

## **Гипотезы о морозостойкости. Связь морозостойкости со структурой бетона**

Волосевич С.В., Тютин Б.Н  
Научный руководитель – Бондарович А.И.  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

В развитии теории морозостойкости бетона представлено множество гипотез о причинах и механизме разрушения бетона при совместном действии на него воды и мороза.

Наиболее просто объяснить разрушение каменного материала в этих условиях давлением воды, замерзающей в его порах. Это объяснение, считавшееся ранее само собой разумеющимся и исчерпывающим, нашло выражение в количественной оценке морозостойкости камня по коэффициенту насыщения пор водой. Однако по средней величине коэффициента насыщения нельзя предугадать морозостойкость капиллярно-пористого материала, каким является бетон, так как миграция воды приводит к неравномерному распределению ее в его объеме. Роль расширения воды при замерзании учитывается и в современных гипотезах, но само по себе это физическое явление не может полностью объяснить процесс разрушения бетона.

В этой связи большое значение для развития теории морозостойкости бетона имеют работы Г. К. Дементьева и Ю. А. Нилендера. Ю. А. Нилендер дал научную классификацию пустот и трещин в бетоне, выделив пустоты, образовавшиеся при укладке (каверны, воздушные поры, водные поры), и трещины, возникшие в результате силовых воздействий. Трещины от силовых воздействий подразделяются на две группы: от внешних нагрузок и от собственных напряжений. Собственные напряжения в бетоне, по классификации Ю. А. Нилендера, могут быть трех родов:

1) Макроструктурные напряжения, возникающие вследствие неравномерного распределения температуры или влаги в объеме бетона.

2) Микроструктурные напряжения, возникающие в оболочках из цементного камня и зернах заполнителя вследствие их различной деформации при изменении влажности и температуры.

3) Ультрамикроструктурные напряжения – дезориентированные, уравнивающиеся в объемах, соизмеримых с размером кристаллов новообразований в цементном камне.

Представленные в роли деформаций в процессе физической коррозии бетона получили развитие в исследованиях Н. А. Попова. При чередующихся циклах воздействия среды на пористый материал наблюдается накопление остаточных деформаций, что делает это явление сходным с накоплением пластических деформаций от многократных знакопеременных механических воздействий, приводящих к усталости материала. Н. А. Попов совместно с В. А. Невским экспериментально исследовали развитие в бетоне повреждений усталостного типа. Обобщение опытных данных привело авторов к выводу, что с увеличением деформаций усадки и набухания бетона понижается его морозостойкость.

В развитие этих работ были опубликованы результаты исследований В. М. Москвина и А. М. Подвального, выявивших большое изменение морозостойкости бетона под влиянием силовых воздействий от внешних нагрузок. В этом исследовании было установлено, что существует некоторая предельная величина напряжений, ниже которой влияние изгибающих напряжений становится мало заметным и морозостойкость напряженного бетона мало отличается от морозостойкости ненагруженного бетона. В исследованиях В. М. Москвина и А. М. Подвального предельная величина напряжений составляла 0,2 предела прочности бетона на растяжение при изгибе.

С. В. Шестоперов внес большой вклад в развитие теории морозостойкости и экспериментальных исследований долговечности бетона. С. В. Шестоперов придает большое значение нормированию минералогического состава цемента: цемент для бетонов высокой морозостойкости должен быть алитовым ( $C_3S > 55\%$ ), содержание трехкальциевого алюмината ограничивается строгой нормой – для марки F800 – не более 6%, для марки F1500 – не более 5%, для марки F3000 – до 4%. С. В. Шестоперов рекомендует использовать тонкомолотые цементы, а для «направленного структурообразования» применять мокрый помол клинкера при оптимальной дозировке гипса и введение сульфитно-спиртовой барды (ныне аналог – ЛСТ).

В работах В. В. Стольниковца долговечность бетона исследована в зависимости от его строения. По его мнению, имеет значение не

только абсолютная величина пористости, но и физический характер пор – разобщенные они или сообщающиеся. В. В. Стольников различает в бетоне капилляры двух типов: капилляры цементного камня и капилляры в зоне контакта цементного камня и заполнителей.

По мнению В. В. Стольникова, система капилляров в зоне контакта является основным путем проникания в бетон воды. Улучшение строения бетона достигается уменьшением седиментационного расслоения цементного теста и цементного раствора, уменьшением общей пористости и переводом открытой пористости в замкнутую. Практической мерой для ослабления седиментационных процессов является применение малопластичных и тщательно уплотненных жестких смесей. Большое значение имеют добавки поверхностно-активных веществ. Уменьшению седиментации цементного теста способствовало также повышение тонкости помола цемента и наличие в нем небольшого количества трехкальциевого алюмината.

В. В. Стольников использовал в качестве суммарной физической характеристики строения бетона показатель интенсивности капиллярного всасывания, определяемый по разработанной им методике. В его исследованиях наблюдалось повышение морозостойкости при уменьшении интенсивности капиллярного всасывания, которое зависит от общей пористости, а также от ее физического характера. Наиболее эффективным мероприятием по уменьшению капиллярного всасывания оказалось одновременное снижение В/Ц и сокращение расхода цемента при введении добавки СНВ (смола нейтрализованная воздухововлекающая).

Одной из наиболее существенных причин морозной деструкции бетона современная теория считает миграцию влаги в его объеме под влиянием градиента влажности и температуры. Теория миграции влаги разработана Н. А. Цытовичем, М. И. Сумгиным, Лыковым А. В. и другими учеными СССР. По этой теории распределение влажности в замерзающем пористом теле является функцией всех процессов, происходящих при замерзании.

Результаты опытов Конопленко А. И. и других исследователей подтвердили, что миграция воды направлена к охлаждаемой поверхности бетона. Вследствие миграции увеличивается насыщение водой пор вблизи наружной поверхности, что обуславливает разрушение наружных слоев бетона.

По существу миграция воды непосредственно связана с капиллярной пористостью структуры бетона, которая предопределяет его проницаемость. При этом есть непосредственная взаимосвязь между размерами сечения и длины капилляров, формами связи воды с его стенками и процессы ее миграции под влиянием капиллярных сил, градиента влажности и температуры.

Коллинс рассматривает морозостойкость бетона с точки зрения роста кристаллов льда, применив к бетону одну из гипотез о замерзании почвы. По мнению Коллинса, вследствие охлаждения, идущего снаружи, в бетонном массиве образуется лед в виде слоев, параллельных наружной охлаждаемой поверхности. Разрушение бетона происходит под действием давления растущих кристаллов льда.

Предположение о послойном образовании льда не согласуется с результатами опытов Горчакова и др. по изучению миграции воды в бетоне при циклическом замораживании.

В 1945 г. Пауэрс опубликовал рабочую гипотезу для дальнейшего изучения морозостойкости бетона, которая известна как гипотеза гидравлического давления. Она основана на предположении, что замерзающие наружные слои бетона расширяются и оказывают давление, оттесняющее внутрь еще не замерзшую воду, в результате чего в бетоне возникает гидравлическое давление, рассматривавшееся как причина разрушения бетона.

Гипотезы гидравлического давления имеют определенное отношение к так называемой «теории интервала между порами», изложенной в работах Пауэрса. Согласно этой теории, роль вовлеченного воздуха состоит в том, чтобы предотвратить расширение цементного камня во время замерзания. При этом эффективность воздушных пор зависит от толщины слоев цементного камня между ними, т. е. от фактора интервала.

Исследователи, выдвигавшие и обосновывавшие рассмотренные гипотезы морозной деструкции бетона, приходят к общему выводу, что решающими факторами морозостойкости являются характеристики строения бетона, т.е. состояние его пористости.

Именно состояние структуры бетона, его пор, особенно «дисперсность» и объем капиллярной пористости, непосредственно влияют на свойства воды, которые она проявляет при замораживании и оттаивании бетона.

При рассмотрении связи морозостойкости и строения бетона целесообразно исходить из обоснованного В. Н. Юнгом представления о цементном камне как о микробетоне, состоящем из гелевых и кристаллических продуктов гидратации цемента и многочисленных включений в виде негидратированных зерен клинкера и минеральных добавок.

Если цементное тесто хорошо уплотнено (воздушная пористость не превышает 1-2%), то поры в твердеющем цементном камне образуются главным образом испаряющейся водой. Характер таких пор обусловлен формами связи влаги с материалом. Классификация форм связи влаги с материалом, предложенная академиком Ребиндером П. А., построена по принципу интенсивности энергии связи и в полном виде приведена в книге А. В. Лыкова. По этой классификации все формы связи влаги с материалом подразделяются на три основные группы. Химическая связь, возникающая в определенных молекулярных соотношениях, является наиболее сильной по сравнению с другими формами связи. Физико-химическая связь устанавливается не в строго определенных соотношениях. Часть испаряющейся воды, не связанной в агрегатах частиц цементного геля, находится между ними и имеет с материалом физико-механическую связь. Эта часть испаряющейся воды, условно названная «капиллярной», удерживается в материале капиллярным давлением. Основная ее масса является свободной и сохраняет свои свойства.

Следовательно, испаряющаяся вода имеет с цементным камнем две формы связи – физико-химическую и физико-механическую. На этой основе можно выделить в твердеющем цементном камне три основные группы пор, отличающиеся по размеру, расположению в цементном камне и по их влиянию на морозостойкость бетона.

Капиллярные поры, образуемые «капиллярной» испаряющейся водой, имеющей с материалом физико-механическую связь, расположены между агрегатами частиц цементного геля. Капиллярные поры являются основным дефектом строения плотно уложенного бетона, понижающим его морозостойкость.

Контракционные поры образуются вследствие уменьшения абсолютного объема системы цемент – вода. При замерзании бетона контракционные поры играют роль своеобразных запасных резервуаров, в которые может отжиматься часть воды из капиллярных пор. Благодаря этому, как считает Г. И. Горчаков, уменьшается дав-

ление замерзающей воды на стенки капиллярных пор и повышается морозостойкость бетона.

Поры геля представляют собой промежутки между его частицами, образованные испаряющейся водой, адсорбционно связанной в гидратных оболочках частиц геля, и расположенные в агрегатах частиц цементного геля. Вода в порах геля находится в особом состоянии и не переходит в лед при низких температурах порядка  $-40^{\circ}\text{C}$  и даже  $-78^{\circ}\text{C}$ , что согласуется с выводами Б. В. Дерягина, Н. А. Цытовича и М. И. Сумгина о специфических свойствах тонких слоев воды.

Одной из наиболее важных является классификация пор цементного камня и бетона по их эффективным радиусам. Для цементного камня и бетона наиболее удобно делить поры на три группы:

- 1) микрокапилляры ( $r < 0,1$  мкм),
- 2) макрокапилляры [ $(1 - 10) > r > 0,1$  мкм],
- 3) некапиллярные поры.

Иногда можно дополнительно дифференцировать микропоры на ультрамикропоры ( $r < 50 \text{ \AA}$ ) и переходные микропоры ( $50 \text{ \AA} < r < 0,1$  мкм).

В макрокапиллярах слой воды у стенок связан адсорбционно, а остальная часть воды механически удерживается капиллярным давлением, обусловленным кривизной поверхности жидкости.

На основании данных, полученных Н. Н. Федякиным, можно предполагать, что вода геля и вода в контракционных порах цементного камня не увеличивается в объеме при охлаждении бетона. Следовательно, удлинение влажных образцов цементных растворов при замораживании вызвано расширением воды преимущественно в капиллярных порах, являющихся макрокапиллярами. Таким образом, для повышения морозостойкости необходимо уменьшение объема макрокапилляров, имеющих радиус более  $0,1$  мкм (более  $1000 \text{ \AA}$ ).

Общепризнанным фактором морозной деструкции бетона являются деформации цементного камня, раствора и крупного заполнителя при замораживании и оттаивании.

Москвин В.М. и Капкин М. М. изучали деформации цементного камня при более низких отрицательных температурах, до  $-70^{\circ}\text{C}$ . Величину деформаций цементного камня определяли в лабораторной термокамере с автоматическим регулированием температур.

Исследовали цементный камень, приготовленный из сульфатостойкого портландцемента марки 500. Образцы размером 2,5x2,5x25 см с упорами-фиксаторами по торцам изготавливали из цементного теста с водоцементным отношением 0,25; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 и 0,8. Для испытаний брали образцы, твердевшие в течение месяца в нормальных условиях и насыщавшиеся водой двое суток.

Деформации цементного камня отражают уменьшение размеров образца разной интенсивности, в зависимости от В/Ц и температуры до  $-20... -30^{\circ}\text{C}$ , и наличие резкого увеличения его в объеме при массовом переходе жидкой фазы в лед.

Во время испытаний изучалось также влияние низких отрицательных температур на развитие остаточных деформаций, т.е. при медленном повышении температуры образцов от глубокой отрицательной до положительной. Для этого образцы из цементного камня испытывали по ранее описанной методике с той лишь разницей, что при обратном ходе кривой выдерживание при данной температуре (во время повышения температуры) было в 2...3 раза более длительным, чем при прямом ходе кривой. Это делалось потому, что одинаковая температура по всему сечению образца при обратном ходе кривой (при оттаивании) устанавливается значительно медленнее.

Это исследование привело к выводу, что деформации, возникающие при замораживании водонасыщенных образцов, зависят от характера пористости и количества поглощенной воды. Для образцов, насыщенных методом погружения, получены кривые «температура - деформация», которые в области отрицательных температур имели два максимума, что указывает на наличие различных по размеру групп пор.

Исследования Н. А. Цытовича и М. И. Сумгина выявили зависимость температуры замерзания воды от размера (сечения) капилляров. М. И. Сумгин получал тонкие пленки воды расплющиванием водопроводной воды между отшлифованными стеклянными пластинками. Опыты показали, что температура перехода воды в лед при прочих равных условиях тем ниже, чем тоньше слой воды. Этот вывод согласуется с опытами Боровик-Романовой Т. Ф. Вместе с тем было выявлено, что замерзание воды в тонких слоях зависит как от температуры, так и от продолжительности замораживания.

Уменьшение деформаций цементного раствора при замерзании достигается снижением В/Ц и обеспечением влажных условий

твердения, благоприятствующих более полной гидратации цемента. Эти мероприятия способствуют уменьшению объема капиллярных пор (макропор) и почти полному устранению деформаций в температурном интервале от  $-5$  до  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Приведенные данные характеризуют взаимосвязь морозостойкости и долговечности бетона с состоянием его структуры (по существу – ее непроницаемости) и прочности, обеспечивающей возможность восприятия напряжений, возникающих от различий упруго-деформативных свойств составляющих бетона, расширения воды при замерзании, воздействия ее в процессе миграции и других деструктивных явлений.

#### Литература:

1. Горчаков Г.И., Капкин М.М., Скрамтаев Б.Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. - М.: Стройиздат, 1965.
2. Дементьев Г.К. Условие долговечности бетона и железобетона. - Куйбышев: Куйбышевское книгоиздат., 1955.
3. Попов Н.Д., Невский В.А. К вопросу об усталости бетона при многократных циклах чередующихся воздействий окружающей среды. Тр. МИСИ им. В.В. Куйбышева. Сб. № 15. - М., 1957.
4. Москвин В.М., Подвальный А.М. Морозостойкость бетона в напряженном состоянии. Бетон и железобетон, 1960, № 2.
5. Шестоперов С.В. Долговечность бетона.-.:Автотрансиздат, 1960
6. Стольников В.В. Исследования по гидротехническому бетону. - М.: - Л.: Госэнергоиздат. 1953.
7. Цытович Н.А., Сумгин М.И. Основания механики мерзлых фунтов. -М.: Изд. АН СССР, 1937.
8. Лыков А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки. - М.: - Л.: Госэнергоиздат, 1956.