаточных) трещин, капилляров и внутренних поверхностей раздела в эксплуатационные трещины и внутренние поверхности раздела. Весь

последующий анализ проводили для периода эксплуатации конструкции в условиях попеременного увлажнения и высушивания.

При анализе введены следующие допущения:

- циклы увлажнения и высушивания ведут к перемещению мениска жидкости вдоль берегов трещин и капилляров
- рядом расположенные трещины и капилляры могут отличаться шириной раскрытия, длиной и ориентированием;
- в материале между трещинами и капиллярами возможен перенос влаги по системе тонких капилляров.

При изучении механизмов поведения трещины при перемещении вдоль ее берегов жидкости принята плоская клиновидная трещина.

Такая модель трещины позволяет изучить давление мениска жидкости на берега трещины по аналогии с поведением жидкости в конических капиллярах различного радиуса. По данным [4] «... если капилляр не цилиндрический, а имеет вид узкой щели, то соотношение (описывающее высоту поднятия жидкости) остается тем же, но только под величиной  $r$  надо понимать ширину щели» ( $r$  - радиус капилляра). В нашем случае под узкой щелью понимается ширина раскрытия трещины. По данным [5] влажностная усадка материалов как капиллярно-пористых тел связана с давлением мениска жидкости в капилляре на стенки капилляра. Можно предположить, что в трещине мениск жидкости давит на берега трещин, вызывая увеличение ширины ее раскрытия. В устье трещины при его заполнению водой реализуется «эффект Ребиндера», связанный с адсорбционным снижением прочности, что ведет к увеличению объема капиллярно-пористых тел при их насыщении водой.

В силу того, что заполнение объема капилляров и трещин водой и давление на берега зависит от ширины их раскрытия, длины и ориентирования, то при анализе необходимо, по нашему мнению, учитывать взаимодействие рядом расположенных трещин и капилляров.

Начальные капилляры, ТТ и ВПР материала несут определенную информационную нагрузку только до момента начала эксплуатации конструкций. Последующие эксплуатационные воздействия вызывают изменение их геометрических характеристик, что переводит их в ранг эксплуатационных трещин и ВПР. В наших исследованиях под эксплуатационными трещинами (ЭТ) и капиллярами (ЭК) понимаются трещины и капилляры, которые возникли в материале под действием самых разнообразных нагрузок. Они могут развиваться из начальных трещин, зарождаться и развиваться в виде самостоятельных образований, трансформироваться из внутренних поверхностей раздела. ЭТ и

ЭК являются составными частями интегральной эксплуатационной поврежденности материала конструкций.

Эксплуатационная поврежденность (ЭП) материала конструкций является интегральной характеристикой, которая показывает наличие в материале ЭТ и ЭВПР на разных уровнях структурных неоднородностей материала. При помощи ЭП можно оценить изменение интегральной поврежденности материала конструкций при действии на них силовых (статических и динамических) нагрузок и нагрузок, связанных с воздействием среды эксплуатации. При принятых методах количественной оценке ЭП не представляется возможным разделить ЭП на ЭТ и ЭВПР. Это снижает информативность ЭП по степени опасности накопления и развития трещин, как самых активных элементов структуры материала. В тоже время по изменению ЭП можно оценить способность материала противостоять самым разнообразным эксплуатационным воздействиям.

Примем, что происходит увлажнение образца предварительно высушенного до постоянной массы и выделим в материале индивидуальную ТТ, которая характеризуется шириной раскрытия  $b_T$ , длиной  $a_T$ , и радиусом устья, рис. 1.а.

Начало увлажнения связано с впитыванием воды в объем трещины. Ширину раскрытия трещины примем такой, которая обеспечивает наличие свободной воды в капиллярах. Вода, заключенная в капиллярах и ограниченная менисками, является свободной. Примем, что ширина раскрытия клиновидной трещины позволяет переместиться воде на расстояние, равное  $1/3$  начальной длины трещины  $a_T$  рис. 1.а.

За счет возникновения менисков возникают капиллярные силы, составляющей которых является капиллярное давление  $P_k$ , которое зависит от величины радиуса мениска. Незаполненный жидкостью объем трещины можно характеризовать объемом  $V_0$  и давлением  $P_0$ . Стенки берегов трещины воспринимают возникающее капиллярное давление, что может привести к увеличению ширины ее раскрытия на величину  $\Delta b_T$ , рис. 1.б.

Увеличение ширины раскрытия приводит к увеличению объема незаполненного водой участка трещины. При этом могут возникнуть ситуации, при которых может увеличиться радиус устья (рис. 1.б.) или, при сохранении величины радиуса устья, произойдет увеличение длины трещины на величину  $\Delta a_3$  (рис. 1.в).

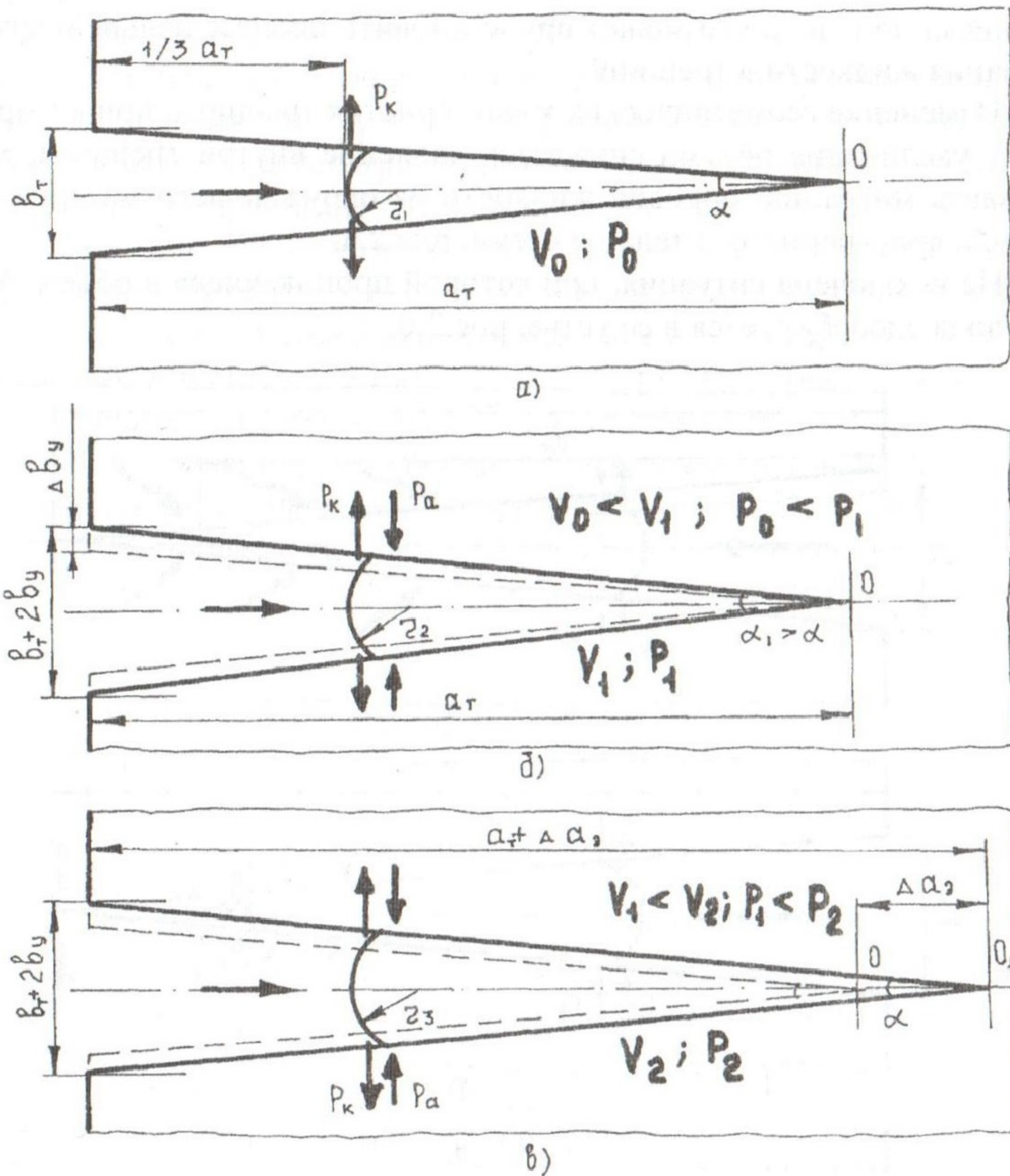


Рис. 1. Изменение параметров трещины при заполнении ее водой, а - развитие капиллярного давления  $P_k$ ; б - изменение геометрических параметров трещины за счет увеличения радиуса устья; в - изменение геометрических параметров трещины за счет увеличения ее длины.

В том и другом случаях должно произойти увеличение объема трещины и, связанное с ним, согласно закону Гей-Люсака, снижение давления внутри трещины. Это приводит к возникновению градиента давлений на берегах трещины за счет атмосферного давления  $P_a$  по схемам, представленным на рис.1.а и рис.1.б. Кроме того, увеличение ширины раскрытия трещины приводит к увеличению радиуса кривизны

мениска до  $r_2$  и  $r_3$ , что может приостановить процесс дальнейшего втягивания жидкости в трещину.

Изменение геометрических характеристик трещины, при которых за счет увеличения объема снижается давление внутри трещины, может вызвать миграцию поровой жидкости из окружающего материала как капиллярно-пористого тела по схеме, рис.2.а:

Не исключена ситуация, при которой проникающая в объем трещины вода адсорбируется в ее устье, рис.2.б.

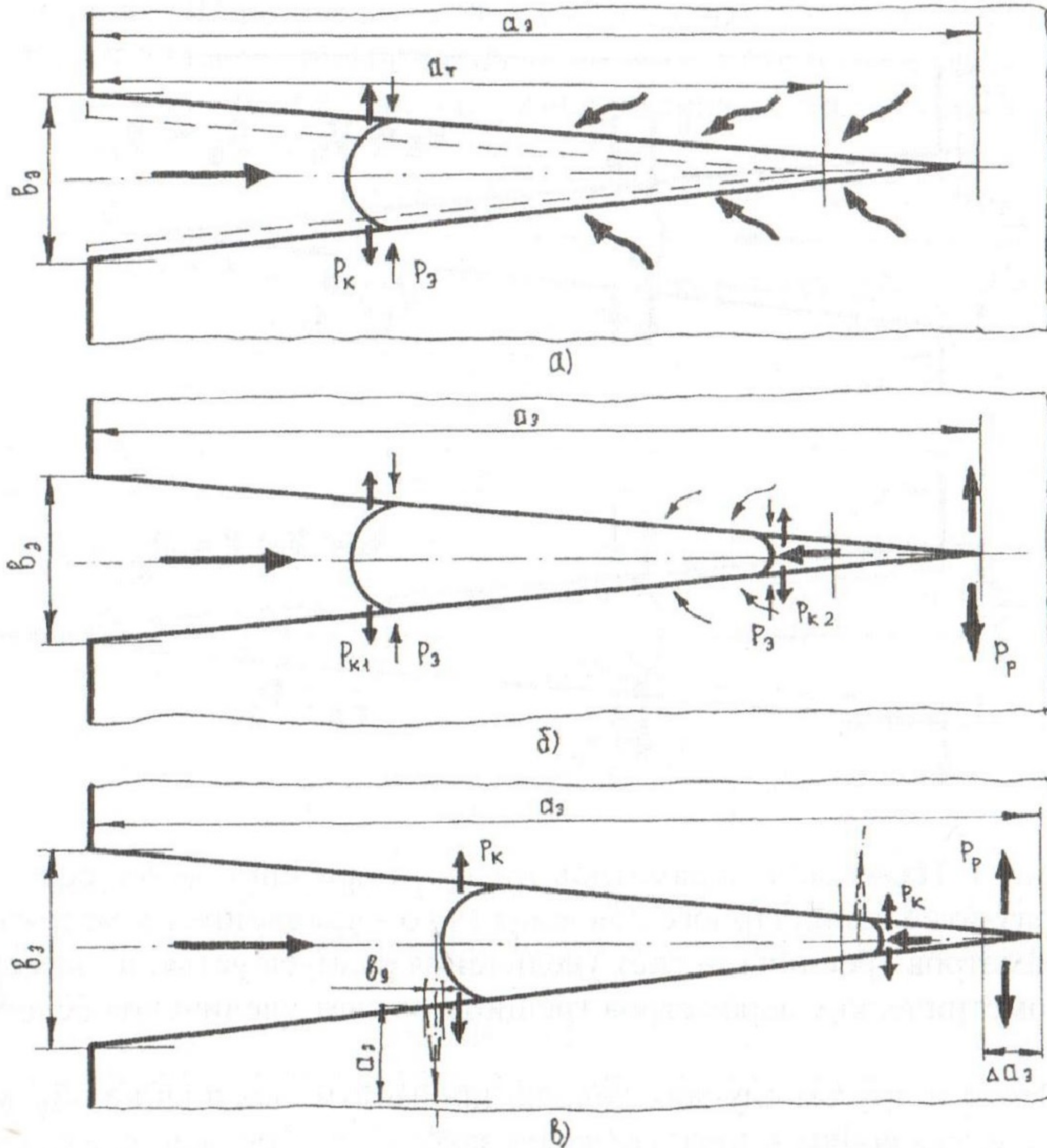


Рис. 2. Процессы массопереноса и изменения параметров трещины при начальном заполнении водой а - миграция поровой жидкости в объем трещины; б - развитие капиллярного давления  $P_{k1}$  и  $P_{k2}$  по длине трещины; в- изменение поврежденности материала ЭТ.

Это ведет к возникновению капиллярного давления  $P_{K2}$ , которое совместно с  $P_{K1}$  вызывает дальнейшее увеличение объема трещины, что способствует подсосу поровой жидкости и развитию деформаций и напряжений растяжения  $P_p$  у устья трещины. Кроме того, адсорбция молекул воды на берегах трещины в ее устье раздвигает берега, что может вызвать подрастание трещины до величины  $a_3$ , рис.2.в.

Градиент давлений, возникший в результате изменения объема трещин, может привести к нарушению целостности материала берегов на границах раздела менисков по схеме, рис.2.в.

В композиционных строительных материалах присутствуют, как правило, группы трещин на различных уровнях структурных неоднородностей. Наличие группы трещин предполагает, что при заполнении их водой, трещины начинают взаимодействовать. Подобное взаимодействие может привести к изменению их геометрических характеристик и к образованию новых трещин. При анализе примем, что в зоне взаимодействия находятся две трещины с одинаковым направлением развития.

Трещины отличаются шириной раскрытия ( $b_{T1} \neq b_{T2}$ ) и длиной ( $a_{T1} \neq a_{T2}$ ). Различные значения ширины раскрытия предполагает разные по величине радиусы менисков и, следовательно, разное по величине капиллярное давление. В общем случае капиллярное давление  $P_K$  зависит от величины поверхностного натяжения на границе раздела «жидкость-газ» и величины радиуса капилляра (узкой щели)  $r$ . Таким образом, в трещинах, которые находятся в одном и том же материале, и которые отличаются шириной своего раскрытия, глубина проникновения жидкости будет различной.

Под действием градиентов капиллярного давления ( $P_{K1} \neq P_{K2}$ ) материал берегов соседних трещин воспринимает деформации и напряжения сдвига. Это может привести к нарушению целостности материала и образованию новой трещины с длиной  $a_3$ . Появление новых трещин ведет к очередному перераспределению внутреннего деформационного состояния, связанного с начальным процессом насыщения материала влагой.

Для конструкций, эксплуатирующихся в водонасыщенном состоянии, характерно неравномерное распределение влажности по высоте. Возможные механизмы изменения параметров капилляров и трещин в данных конструкциях представлен на рис.3.

На рис.3.а, б и в показаны трещины расположенные выше уровня воды, имеющие разную длину и разную степень заполнения водой. Увеличение ширины раскрытия трещины может увеличивать и ее дли-

ну, т.е. вызывать рост трещины на величину  $\Delta a_3$  – рис.3.а, рис.3.в и рис.2.в.

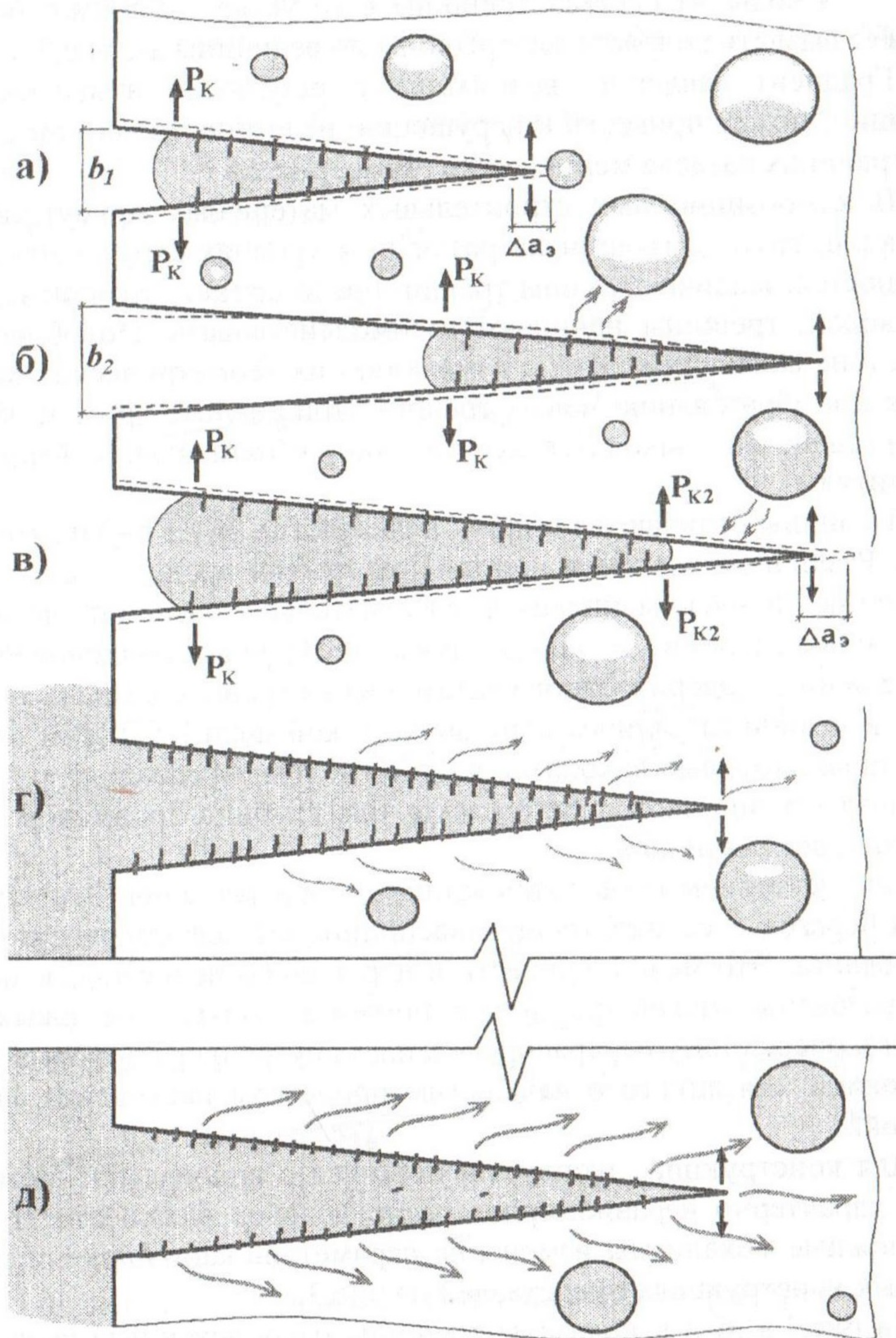


Рис.3. Изменение параметров трещин при заполнении водой в надводной части конструкции (а,б,в), а также в подводной при низком (г) и высоком (д) гидростатическом давлении

Однако ввиду того, что бетон имеет сложную капиллярно-поровую структуру устье трещины при прорастании может встретить пору, как показано на рис.3.а. В этом случае трещина теряет главный свой признак – устье, и превращается в ВПР, которая является практически безопасной для материала.

В ситуации, при которой в устье трещины возникнет мениск жидкости (рис.3.в), возникает дополнительное капиллярное давление, способствующее увеличению ширины трещины ( $\Delta b_3$ , рис.2).

В случае неполного насыщения водой (рис.3.б) за счет действия капиллярных сил ближайших трещин (рис.3.а и рис.3.в) возникает градиент давления. Данный градиент, с одной стороны, способствует деструкции матрицы материала в кластере, ограниченном трещинами, с другой стороны, препятствует увеличению ширины трещины.

В подводной части конструкции в наружных трещинах не образуются мениски и, соответственно, отсутствуют силы капиллярного давления, увеличивающего трещину (рис.3.г и рис.3.д). Хотя наряду с этим сохраняется адсорбционным снижением прочности в устье трещины.

По нашему мнению, трансформаций начальных трещин в подводной части зависит от гидростатического давления, действующего на конструкцию, и от способности «самозалечивания» трещины. При низком гидростатическом давлении (рис.3.г) миграция воды в структуре бетона незначительна, соответственно не происходит интенсивного вымывания свободной извести из материала (коррозия 1-го вида по В.М. Москвину), а также практически не разрушаются новообразования реликтовых частей, прорастающие в тело трещин.

Трансформация начальных трещин в подводной части при высоком гидростатическом давлении показана на рис.3.д. При недостаточной водонепроницаемости бетона происходит значительная миграция воды в структуре бетона, вызывающая вымывание как свободной извести, так и части новообразований. Однако при обеспечении достаточной водонепроницаемости бетона механизм трансформаций начальных трещин при высоком гидростатическом давлении не существенно отличается от механизма при низком давлении, т.е. возможна адаптация бетона.

Для снижения градиентов локальных знакопеременных влажностных деформаций необходимо, при условии снижения общей пористости, создать условия для получения капилляров одного размера. Одним из способов снижения общей пористости, создания сети закрытых пор и получения равновеликих капилляров является применение специальных полифункциональных комплексных добавок. Это, как показали



экспериментальные результаты, ведет к изменению капиллярной пористости и распределения пор и капилляров по размеру, что снижает влияние капиллярного давления на развитие деформаций сдвига в материале между рядом расположенными капиллярами. Решить этот вопрос позволяет введение комплексных модификаторов, состоящих из пластифицирующих и кольтматирующих добавок, а также наполнителей [6].

С целью перераспределения локальных деформаций следует обеспечить мероприятия по передаче знакопеременных деформаций по объему конструкции. К таким мероприятиям можно отнести объемное армирование материала конструкций специальной фиброй.

Перечисленные мероприятия позволят, по нашему мнению, создать резерв времени для проявления адаптационных свойств за счет включения в конструкционный процесс реликтовых частей минеральных вяжущих.

Предложенные способы снижения градиентов влажностных локальных и интегральных деформаций создают условия реорганизации структуры (с учетом углубления физико-химических процессов гидратации и сохранения тем самым рН жидкой фазы), обеспечивающей сохранение нормируемых свойств бетона в требуемый период эксплуатации.

#### **Проведенный анализ позволяет заключить:**

1. При увлажнении конструкций вода начинает заполнять объем ТТ, что ведет к развитию капиллярного давления. При этом изменяется ширина раскрытия трещин, что вызывает снижение внутреннего давления и развития деформаций сдвига в материале берегов трещины. Это приводит к изменению геометрических характеристик ТТ и ее трансформации в трещины эксплуатации. Зарождающиеся на берегах исходной трещины новые трещины вызывают изменение поврежденности материала эксплуатационными трещинами и, тем самым, к структурным изменениям материала.

2. Взаимодействие рядом расположенных трещин, которые отличаются шириной раскрытия, при их начальном заполнении водой вызывает развитие деформаций и напряжений в окружающем материале. Это может привести как к изменению геометрических характеристик исходных трещин, так и к появлению новых трещин. Анализ показал, что градиенты капиллярного давления возникают в криволинейных трещинах, вызывая нарушение сплошности материала и изменение его интегральной поврежденности. В силу того, что явления и процессы,

которые происходят в трещинах при их начальном увлажнении в значительной степени зависят от геометрических характеристик и количества трещин, то следует предусматривать технологические способы и приемы направленные на регулирование начальной поврежденности материала конструкций технологическими дефектами.

3. Снизить градиенты локальных знакопеременных влажностных деформаций возможно при создании условий для получения капилляров одного размера при условии снижения общей пористости. Добиться этого позволяет введение комплексных модификаторов, состоящих из пластифицирующих и кольматирующих добавок, а также наполнителя. Для перераспределения локальных деформаций следует обеспечить передачу знакопеременных деформаций по объему конструкции через объемное армирование материала конструкций специальной фиброй. Перечисленные мероприятия позволят создать резерв времени для проявления адаптационных свойств за счет включения в конструкционный процесс реликтовых частей минеральных вяжущих.

### *Литература*

1. Справочник по климату СССР, вып.10 ч. IV. Влажность воздуха, атмосферные осадки и соляной покров. Л.: Гидрометеорологическое из-во, 1969. – 696 с.

2. Мишутин А.В., Мишутин Н.В. Повышение долговечности бетонов тонкостенных плавучих и портовых гидротехнических сооружений – Одесса: Одесский центр научно-технической и экономической информации, 2003 – 192 с.

3. 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.

4. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, - 1968. – 472 с.

5. Цилосани З.Н. Усадка и ползучесть бетона. -- Тбилиси: Мецниереба, 1979. – 230 с.

6. Мишутин А.В. Дисперсно-армированные бетоны повышенной долговечности для тонкостенных плавучих и гидротехнических сооружений // Компьютерное материаловедение и прогрессивные технологии, - Одесса: Астропринт, 2008. – С. 105-110.