

технико-экономические исследования.

Заключение

Несмотря на некоторую привлекательность систем водяного отопления, остается вопрос, рассмотренный в статье, от решения которого зависит их массовое применение при реконструкции школ. Для решения этого вопроса целесообразно в двух одинаковых по конструкции школах смонтировать в одной – воздушное, в другой – водяное отопление, и провести сравнительные

теплотехнические испытания в течение года, сравнить затраты на их сооружение.

Отмеченные в статье недостатки проектов и оборудования могут быть учтены при проектировании и разработке новых решений систем отопления и вентиляции школ.

Сведения об авторе

Синицын Валерий Иванович, кандидат технических наук (e-mail: v.i.sinitsin@rambler.ru)

Information about the author

Sinitsyn Valeriy Ivanovich, candidate of technical sciences (e-mail: v.i.sinitsin@rambler.ru)

УДК 502/504 : 691.535

ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ БЕТОНА С СОВРЕМЕННЫМИ ДОБАВКАМИ

Поступила 19.11.2015 г.

© **А. В. Чикин**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)», г. Москва

THE TECHNOLOGY OF DURABILITY IMPROVEMENT OF CONCRETE WITH THE MODERN ADDITIVES

Received November 19, 2015

© **A. V. Chikin**

Moscow State University of Mechanical Engineering, Moscow

В статье рассмотрены свойства увеличения долговечности бетонных, железобетонных изделий, конструкций. Отмечается, что состав бетонной смеси в значительной степени предопределяет проницаемость бетона. В этом случае основными показателями состава смеси являются: водоцементное отношение, расход цемента, соотношение заполнителей и цемента, а также крупного и мелкого заполнителей. Рассмотрение проблем повышения долговечности должно осуществляться в двух аспектах: изучение характеристик окружающей среды и выявление ведущих факторов воздействия среды на армируемый бетон, особенно на железобетонные конструкции в целом, изучение механизма и кинетики коррозионных процессов и разработка на этой основе способов повышения стойкости бетона и железобетона в агрессивных средах. Отмечается, что одной из важнейших характеристик бетона, влияющей на его долговечность, является проницаемость бетона. Описываются способы повышения водонепроницаемости бетона, снижения его водопоглощения. Приведены расчетные зависимости для определения свойств бетона.

Ключевые слова: водонепроницаемость, долговечность бетона, характеристики бетона, надежность.

Долговечность бетона и ее составляющие. Согласно [1] долговечность – свойство объекта сохранять физико-механические свойства, учитываемые при проектировании

The article describes the properties of increased durability of concrete, concrete products, designs. It is noted that the composition of the concrete mix largely determines the permeability of concrete. In this case, the main indicators of the composition of the mixture are: water-cement ratio, cement consumption, the ratio of aggregates and cement, and coarse and fine aggregates. Consideration of problems of improvement of durability should be two aspects: study on the characteristics of the environment and identify the leading factors of the impact of the environment on the reinforcement and concrete, especially for reinforced concrete structures in General, the study of the mechanism and kinetics of corrosion processes and development on this basis of methods of increasing durability of concrete and reinforced concrete in aggressive environments. It is noted that one of the most important properties of concrete affecting its durability is permeability of concrete. Describes ways to improve the water resistance of concrete, reduce its water absorption. The calculated dependences for determination of properties of concrete.

Keywords: water resistance, durability of concrete, properties of concrete, reliability.

и обеспечивающие его нормальную эксплуатацию в течение расчетного срока службы при установленной системе технического обслуживания. Долговечностью

или стойкостью бетона называется его способность не снижать набранную прочность в течение длительного периода эксплуатации конструкций, находящихся под воздействием внешней среды [2]. Долговечным называют бетон, выдерживающий без разрушения в течение многих лет условия эксплуатации, для которых он был предназначен [3].

Понятие долговечности. На долговечность бетона оказывают воздействие как внешние, так и внутренние факторы. Среди внешних наиболее распространены физические, химические и механические факторы: атмосферные воздействия, значительные перепады температур, негативное воздействие растворенных в воздухе газов. К внутренним факторам относятся: взаимодействие щелочей цемента с кремнеземом заполнителя, различное изменение объема цементного камня и заполнителя из-за различия температурного расширения

Прочность бетона нарастает в нормальных воздушно-влажностных условиях, а также при правильном уходе за бетоном при низких/высоких температурах и повышенной/пониженной влажности. Технологические процессы устройства бетона значительно влияют на его долговечность.

Долговечность может быть определена как способность материала или конструкции из этого материала сохранять эксплуатаци-

онную пригодность в течение определенного заданного в проекте срока ее службы [4]. При вероятностном подходе к проектированию конструкций определяющим показателем качества конструкции является ее надежность, которая связана с вероятностью успешной эксплуатации в течение заданного срока, в то время как долговечность связана с вероятным сроком существования в запроектированных условиях использования или хранения. Такое определение позволяет обосновать методы испытаний на долговечность, приняв в качестве критерия стойкость к воздействиям, характерным для условий эксплуатации материала и конструкций из него. Стойкость может определяться как фактическая, так и относительная (по сравнению с материалом известной стойкости). Однако, в первом случае испытания могут оказаться слишком длительными, а их ускорение за счет изменения вида или условий воздействия агрессивной среды может внести изменения в механизм коррозионных процессов.

Только при соответствии свойств бетона внешним воздействиям возможно длительное существование сооружений [5]. Долговечность железобетонных конструкций может быть гарантирована, если бетон, арматура и железобетонная конструкция в целом соответствуют условиям работы – воздействиям внешней среды. Расчетные сроки службы бетонов приведены в таблице.

Расчетные сроки службы бетона и железобетонных конструкций

Материал конструкции	Срок службы (предел), годы		
	нижний	средний	верхний
Обычный бетон	30	70	Нет предела
Автоклавный легкий бетон	10	35	$60 + \alpha$
Бетонные блоки	10	45	$70 + \alpha$
Сборный железобетон, толщиной, см:			
4	15	40	$60 + \alpha$
8	25	55	80
12	30	70	Неопределенный
Плиты	15	40	$60 + \alpha$

Примечание: срок α может быть учтен при очень умеренном воздействии внешней среды.

Способы придания долговечности железобетонным конструкциям – в значительной степени технико-экономическая задача, и как всякая задача, решение которой дает не сиюминутный эффект, требует сопоставления расходов на повышение долговечности не только с прямым эффектом, но и с многими дополнительными эффектами в виде улучшения экологической обстановки, улучшения санитарно-гигиенических усло-

вий в помещениях промышленных предприятий, жилых и общественных зданий. Рассмотрение проблем повышения долговечности должно осуществляться в двух аспектах: изучение характеристик окружающей среды и выявление ведущих факторов воздействия среды на арматуру и бетон, особенно на железобетонные конструкции в целом, изучение механизма и кинетики коррозионных процессов и разработка на этой

основе способов повышения стойкости бетона и железобетона в агрессивных средах [4]. Одной из важнейших характеристик бетона, влияющей на его долговечность, является проницаемость бетона.

Проницаемость бетона, развитие методов определения пористости и проницаемости. Проницаемость бетона – свойство бетона пропускать через себя газы или жидкости при наличии градиента давления (регламентируется маркой по водонепроницаемости W) либо обеспечивать диффузионную проницаемость растворенных в воде веществ в отсутствие градиента давления (регламентируется нормированными величинами плотности тока и электрическим потенциалами) [6].

Проникание в бетон жидких агрессивных веществ существенно согласно [3] влияет на его долговечность, например при вымывании $\text{Ca}(\text{OH})_2$ или при действии агрессивных растворов. Интенсивность проникания их определяется проницаемостью бетона, которая является важной характеристикой стойкости бетона, в том числе ее морозостойкости. В армированном бетоне проникание влаги и воздуха вызывает коррозию арматуры, что ведет к увеличению ее объема, растрескиванию и отслаиванию защитного слоя бетона. Движение сквозь толщу бетона может обуславливаться не только давлением воды, но и градиентом влажности на противоположных поверхностях бетона или осмотическим эффектом.

В цементном камне и заполнителе присутствуют поры. В бетоне имеются пустоты в результате недостаточного уплотнения или водоотделения, составляющие от 1 до 10 % от объема бетона. Так как зерна заполнителя связаны в плотном бетоне цементным камнем, основную роль в проницаемости бетона играет проницаемость цементного камня.

Следует различать капиллярные поры и поры в геле. Первые составляют 0...40 % от объема цементного камня, а вторые – около 28 % в зависимости от водоцементного отношения и степени гидратации.

Объем пор в бетоне как характеристика его проницаемости измеряется водопоглощением, которое обычно определяется высушиванием образца до постоянного веса, насыщением водой и измерением увеличения веса в процентах к

весу сухого образца.

Фильтрация воды через бетон подчиняется общим законам фильтрации через пористые тела. Цементный камень состоит из частиц, соединенных друг с другом только на небольшой части их общей поверхности, часть воды находится в пределах поля сил твердой фазы, т. е. адсорбируется. Эта вода имеет большую вязкость, но достаточно подвижна и участвует в фильтрации.

Проницаемость бетона не является простой функцией его пористости, но зависит также от размера, длины и распределения пор. Так, хотя пористость цементного геля 28 %, его проницаемость составляет всего $7 \cdot 10^{-14}$ см/сек. Таким образом, проницаемость цементного камня определяется его капиллярной пористостью. Проницаемость цементного камня меняется в процессе его гидратации. В цементном тесте фильтрация воды определяется размером, формой и концентрацией цементных частиц. В процессе гидратации проницаемость резко уменьшается, так как объем геля (включая поры) примерно в 2,1 раза больше объема негидратированного цемента и гель заполняет часть пор, которые вначале были заполнены водой [3].

В затвердевшем цементном камне проницаемость зависит от размера, формы и концентрации частиц геля и замкнутости капилляров. Проницаемость бетона зависит от свойств цемента. При одинаковом водоцементном отношении цемент грубого помола образует более пористый цементный камень, чем цемент тонкого помола.

Состав цемента влияет на проницаемость лишь настолько, насколько изменяется степень гидратации. В целом, можно предположить, что чем выше прочность цементного камня, тем ниже его проницаемость, а прочность – функция относительного объема геля в свободном пространстве.

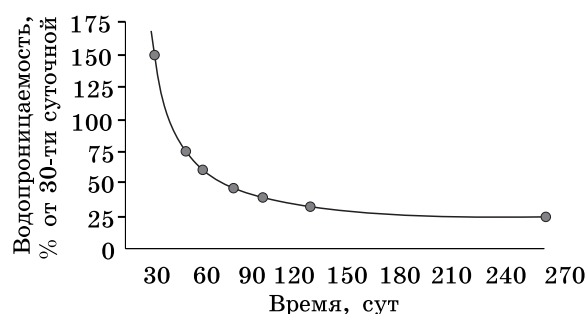
Проницаемость бетона можно оценить коэффициентом проницаемости согласно [7], который измеряется количеством воды V , прошедшей через 1 см^2 образца в течение 1 часа при постоянном давлении:

$$K_{\text{пр}} = \frac{V}{At(\rho_1 - \rho_2)},$$

где A – площадь образца, см^2 ; t – время, ч; ρ_1 и ρ_2 – градиент давления.

Зависимость проницаемости от В/Ц на практике подтверждается достаточно редко, так как при одинаковом В/Ц макропористость зависит от вида и расхода цемента, степени уплотнения и ряда других факторов, которые оказывают заметное влияние на проницаемость бетона.

При увлажнении бетона мельчайшие поры и капилляры заполняются водой, которая под воздействием физических поверхностных сил значительно теряет свою подвижность и закупоривает капилляры. Это явление носит название коагуляция пор и капилляров, приводит к снижению проницаемости бетона. С увеличением возраста бетона изменяется характер его пористости, постепенно уменьшается объем макропор, которые зарастают продуктами гидратации цемента, и в результате уменьшается проницаемость бетона (рисунок).



Влияние возраста бетона на его водопрооницаемость (за 100 % принята водопрооницаемость в возрасте 30 суток)

Зависимость проницаемости от плотности. Структура порового пространства бетона, характеризуется широким диапазоном радиусов капилляров от 15 А до десятых долей миллиметра. В процессе продолжающейся длительное время гидратации капилляры заполняются продуктами новообразований, которые перекрывают на отдельных участках капилляры. Разнообразные по размерам радиусы капилляров определяют различные механизмы переноса через бетон жидкостей и газов.

В крупнопористых бетонах течение газов и жидкостей подчиняется законам аэро- и гидродинамики. В наиболее массовых видах тяжелого и легкого бетона проникание газов и жидкостей происходит по закону Пуазейля в ламинарном, и, возможно, в турбулентном режимах. Специальные виды бетонов, могут характеризоваться

капиллярным переносом жидкости, кнудсеновским потоком газа и диффузионным переносом газа и жидкости. Явления диффузии, осмоса и диализа типичны для эксплуатации бетонов в химической промышленности. Влияние вязкости и плотности флюида в вязкостном (пуайзелевском) потоке рассмотрено А. С. Беркманом [8]:

– при ламинарном потоке:

$$\Delta p = k \frac{\eta \cdot v \cdot b}{r^2};$$

– при турбулентном:

$$\Delta p = k \frac{\Pi^2 \cdot n \cdot b}{l},$$

где k – коэффициент проницаемости η – вязкость флюида; v – средняя линейная скорость потока; b – толщина тела; Π – пористость; n – плотность газа, отнесенная к плотности воздуха; r – радиус капилляра.

Для представления капиллярно-пористых материалов в качестве проницаемого тела различными авторами в [9] были предложены упрощенные модели. Дамкелер, Л. С. Лейбензон [10], Баррер [11], Флад [12], Дейс [13] и др. в своих работах исходили из модели пористой системы в виде цилиндрических каналов, параллельных между собой. Одним из главных недостатков этой модели является неправильное представление о том, что проницаемость пористого тела в поперечном направлении равна нулю, что не соответствует действительности.

Наиболее распространенная модель пористого тела, которая предложена Слихтером, может быть представлена в виде пространства, заполненного одинаковыми шарообразными частицами (модель фиктивного грунта). Укладка может быть кубической, гексагональной, тетраэдрической. Подобная модель состоит из капилляров с кривой осью, имеющих в поперечнике треугольник, который периодически изменяется от максимума до минимума.

В работах Дарапского, а также Манегольда [14] указывается, что в системе из большого числа шаров, уложенных несколькими слоями, можно получить различные системы вследствие того, что некоторые шары, попадая в углубление между нижележащими шарами, изменяют упаковку. Так, при более плотной упаковке получают две различные формы пор вместо одной, принимаемой Слихтером. Недостатки модели Слихтера: ограниченный объем

пористости и точечные контакты соприкасающихся частиц, что не позволяет рассматривать подобную модель как твердое тело.

По мнению М. М. Дубинина исследуемая пористая структура – это разветвленная система крупных и мелких пор, связанных между собой микропорами.

Исследования методами Бехгольда–Думанского и оптической микроскопии показали, что длина капилляров максимальных радиусов, как правило, в несколько раз превосходит толщину образца. Подобные капилляры имеют переменное сечение, перемежаясь с шаровидными порами, и являются типичными представителями сеточных капилляров. Эта система микрокапилляров лучше всего выражается схемой Викка и М. М. Дубинина.

Структура макропор характерна для большинства изделий из бетона и предопределяет в основном его физико-химические свойства, в том числе и проницаемость, хотя общий объем пор радиусом больше 10^{-5} см не превышают 30 % от всего объема в бетоне и, как правило, составляет 10...15 %. По параметрам полной пористости материала можно только приблизительно судить о его проницаемости.

Газ или жидкость, протекающие через тело, называют флюидами. Процесс переноса газа или жидкости через материал обусловлен проницаемостью или фильтрацией.

Для бетона характерны различные механизмы переноса газов и жидкостей под влиянием перепада давлений, концентраций, температур, электрических потенциалов. Флюид через бетон может проникать одновременно по нескольким механизмам. Однако превалирует, как правило, один механизм переноса для большинства железобетонных изделий при наличии перепада давления в ламинарном, и, возможно, в турбулентном состоянии.

Проницаемость бетона характеризуется широким диапазоном значений коэффициентов проницаемости (более десяти порядков). Поэтому многочисленные методы определения проницаемости бетона можно разделить по количеству профильтровавшегося количества флюида на две группы: высокого и низкого содержания флюида. К первой группе можно отнести бетоны, проницаемость которых определяется пуйзелевским и кнудсеновским переносом флюида, а также капиллярным потоком

при стандартных размерах образца. Ко второй группе относятся бетоны, проницаемость которых определяется диффузионным, осмотическим, термодиффузионным и электрокинетическими механизмами переноса.

Методы первой группы: количество флюида, которое прошло через образец, может быть измерено непосредственно физическими методами или косвенно с помощью химического, физико-химического и радиохимического анализа.

Методы второй группы учитывают специфику механизма переноса флюида. Наиболее многочисленны методы, связанные с диффузионным переносом. При этом коэффициент определяется непосредственно прямым путем, либо косвенно – по значениям коэффициента диффузии, растворимости и по их взаимосвязи с коэффициентом проницаемости.

Классическим методом определения коэффициента проницаемости диффузионного переноса является метод Баррера. Коэффициент проницаемости k рассчитывается по уравнению [15]:

$$k = \left[\left(\frac{V_K}{T_{OP}} + \frac{V_{сист}}{T_{сист}} \right) \frac{\Delta p}{760} 273 \right] \frac{760}{p} \frac{b}{S \Delta x},$$

где p – давление газа в газовой камере; b – толщина образца; S – поверхность образца; Δp – увеличение давления в вакуумированной камере; Δx – время, соответствующее увеличению давления в камере; V_K – объем вакуумируемой камеры; $V_{сист}$ – объем не термостатированной части вакуумной системы; T_{OP} – температура опыта; $T_{сист}$ – температура комнаты.

Для определения коэффициента проницаемости образцов цементного камня и раствора высокой плотности при диффузионном переносе можно использовать метод, разработанный С. А. Рейтлингером.

Зависимость проницаемости бетона от факторов приготовления бетонной смеси. Условно факторы, влияющие на проницаемость бетона можно разделить на две группы: технологические (компоненты бетонной смеси, приготовление, формирование бетона и уход за ним) и изменения в бетоне во времени, а также под воздействием агрессивных сред (изменение физико-механических свойств бетона, в том числе и проницаемости).

Факторы первой группы – это исходные составляющие бетонной смеси: цемент и заполнители. Цемент характеризуется минералогическим составом и дисперсностью, заполнители – гранулометрическим, минералогическим составами, шероховато-

стью поверхности, пористостью, содержанием агрессивных реагентов.

При прочих равных условиях наименьшей проницаемостью обладают различные виды расширяющихся и напрягающих цементов.

Увеличение тонкости помола цемента содействует созданию микрокапиллярной структуры цементного камня и значительному снижению объема макрокапилляров, т. е. уменьшению проницаемости. Одновременно возрастает водопотребность цемента, понижается трещиностойкость бетона, поэтому применение высокодисперсионных вяжущих прямым образом зависит от степени уплотнения бетонной смеси и условий эксплуатации конструкций. Основные требования, предъявляемые к заполнителю для низкопроницаемых бетонов, касаются его гранулометрического состава, загрязненности, шероховатости и пористости. Для снижения проницаемости бетона рекомендуется использовать в качестве заполнителей твердые породы, такие как базальт, доломит, порфир, андезит.

Состав бетонной смеси в значительной степени предопределяет проницаемость бетона. В этом случае основными показателями состава смеси являются: водоцементное отношение, расход цемента, соотношение заполнителей и цемента, а также крупного и мелкого заполнителей.

Пористость и проницаемость снижается с уменьшением водоцементного отношения до определенного оптимума, после чего резко возрастают из-за нехватки цементного теста. Поэтому одним из существенных показателей является коэффициент раздвижки, характеризующий объем цементного теста и объем пустот в заполнителе.

Если недостаточное уплотнение смеси обязательно приводит к резкому увеличению проницаемости бетона, то излишнее вибрирование может вызвать расслоение смеси, повысит внутреннее водоотделение, а следовательно, проницаемость бетона. Для получения непроницаемого бетона бетонную смесь необходимо уплотнять при минимальной подвижности, допускаемой способом уплотнения.

Заключение

В статье рассмотрены свойства увеличения долговечности бетонных, железобетонных изделий, конструкций. Описываются способы повышения водонепроницаемости бетона, снижения его водопоглощения. Приведены расчетные зависимости для определе-

ния свойств бетона.

Библиографический список

1. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения: ГОСТ Р 54257-2010. – М.: Стандартинформ, 2011. – 18 с.
2. Черкасов Г. И. Введение в технологию бетона. – Иркутск: Иркутский политехнический институт, Восточно-Сибирское книжное издательство, 1974.
3. Невилль А. М. Свойства бетона: [пер. с англ.] / В. Д. Парфенова, Т. Ю. Якуб. – Москва: Изд-во лит-ры по строительству, 1972.
4. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев [и др.]. – М.: Стройиздат, 1990. – 317 с.
5. Структура и свойств цементных бетонов / А. Е. Шейкин [и др.]. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.
6. Бетонные и железобетонные конструкции, основные положения: СП 63.13330.2012: Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: Минрегион России, 2012. – 148 с.
7. Баженов Ю. М. Технология бетона: Учебник. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 500 с.
8. Беркман А. С., Мельникова Е. Г. Структура и морозостойкость стеновых материалов. – М.: Госстройиздат, 1962. – 165 с.
9. Barrer R. M. 1953. A new approach to gas flow in capillary systems // J. Phys. Chem. – 1953. – Vol. 57. – P. 35.
10. Лейбнзон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. – М.: ОГИЗ Гос. изд. тех.-теор. литературы, 1937.
11. Баррер Р. М. Диффузия в твердых телах: [пер.с англ.] / Р. М. Баррер. – М., 1958 – 390 с.
12. Flood T. F. The solid-gas interface. – М.: Dekker, 1967.
13. Decey J. R. Colstown Symposium. – Bristol, 1958.
14. Manengold T., Solf K., Die Zechnerische und experementalle Bestimmung des Hohlraumvolumens in kompakter Materie. – Kolloid Z., 1937, Bd.81.
15. Рейтлингер С. А. Проницаемость полимерных материалов. – М., 1974. – 272 с.

Сведения об авторе

Чикин Александр Вячеславович, аспирант (e-mail: 123_asy@mail.ru)

Information about the author

Chikin Aleksandr Viacheslavovich, post-graduate student (e-mail: 123_asy@mail.ru)