

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Э. И. Батяновский  
А. И. Бондарович

# **ВИБРОПРЕССОВАННЫЙ БЕТОН: ТЕХНОЛОГИЯ И СВОЙСТВА**

**Минск  
БНТУ  
2018**

УДК 666.972

**Батяновский, Э.И.** Вибропрессованный бетон: технология и свойства / Э. И. Батяновский, А. И. Бондарович. – Минск: БНТУ, 2018. – 263 с. – ISBN 978-985-583-088-8.

В монографии отражена проблематика технологии вибропрессования изделий из цементного бетона. Рассмотрены все основные технологические переделы, влияющие на качество и физико-технические свойства вибропрессованного бетона. Основное внимание уделено взаимосвязи структуры и морозостойкости бетона, являющихся базой его эксплуатационной надежности и долговечности.

Книга предназначена для производителей изделий из вибропрессованного бетона и может быть полезна проектировщикам, инженерно-техническим работникам строительной отрасли, преподавателям, аспирантам, магистрантам, студентам учебных заведений строительного профиля.

Табл. 54. Ил. 36. Библиогр. 125 назв.

Рекомендовано к изданию научно-техническим советом  
Белорусского национального технического университета  
(протокол № 4 от 21 апреля 2017 г.)

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, директор ГП «Институт  
жилища – НИПТИС им. Атаева С. С.» *В. М. Пилипенко*;

доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой  
«Строительные конструкции зданий и сооружений»

ГУО «Белорусско-российский университет»,  
профессор *С. Д. Семенюк*;

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры  
«Строительство и эксплуатация дорог» Белорусского национального  
технического университета *Я. Н. Ковалев*

**ISBN 978-985-583-088-8**

© Батяновский Э.И.,

Бондарович А.И., 2018

© Белорусский национальный  
технический университет, 2018

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Способ или технология вибропрессования в современных условиях получила широкое распространение при изготовлении мелкоштучных изделий различного назначения. Наиболее значительные объемы «вибропрессованной» продукции занимает производство изделий благоустройства – тротуарные плиты и бортовой камень. Условия эксплуатации этих изделий характеризуются высокой агрессивностью эксплуатационной среды. На бетон воздействуют механические нагрузки (истирание, на сжатие и изгиб, ударные – сосредоточенно приложенные, возникающие при устранении наледей, снега и пр.) при одновременном с ними агрессивном действии попеременного увлажнения-высушивания, замораживания-оттаивания, растворов солей грунтовых вод и антиобледенителей.

Для таких условий «работы» бетона важно сформировать ему на стадии изготовления изделий плотную, трудно проницаемую структуру, являющуюся основой как прочности бетона, так и его эксплуатационной надежности и долговечности. В этой связи чрезвычайно важен анализ исследований, направленных на изучение проблематики процессов уплотнения бетона, формирования его структуры и взаимосвязи последней с долговечностью, в частности, с морозостойкостью бетона.

Отраженные в настоящей работе результаты исследований авторов базируются на анализе и использовании знаний в данной области, накопленных благодаря исследованиям И.Н. Ахвердова, А.А. Афанасьева, А.Е. Десова, Г.К. Дементьева, Г.И. Горчакова, Б.В. Гусева, Ф.М. Иванова, М.М. Капкина, А.И. Конопленко, А. Коллинса, Г.Я. Куноса, В.В. Михайлова, В.М. Москвина, В.А. Невского, Ю.А. Нелиндера, Т. Пауэрса, А.М. Подвального, Н.А. Попова, П. Ребю, Б.Г. Скрамтаева, В.В. Стольниковца, А.Е. Шейкина, С.В. Шестоперова, В.Н. Шмигальского и многих других исследователей.

Необходимо отметить, что, несмотря на огромный массив информации, накопленной с 30-х годов XX века по проблематике оценки и обеспечения морозостойкости цементного бетона во взаимосвязи с его структурой, исследования по этому направлению (в частности, для вибропрессованного бетона) по-прежнему актуальны. Во-первых, потому что вибропрессование элементов благо-

устройства (тротуарных, облицовочных, отделочных плит, бортового камня разных типоразмеров и пр.) предприятиями строительной отрасли Беларуси в настоящий период является основным способом (или технологией) их производства. Высокая производительность используемого оборудования (зарубежного и отечественного производства) обеспечила этой технологии преимущество перед иными вариантами изготовления такой (мелкоштучной, малогабаритной) продукции. А, во-вторых, в связи с тем, что далеко не всегда выпускаемые вибропрессованные изделия соответствуют необходимым качественным показателям. В первую очередь это относится к обеспечению их эксплуатационной надежности и долговечности, которая оценивается показателем морозостойкости бетона.

С целью решения задачи по повышению морозостойкости (а значит – долговечности) вибропрессованного бетона были выполнены комплексные экспериментальные исследования, результаты которых составляют существо настоящей монографии.

Авторы выражают благодарность рецензентам работы:

доктору технических наук, профессору, директору ГП «Институт жилища – НИПТИС им. Атаева С.С.» В.М. Пилипенко;

доктору технических наук, профессору, зав. кафедрой «Строительные конструкции зданий и сооружений» ГУО «Белорусско-российский университет» профессору С.Д. Семенюку;

доктору технических наук, профессору, профессору кафедры «Строительство и эксплуатация дорог» Белорусского национального технического университета Я.Н. Ковалеву за детальный анализ ее результатов, замечания и предложения, которые были учтены при окончательной доработке текста монографии.

# 1. СТРУКТУРА И МОРОЗОСТОЙКОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО БЕТОНА

## 1.1. Гипотезы и механизм морозной деструкции бетона

В развитии теории морозостойкости бетона представлено множество гипотез о причинах и механизме его постепенного разрушения при периодическом замерзании - оттаивании в водонасыщенном состоянии [1].

Первым и наиболее простым объяснением разрушения бетона в этих условиях явилось давление воды, замерзающей в его порах. Роль расширения воды при замерзании учитывается и в современных гипотезах, однако только 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 [2], Н.А. Попова, В.А. Невского, Ю.А. Нилендера [3, 4] выполненные в 30–50–х годах XX века. Ю.А. Нилендер первым дал научную классификацию пор (пустот) и трещин в бетоне, выделив поры (пустоты), образовавшиеся при укладке (каверны, воздушные поры, заполненные водой поры), и трещины, возникшие в результате силовых воздействий. Трещины от силовых воздействий подразделены на две группы: от внешних нагрузок и от собственных напряжений. Собственные напряжения в бетоне, по классификации Ю.А. Нилендера, могут быть трех родов:

- макроструктурные напряжения, возникающие вследствие неравномерного распределения температуры или влаги в объеме бетона, а также при условиях, препятствующих свободной деформации от усадки, набухания и изменений температуры;

- микроструктурные напряжения, возникающие в оболочках из цементного камня вокруг зерен заполнителя вследствие различия их деформаций при изменении влажности и температуры; при этом микроструктурные напряжения появляются в стенках пор цементного камня еще в период твердения вследствие теплового расширения воды затворения и воздуха при пропаривании, а также под действием капиллярных сил, осмотического давления, давления замерзающей в порах воды;

- ультрамикроструктурные напряжения, возникающие в цементном камне между его кристаллогидратной и гелевой составляющими.

Н.А. Попов совместно с В.А. Невским экспериментально исследовали развитие в бетоне повреждений усталостного типа [4]. 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. Обобщение опытных данных привело авторов к выводу, что с увеличением деформаций усадки и набухания бетона понижается его морозостойкость. Исследования Н.А. Попова и его учеников доказали принципиальную возможность оценки сравнительной стойкости материалов по отношению к многократным циклическим воздействиям среды по характеру увеличения внешних размеров и объема образца, по сути легших в основу практикуемого в современных условиях «дилатометрического» метода оценки морозостойкости бетона при одноразовом замораживании образцов в водонасыщенном состоянии.

Особое значение для оценки устойчивости бетона в реальных условиях эксплуатации имеют результаты экспериментов В.М. Москвина и А.М. Подвального, выявивших эффект изменения морозостойкости бетона под влиянием силовых воздействий от внешних нагрузок, в частности при нагружении образцов-балочек на изгиб [5]. Было установлено, что существует некоторая предельная величина напряжений (составившая 0,2 предела прочности бетона на растяжение при изгибе), ниже которой влияние изгибающих напряжений становится малозаметным и морозостойкость напряженного бетона мало отличается от морозостойкости ненагруженного бетона; в случаях превышения этой величины морозостойкость бетона снижается.

Зависимость морозостойкости бетона от минералогического состава цемента была обоснована С. В. Шестоперовым [6, 7]. Так цемент для бетонов высокой морозостойкости должен быть алитовым ( $C_3S \geq 55\%$ ), содержание трехкальциевого алюмината необходимо ограничивать (4...6%). Способность бетона сопротивляться многократному замораживанию и оттаиванию им увязывалось также с образованием воздушных «буферных» пространств в капиллярах цементного камня, являющихся результатом контракции.

Морозостойкость и долговечность бетона в зависимости от строения его «порового пространства» исследована, в частности, в

работе В. В. Стольников [8], во взаимосвязи не только с абсолютной величиной пористости, но и физическим характером пор – разобщенные они (т.е. – замкнутые) или сообщающиеся. По мнению В. В. Стольников, система капилляров в зоне контакта цементного камня и зерен заполнителей является основным путем проникания в бетон воды. В качестве суммарной физической характеристики строения бетона обоснован и принят показатель интенсивности капиллярного всасывания, определяемый по разработанной им методике. В его исследованиях установлено 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 бетона и сокращение до минимально необходимого расхода цемента при введении добавки СНВ (смола нейтрализованная воздуховывлекающая), обеспечивающей формирование замкнутой пористости и эффект гидрофобизации.

К одной из наиболее существенных причин морозной деструкции бетона современная теория относит миграцию влаги в его объеме под влиянием градиента влажности и температуры. Получившая развитие в 30–50-ые годы XX века применительно к механике мерзлых грунтов в исследованиях Н. А. Цытовича, М. И. Сумгина [9], а также в работах А. В. Лыкова [10] для процессов сушки пористых материалов теория миграции влаги применена А.И. Конопленко, для объяснения процесса разрушения бетона при попеременном замораживании и оттаивании [11]. Вследствие миграции увеличивается степень насыщения водой пор вблизи охлаждаемой наружной поверхности, что обуславливает, в первую очередь, разрушение наружных слоев бетона.

В 40–50-х годах XX века в ряде работ зарубежных авторов – Валента, Вогрина, по данным источника [1], обосновывалась гипотеза о «термической несовместимости» компонентов бетона. Различие в величине их коэффициентов температурного расширения и возникающего при этом напряженного состояния (особенно в зоне контакта системы «заполнитель -цементный камень»), сопровождающегося образованием трещин, рассматривалось как одна из основных причин разрушения бетона при циклическом изменении температуры.

С позиции сегодняшнего дня этот фактор, безусловно следует относить к значимым с учетом деформаций «макроуровня» (т.е. в системе «заполнитель – цементный камень») и «микроуровня», т.е. в объеме цементного камня, рассматриваемого как сложное состояние остаточных частиц цемента, кристаллогидратных новообразований, гелеобразной фазы и жидкости, характеризующейся различными формами связи с твердофазными составляющими.

Гипотезу «гидравлического давления», основанную 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 предложил Пауэрс [12, 13]. В последующем Пауэрс перешел к оценке давления воды, заземленной и замерзающей в ячейке (поре) цементного камня.

Следует отметить, что гипотеза гидростатического давления, которая в виде объемно проявляющегося эффекта не нашла подтверждения, не может быть исключена, как фактор локальных напряжений, возникающих в виде гидравлического давления в тупиковых дефектах структуры бетона и пористых материалов в целом. Г. И. Горчаков и другие исследователи [1] считают, что гипотеза гидравлического давления взаимосвязана с «теорией интервала между порами», изложенной в работах Пауэрса. Согласно этой теории, роль вовлеченного в бетон воздуха состоит в том, чтобы предотвратить расширение цементного камня во время замерзания. При этом эффективность замкнутых и заполненных воздухом пор зависит от толщины слоев цементного камня между ними, т. е. от фактора интервала.

Гипотеза морозной деструкции бетона под действием давления растущих кристаллов льда предложена Коллинсом [14]. Согласно этой гипотезе в бетонном массиве образуется лед в виде слоев, формирующихся и располагающихся параллельно наружной охлаждаемой поверхности.

Предположение о послойном образовании льда не получило подтверждения в опытах Горчакова и др. [1] по изучению миграции воды в бетоне при циклическом замораживании. Как уже отмечалось фактор давления льда, как бы он ни образовывался (включая и вариант «параллельных слоев»), далеко не единственный из совокупности, приводящей к деструкции бетона. Тем более что много-



численными исследователями [15–22] показано: при замерзании воды, испытывающей высокие давления (например, в тонких слоях адсорбционно-связанной твердой фазой), образуются модификации льда плотностью более  $1 \text{ г/см}^3$ . В результате фазовый переход такой воды в лед происходит без увеличения в объеме, а, следовательно, без сопровождающего расклинивающего давления на поверхность, ограничивающую объем жидкости. Так в особо плотном бетоне «сухого формования» по этой причине снижения прочности, относительно начальной, не зафиксировано после 1000 циклов стандартных испытаний образцов [23].

Шейкин А. Е. и другие исследователи [24–28] одним из наиболее значимых факторов, вызывающих морозную деструкцию бетона, выделяют усадку цементного камня, которая проявляясь в явном (трещинообразование) и в неявном (скрытая на начальном этапе, но «развивающаяся» со временем до трещинообразования) виде, приводит к количественным (увеличение объема) и качественным (рост размеров пор) изменениям порового пространства бетона. В результате усадочных явлений развивается явная и «непроявившаяся» капиллярная усадка, а вызываемое ей напряженное состояние при переменных температурно-влажностных условиях дополняет деструктивное воздействие на бетон других разрушающих его структуру факторов.

Следует отметить, что авторы разнообразных гипотез, объясняющих нарушения структуры и ухудшение физико-технических свойств бетона под воздействием циклического замораживания-оттаивания, зачастую отстаивали собственную точку зрения на «механизм» деструкции бетона, основываясь на общих проявлениях этого отрицательного воздействия. На наш взгляд, все приведенные в настоящем кратком обзоре явления имеют место при воздействии на бетон знакопеременной температуры и проявляются в его деструкции со временем. По существу, их совокупность и есть механизм, приводящий к накоплению и последующему проявлению нарушений структуры бетона, потере его качества под воздействием мороза. То есть эти факторы присущи морозному воздействию на бетон и являются объективными причинами его разрушения.

При этом же исследователи, выдвигавшие и обосновывавшие рассмотренные гипотезы морозной деструкции бетона, приходят к

общему выводу, что решающими факторами морозостойкости являются характеристики строения структуры бетона, т. е. состояние его пористости.

Анализ материала, изложенного в обзоре литературы по настоящему разделу, позволяет сделать вывод, что механизм возникновения и «развития» нарушений структуры бетона, подвергаемого попеременному замораживанию и оттаиванию в насыщенном водой состоянии, чрезвычайно сложен. На наш взгляд, наиболее рационально представить его как комплексное явление, сочетающее совокупность деструктивных факторов, включая давление льда при кристаллизации свободной воды; гидродинамику ее перемещения (миграции) под давлением градиента тепла и влагосодержания (термовлагопроводности); гидравлическое давление защемленной в тупиковых порах и дефектах структуры жидкости; напряжения, возникающие от разницы температурных деформаций составляющих бетона и цементного камня (на макро- и микроуровне в контактных зонах); усталостные (постепенно увеличивающиеся) дефекты структуры от многократно повторяющихся знакопеременных деформаций; понижение со временем концентрации растворенных в поровой жидкости продуктов гидролиза цемента, как за счет образования нерастворимых кристаллогидратов (отражение продолжающейся реакции цемента с водой), так и из-за «подсоса» воды развивающимися дефектами структуры в период оттаивания образцов, что увеличивает содержание свободной воды в объеме бетона, и др.

В случае использования хлористых солей-антиобледенителей или испытательных солевых растворов действие означенных факторов на бетон дополняется следующим [29–36]. Во-первых, расклинивающим (в литературе часто называемым «кристаллизационным») давлением накопившейся соли, образовавшейся после пересыщения ее раствора в малых по объемам дефектах структуры цементного камня, в зоне контакта составляющих бетона и микротрещинах (порах) зерен заполнителя. При этом механизм образования и увеличения дефектов структуры может проявиться как за счет роста кристаллов соли, так и за счет «обжатия» их, например, прослойкой (оболочкой) цементного камня при отрицательных деформациях в период охлаждения бетона и возникающих при этом растягивающих усилий в цементном камне, вызывающих появление в нем трещин. Во-вторых, усилением процесса миграции

воды и ростом влагоемкости бетона, в объеме пор которого накапливается соль. Соответственно возрастает, в сравнении с водой, эффект расклинивающего действия в устье трещин (дефектов) тонких пленок жидкости-раствора. В-третьих, возникает напряженное состояние на уровне микроструктуры цементного камня из-за локальных микроэффектов градиента температур (эндокринный эффект), сопровождающих процесс «очагового» растворения – кристаллизации соли. Кроме отмеченного, понижение эвтектической точки раствора соли способствует глубокому проникновению жидкой фазы в дефекты структуры все меньшего сечения, углубляет развитие процесса массопереноса соли и усиливает эффект деструкции бетона в целом.

Следует отметить, что в реальных условиях эксплуатации элементов, благоустройства (тротуарных плит, бортового камня и пр., т.е. изделий, являющихся объектом исследования) отрицательное (разрушающее) воздействие солей-антиобледенителей не прекращается и при положительной температуре окружающей среды. Попеременное увлажнение-высушивание, изменение температуры (даже в пределах суток) вызывают соответствующие деформации бетона, побуждают проявление процессов растворения – кристаллизации попавшей в его поры соли, а также эндокринного эффекта, то есть, сопровождается постоянным деструктивным воздействием на бетон.

Как уже отмечалось, все исследователи проблемы морозной и коррозионной устойчивости бетона указывают на непосредственную взаимосвязь его стойкости со строением и состоянием порового пространства, т.е. с проницаемостью структуры бетона. При этом направленность исследований в основном относится к оценке «исходной» морозостойкости бетона или к процессу его деструкции под влиянием переменной температуры. На наш взгляд, совершенно недостаточно уделено внимание проблеме долговечности, т.е. устойчивости бетона при совместном воздействии на него эксплуатационной среды (замораживание - оттаивание) и механических нагрузок. Последние способны вызвать нарушение структуры бетона, рост его пористости и проницаемости, а в результате – снижение морозостойкости, эксплуатационной надежности и долговечности.

## **1.2. Взаимосвязь морозостойкости бетона с его пористостью (структурой), свойствами и миграцией насыщающей его жидкости и деформациями при замораживании-оттаивании**

По действующим в Беларуси стандартам [37, 38] нормируемое водопоглощение мелкозернистого бетона тротуарных плит и бортовых камней не должно превышать 6 %, а с крупным заполнителем - 5 % по массе. Это означает, что при полном водонасыщении (по ГОСТ 12730.3-87) образцы мелкозернистого бетона будут «содержать» до 130–135 л испаряемой при 100–110 °С воды на 1 м<sup>3</sup>, а образцы бетона с крупным заполнителем – примерно до 115–125 л в расчете на 1 м<sup>3</sup>. То есть, объемное содержание жидкой фазы в «теле» бетона составит около 11,5–13,5 %. Естественно, что в этих условиях (отметим – при нормируемом значении водопоглощения) циклическое воздействие знакопеременных температур будет сопровождаться разрушающим воздействием на структуру бетона. Активность и степень тяжести такого воздействия непосредственно связана с тем физическим состоянием, в котором находится жидкость в его поровом пространстве. В свою очередь именно состояние структуры бетона, его пор, особенно размеры сечений и объем открытой (сообщающейся) капиллярной пористости, непосредственно влияют на проницаемость и свойства воды, которые она проявляет при замораживании и оттаивании бетона.

Придерживаясь воззрений основополагающих работ Г. И. Горчакова и других исследователей [1], при рассмотрении связи морозостойкости и строения бетона считаем целесообразным исходить из обоснованного В.Н. Юнгом [39] представления о цементном камне как о микробетоне, состоящем из гелевых и кристаллических продуктов гидратации цемента, включений в виде негидратированных зерен клинкера и минеральных добавок.

При качественном уплотнении цементного теста 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 П. А. Ребиндером, построена по принципу интенсивности энергии связи и в полном виде приведена в книге

А. В. Лыкова [40]. По этой классификации все формы связи влаги с материалом подразделяются на три основные группы, включающие:

– химическую связь, возникающую в определенных молекулярных соотношениях и сохраняющуюся при сушке; для ее нарушения требуется прокаливание, либо химическое взаимодействие с другим веществом;

– физико-химическую связь, которая устанавливается не в строго определенных соотношениях и характеризуется изменением (уменьшением) энергии связи от адсорбционных к диффузионным слоям, при этом, адсорбционно-связанная вода имеет специфические свойства. Б. В. Дерягин экспериментально доказал, что тонкие пленки такой воды (толщиной менее 0,1 мкм) обладают свойствами упругого твердого тела [41, 42]. Существенно, что адсорбционно-связанная вода переходит в лед при более низких температурах, чем «объемная»;

– физико-механическую связь имеет часть испаряющейся воды, условно названная «капиллярной», так как удерживается в материале капиллярным давлением. Основная ее масса является свободной, сохраняет свои свойства и испаряется при сушке.

Следовательно, испаряющаяся вода имеет с цементным камнем две формы связи — физико-химическую и физико-механическую. На этой основе в работе [1] выделяются три основные группы пор, отличающиеся по размеру, расположению в цементном камне и по их влиянию на морозостойкость бетона.

*Капиллярные поры*, характеризующиеся размерами сечений от  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $50 \cdot 10^{-6}$  м (1–50 мкм), т. е. более чем в тысячи раз превышают размеры пор геля [12]. Капиллярные поры являются основным дефектом строения плотно уложенного бетона, понижающим его морозостойкость, вода замерзает в них при обычных условиях охлаждения (начиная с  $-6$  до  $-8$  °С) [1].

*Контракционные поры*, образующиеся вследствие уменьшения абсолютного объема системы цемент-вода. В. Н. Юнг, Ю. М. Бутт, В. Ф. Журавлев, С. Д. Окороков [39] указывали, что контракция вызывает уменьшение внешних размеров системы, дополнительное поглощение воды и образование в системе новых (контракционных) пор. По размерам контракционные поры занимают промежуточное положение между порами геля и капиллярными. При замерзании

бетона контракционные поры играют роль своеобразных запасных резервуаров, в которые может отжиматься часть воды из капиллярных пор. Благодаря этому, как считает Горчаков Г.И. [1], уменьшается давление замерзающей воды на стенки капиллярных пор и повышается морозостойкость бетона.

*Поры геля* (правильнее и по существу явления – поры структуры кристаллогидратных новообразований), представляют собой дефекты структуры составляющих его частиц, образованные мигрирующей и испаряющейся водой, адсорбционно связанной в гидратных оболочках частиц геля, и расположенные в агрегатах частиц цементного геля. Они имеют наименьший размер (примерно от  $15 \cdot 10^{-10}$  до  $40 \cdot 10^{-10}$  м, т. е. 15–40 Å или 150–400 нм) по сравнению с другими порами цементного камня [12]. Вода в порах геля находится в особом состоянии и не переходит в лед при низких температурах порядка –40 и даже –70 °С, что согласуется с выводами Н.А. Цыговича, М.И. Сумгина, Б.В. Дерягина и других исследователей о специфических свойствах тонких слоев воды [9, 16, 17, 21, 41, 42].

С позиции оценки морозостойкости бетона целесообразно подразделять [1] поры на три группы: микрокапилляры ( $r \leq 0,1$  мкм), макрокапилляры [ $(1-10) > r > 0,1$  мкм] и некапиллярные поры; часть исследователей дополнительно дифференцируют микропоры на ультрамикропоры ( $r \leq 50$  Å), и переходные микропоры ( $50 \text{ Å} < r < 0,1$  мкм).

Как уже отмечалось в работах Б.В. Дерягина [41, 42] и др. показано, что вода на границе с твердым телом по своей структуре, а следовательно, и по своим свойствам отличается от обычной воды. Н. Н. Федякиным [43] было установлено, что коэффициент объемного расширения воды для капилляров с радиусами меньше 0,1 мкм мало зависит от температуры и в значительно большей степени зависит от радиуса капилляра. На основании этих данных в работе [1] сделано предположение, что вода геля и вода в контракционных порах цементного камня сечением менее 0,1 мкм не увеличивается в объеме при охлаждении бетона и для повышения его морозостойкости необходимо уменьшение объема макрокапилляров, имеющих радиус более 0,1 мк (более 1000 Å).

*Различия в деформациях* цементного камня, растворной составляющей и крупного заполнителя при замораживании и отта-

ивании являются общепризнанным фактором морозной деструкции бетона. Изучению этого явления посвящен ряд работ [1, 14, 44–46] осуществлявшихся на образцах цементного камня, мелкозернистого (цементно-песчаного) бетона и бетона с крупным заполнителем.

На рис. 1.1 и 1.2 приведены результаты экспериментов В. М. Москвина и М. М. Капкина [44] в виде кривых относительных деформаций стали и цементного камня в зависимости от температуры (деформации при +20 °С приняты за нуль); по мере понижения температуры деформации цементного камня значительно отличаются от деформаций стали, которые имеют линейный характер (прямая № 1).

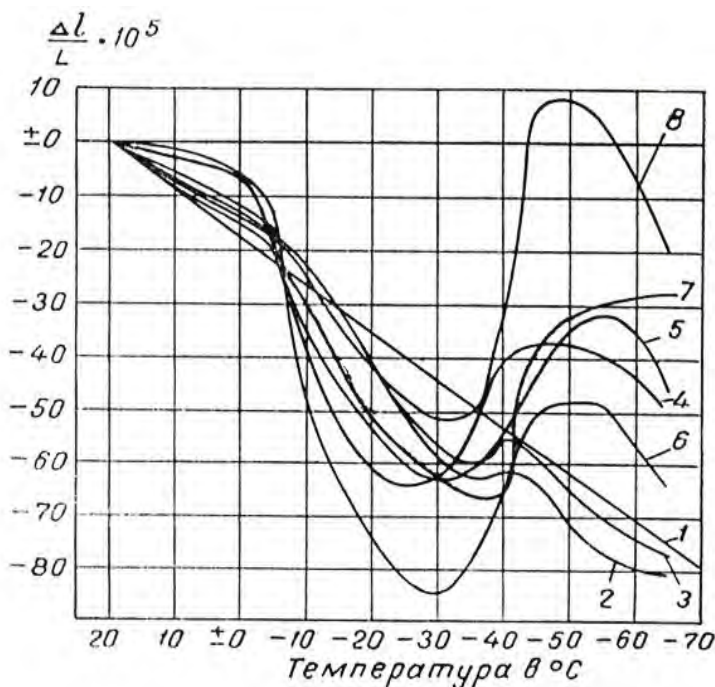


Рис. 1.1. Деформации цементного камня и стали в зависимости от температуры [1; 44]: 1 - сталь марки Ст.3; 2 - В/Ц = 0,25; 3 - В/Ц = 0,3; 4 - В/Ц = 0,4; 5 - В/Ц = 0,5; 6 - В/Ц = 0,6; 7 - В/Ц = 0,7; 8 - В/Ц = 0,8

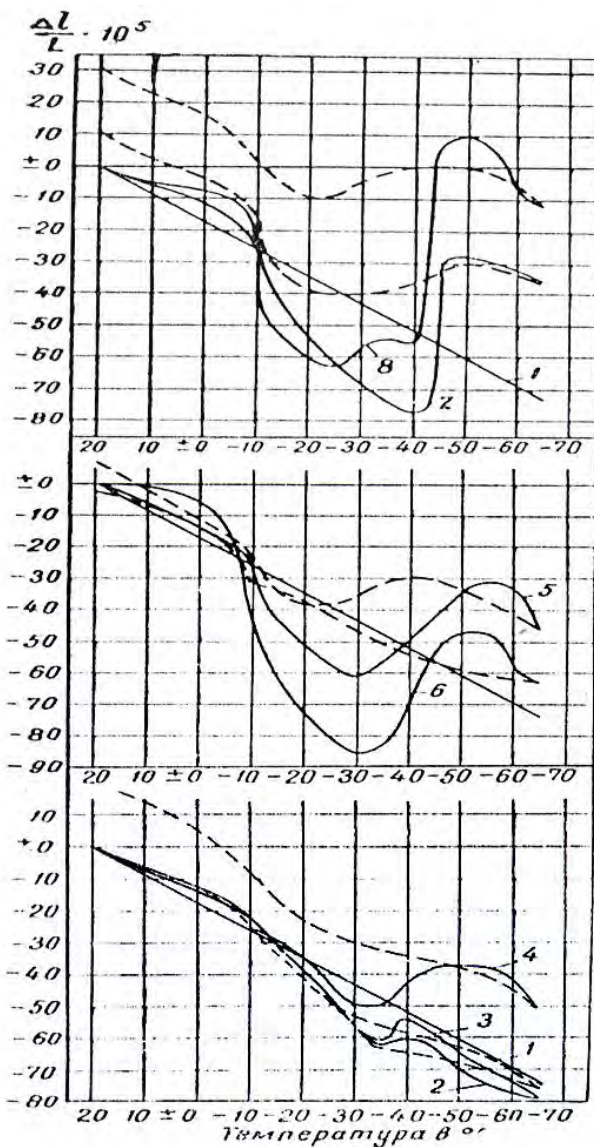


Рис. 1.2. Деформации цементного камня и стали в зависимости от температуры при замораживании (сплошные кривые) и оттаивании (пунктирные кривые) [1, 44].  
Обозначения те же, что и на рис. 1.1



Из рис. 1.2 видно, что при оттаивании цементного камня наблюдаются значительные остаточные деформации, которые возрастают с увеличением водоцементного отношения. Одновременно исследователи пришли к выводу, что деформации, возникающие при замораживании водонасыщенных образцов, зависят от характера пористости и количества поглощенной воды. Для образцов, насыщенных методом погружения, были получены кривые «температура-деформация», которые в области отрицательных температур имели два максимума, что указывает на наличие различных по размеру групп пор.

На рис. 1.3 и 1.4 приведены данные исследований Н. А. Попова, Г.И. Горчакова, И.И. Лифанова и др. [1, 46], характеризующие развитие деформаций сухого и водонасыщенного образцов мелкозернистого (цементно-песчаного) бетона в процессе их охлаждения от +15 до -54 °С.

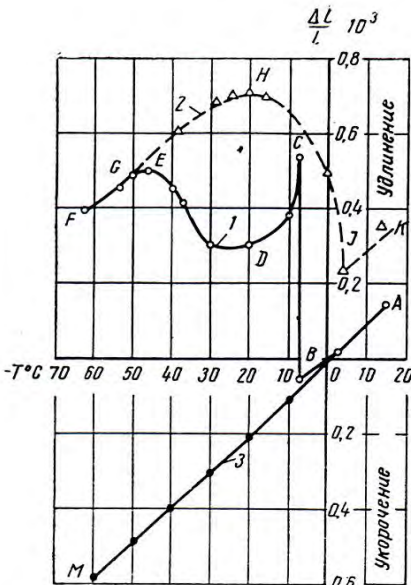


Рис. 1.3. Деформации образца [1, 46]:  
1 – охлаждение образца, насыщенного водой;  
2 – оттаивание этого же образца;  
3 – охлаждение сухого образца

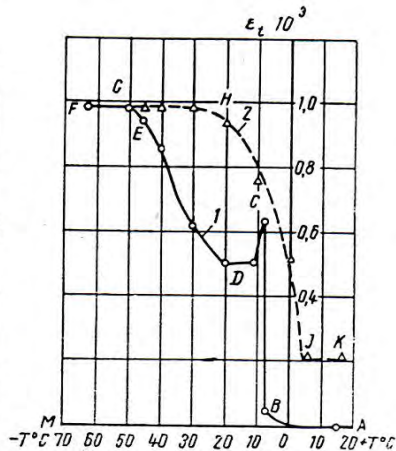


Рис. 1.4. Полное удлинение  $\epsilon_L$  образца, насыщенного погружением в воду [1, 46]:  
1 – при охлаждении;  
2 – при оттаивании

При охлаждении образца, взятого в сухом состоянии, происходило его равномерное термическое укорочение согласно кривой 3 (AM), на которой не наблюдалось аномалий.

Кривая F описывает деформации того же образца, но перед замораживанием насыщенного водой путем погружения в нее на шесть суток.

Вначале имело место уменьшение размера водонасыщения образца (участок AB). При температуре  $-7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (точка B) наблюдался резкий подъем, соответствующий скачкообразному удлинению образца на  $0,54 \cdot 10^{-3}$  и вызванный замерзанием воды в крупных (капиллярных) порах.

На рис. 1.4 кривая 1 характеризует изменение полного удлинения водонасыщенного образца ( $\epsilon_t$ ), отсчитанного от линии AM. Как показывает кривая 1 (см. рис. 1.3 и 1.4), после первого максимума удлинения, наблюдавшегося при  $-7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , дальнейшее охлаждение (примерно до  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) сопровождалось небольшим уменьшением относительного удлинения (на  $0,13 \cdot 10^{-3}$ ). При более низких температурах (после точки D) вследствие замерзания воды в более мелких порах удлинение снова возрастало и закончилось вторым максимумом при температуре  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Кривая 2 на рис. 1.3 и 1.4 характеризует деформации при оттаивании образца. Начиная с температуры « $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ », замерзший водонасыщенный образец в процессе оттаивания укорачивался. Однако его прежние размеры не восстановились; остаточное удлинение выражено ординатой АК. Наибольшая величина полного удлинения, наблюдавшегося при замораживании водонасыщенного образца, соответствовала точке G и составила  $0,98 \cdot 10^{-3}$ ; пластическая часть полного удлинения была равна примерно  $0,2 \cdot 10^{-3}$ . *Исследователи сделали вывод*, что накопление остаточных деформаций при циклическом замораживании является одной из главных причин растрескивания и разрушения цементного раствора и бетона, а также о том, что дилатометрическая кривая «температура—деформации» вполне объективно характеризует взаимосвязь строение порового пространства и морозостойкости цементно-песчаного раствора, отражая наличие в растворе разных по размеру и качеству пор. С помощью дилатометрической кривой можно выявить наличие наиболее опасных крупных капиллярных пор, которые вызывают разрушение

цементного раствора (и бетона) в случае частой смены температур даже при небольших морозах (около  $-10^{\circ}\text{C}$ ).

Еще одним существенным фактором деструктивного воздействия на бетон, влияние которого в недостаточной мере учитывается, является *миграция воды в бетоне* под воздействием знакопеременного температурного поля.

Основы теории миграции воды в пористых средах разработаны и сформировались в 30-ые – 50-ые годы XX века под влиянием основополагающих работ ученых советской школы: П.И. Андрианова, Н. А. Цытовича, М. И. Сумгина, З.А. Нерсесовой, А. В. Лыкова и др. [9, 10, 16, 17, 47, 48 и др.].

Согласно сформировавшимся воззрениям и в зависимости от конкретных условий в замерзающем бетоне влага находится и мигрирует в виде пара, жидкости и льда. При этом причиной миграции пара является разность парциальных давлений, возникающая вследствие разности температур, а также вследствие различной кривизны менисков в порах, причинами перемещения воды в бетоне являются сила тяготения и капиллярное давление, а также влияние напряжений, возникающих вследствие расширения части ее объема, переходящего в лед, и влияние сил кристаллизации: растущие кристаллы льда как бы «притягивают» молекулы воды из своей гидратной оболочки, цельность которой сохраняется за счет миграции в гидратный слой молекул свободной воды.

Миграция льда возможна под действием внешних сил и напряжений, которые возникают в материале при его замерзании и могут быть, по Б. П. Вейнбергу [47], причиной плавления части льда, находящегося в местах, характеризующихся повышенным давлением и пониженной температурой.

Данные (табл. 1.1), полученные разными исследователями в лабораторных условиях и приведенные в работе [1], показывают, что миграция воды усиливается при увеличении градиента температур, а также под влиянием попеременного многократного замораживания и оттаивания.

В источнике [1] приведены данные Г.И. Горчакова с сотрудниками, которые прямыми исследованиями на образцах-призмах ( $50 \times 50 \times 320$  мм, боковые грани которых были гидроизолированы парафином), погружая нижнюю грань – в воду при  $t \sim 17...19^{\circ}\text{C}$ ,

а верхняя грань – 6 ч охлаждалась до  $t \sim -25...-30$  °С и затем отогревалась до 17...19 °С, установили закономерность миграции и распределения воды в разных по высоте объемах бетона. Результаты экспериментов подтвердили как миграцию воды к охлаждаемой поверхности бетона, так и сосредоточение ее в зоне переменного замораживания-оттаивания во все возрастающем количестве, то есть, накопление жидкости в зонах холодной части образцов-призм.

Таблица 1.1

Распределение влаги в материалах при одностороннем  
охлаждении образцов [1]

Материал	Размеры образца, см	Температура концов образца, °С		Превышение наибольшей влажности по отношению к наименьшей, %	Авторы работ
		холодного	теплого		
Раствор 1:5	3 x 3 x 20,5	-14	+32	14...23	А. И. Конопленко
Раствор 1:3	3 x 3 x 18	-12	+18	5,6	М. И. Хигерович и Г. И. Горчаков
Раствор 1:2,06	7 x 7 x 22	-15	+20	4,6	Н. А. Попов и А. Г. Домокеев
Бетон 1:2,06:2,06	7 x 7 x 22	-15	+20	6,1...6,9	Н. А. Попов и А. Г. Домокеев

Таким образом, приведенные данные наиболее известных исследователей с различных позиций характеризуют деструктивные явления в бетоне, подвергающемся попеременному замораживанию-оттаиванию.

При этом становится очевидной прямая связь морозостойкости бетона с качеством (точнее, непроницаемостью) его структуры. В подтверждение этого тезиса приведем данные, полученные при испытании на морозостойкость особо плотного бетона сухого формирования [23], которую исследовали по стандартной методике (ГОСТ 10060, 1-й метод) путем переменного замораживания при температуре минус 18 °С и оттаивания в воде при температуре 18 °С при одном цикле в сутки и по ускоренной стандартной методике, как

для бетона дорожных и аэродромных покрытий (ГОСТ 10060.2–95, 3-й метод, замораживание в 5 % растворе NaCl при минус 50...55 °С и оттаивание в той же среде при 18 °С).

Таблица 1.2

Влияние повторного вибрирования на морозостойкость  
бетона [23]

Количество циклов замораживания-оттаивания	Прочность бетона на сжатие, $f_{cm}$ , МПа				Изменение $f_{cm}$ , %, относительно:			
	основные образцы		нормально-влажн. тверден.		контрольных образцов		нормально-влажн. тверд.	
	разовое	повторное	разовое	повторное	разовое	повторное	разовое	повторное
0	60,0	75,0	60,0	75,0	–	–	–	–
200	61,5	–	64,0	–	+2,5	–	–5,7	–
300	60,0	84,5	66,0	80,0	0	+12,7	–9,1	+5,3
400	57,5	85,7	68,0	82,0	–4,2	+14,3	–15,5	+4,4
500	–	82,5	–	83,5	–	+10,0	–	–1,2
600	–	82,5	–	84,5	–	+10,0	–	–2,4
750	–	82,0	–	85,5	–	+9,3	–	–4,1
1000	–	79,5	–	87,0	–	+6,4	–	–8,6

Образцы (100 x 100 x 100 мм) бетона из сухой смеси состав (Ц = 360 кг; П = 810 кг; Щ = 1250 кг) по-разному уплотняли: при разовом виброуплотнении сухой смеси в процессе изготовления и с повторным виброуплотнением (все – под пригрузом в 0,025 МПа) после водонасыщения сухой смеси (В/Ц ~ 0,27–0,28). Водопоглощение по массе бетона образцов 1-й серии было равным около 3 %, а повторно вибрированных около 1,4...1,5 %. Как это следует из табл. 1.2, прочность бетона однократного уплотнения после кратковременного роста (до F200) закономерно снижается в процессе испытаний и к 400 циклам попеременного замораживания и оттаивания прочность бетона основных образцов снизилась на 4,2 % относительно прочности контрольных образцов и на 15,5 %, в сравнении с образцами нормально-влажностного твердения одинакового возраста. Внешний вид образцов изменялся в соответствии с изменением прочности бетона: к 200 циклам появилось шелушение по-

верхности и местные незначительные отколы ребер кубов, которые округлились к 300 циклам; к 400 циклам интенсифицировался процесс разрушения ребер и наблюдалось шелушение по поверхности граней образцов.

Изменение прочности особо плотного бетона с повторным вибрационным уплотнением неоднозначно зависит от продолжительности попеременного замораживания и оттаивания (рис. 1.5.). Так, к 300...400 циклам испытаний прочность бетона основных образцов превысила прочность контрольных образцов (т. е. исходную) на 12...15 %, а твердевших при нормально-влажностных условиях и испытанных в водонасыщенном состоянии в одинаковом возрасте - на 4...5 %. В дальнейшем (после 500 циклов) прочность бетона закономерно снижалась и к 1000 циклам попеременного замораживания и оттаивания составила 79,5 МПа, что на 6 % выше прочности контрольных образцов, но ниже на 8...9 % прочности образцов бетона одинакового возраста, хранившихся в нормально-влажностных условиях.

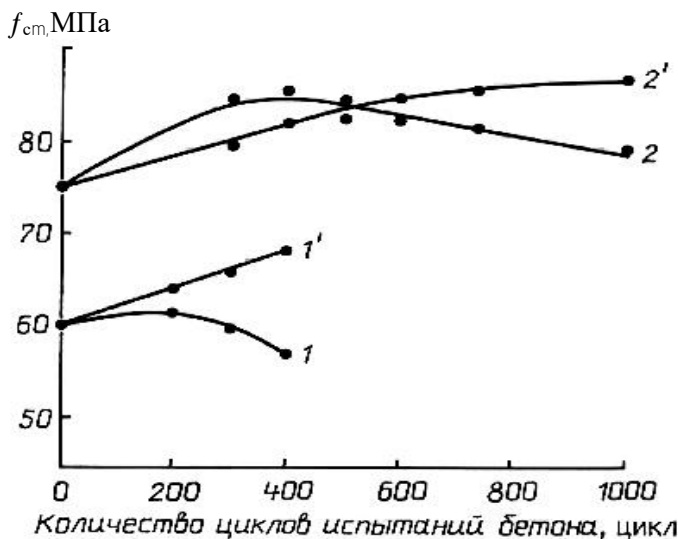


Рис. 1.5. Изменение прочности бетона при испытании на морозостойкость [23]:  
 1 – одноэтапное уплотнение, 2 – с повторным вибрированием 60 с  
 (1' и 2' – образцы бетона нормально-влажностного твердения)

Некоторое увеличение прочности бетона при попеременном замораживании и оттаивании на начальной стадии этого процесса может быть объяснено следующим. Как известно из ранее изложенного [15–17; 21–22], при замораживании воды, испытывающей высокое давление, образуются модификации льда плотностью больше  $1 \text{ г/см}^3$ , в результате чего фазовый переход жидкости в лед может происходить без увеличения объема, и, следовательно, без сопровождающего его расклинивающего давления на поверхность, ограничивающую объем жидкости.

В бетоне же с повторным вибрационным уплотнением, характеризующемся низким начальным водосодержанием ( $V/C \sim 0,27 \dots 0,28$ ) и высокой плотностью укладки зерен твердой фазы (средняя плотность мелкозернистого бетона  $\geq 2300 \text{ кг/м}^3$ , а с крупным заполнителем  $\geq 2500 \text{ кг/м}^3$ , к началу испытаний на морозостойкость практически вся вода находится в химически или физически связанном состоянии. Поэтому деструктивные явления от замерзания жидкости в теле бетона сводятся к минимуму. На этом фоне развивается процесс, составляющий основу повышения прочности бетона и заключающийся в следующем. В работах [18–20] показано, что даже при кратковременном (разовом) замораживании бетона в последней стадии коагуляционного структурообразования, когда вся вода переходит в «физически» связанное состояние, прочность бетона может возрасти. В рассматриваемом случае, когда замораживается-оттаивает «зрелый» особо плотный бетон (проектного возраста) рост прочности, на наш взгляд, связан с тем, что при замерзании остаточных объемов жидкости, насыщенной продуктами гидролиза цемента и находящейся в микрообъемах пор новообразований (в частности, контракционных), вначале замерзает вода – растворитель, тем самым повышая концентрацию «раствора» и одновременно снижая температуру его замерзания. А поскольку жидкость замерзает в объемах пор «межзернового» пространства соседствующих реакционных каемок, сформировавшихся к этому моменту вокруг остаточных «ядер» цемента, имеет место отжатие гидратированных ионов клинкерных минералов к ограничивающей эти поры поверхности. При последующем оттаивании цементного «геля», учитывая необратимость реакции гидратации, концентрация ионных образований у поверхности реакционной каемки повышает-

ся, что обеспечивает необходимые условия для формирования дополнительного количества кристаллогидратных новообразований и способствует усилению связей и расширению площади взаимных контактов в зоне «срастания» соседствующих реакционных каемок цементного камня, уменьшению размеров контракционных пор. В рассматриваемом случае, при попеременном замораживании-оттаивании затвердевшего бетона и, соответственно, относительно небольших объемах реагирующего к этому времени с водой вяжущего означенный процесс, повторяясь до некоторого количества циклов попеременного замораживания и оттаивания в водной среде, способствует повышению плотности кристаллогидратной структуры и снижению пористости цементного камня, благодаря чему растет прочность бетона.

Вместе с тем при увеличении количества циклов попеременного замораживания – оттаивания бетона, постоянно «донасыщаемого» водой, концентрация продуктов гидролиза цемента в «поровой» жидкости постепенно снижается. При этом все большее количество воды оказывается в свободном состоянии, что проявляется в наращивании знакопеременных деформаций в объеме испытываемых образцов бетона, в росте гидродинамического воздействия движущейся под влиянием температурных полей жидкости и других явлений, приводящих к росту пористости бетона (см. п. 1.1).

Таким образом, при переменном замораживании и оттаивании затвердевшего водонасыщенного бетона наличествуют два процесса: деструкция бетона под влиянием ряда факторов, в том числе при переходе свободной воды из жидкого состояния в лед, и уплотнение (упрочнение) структуры при замерзании воды, насыщенной продуктами гидролиза цемента. Преобладание того или иного процесса и скорости его развития зависит от структурной плотности бетона и может изменяться во времени. В бетоне одноразового уплотнения, из-за наличия сообщающейся направленной пористости образующейся вследствие фильтрации воды при водонасыщении сухой смеси под давлением, процесс деструкции преобладает к 200...300 циклам испытаний. В бетоне же с повторным виброуплотнением (после водонасыщения ранее отформованной сухой бетонной смеси и ликвидации фильтрационных каналов от движения насыщающей жидкости) процесс упрочнения наблюдался до 400...500 циклов испытаний, после чего прочность бетона стала снижаться. Харак-



терно, что и после 1000 циклов замораживания-оттаивания отсутствовало шелушение поверхности образцов; нарушение структуры бетона проявилось в виде незначительного округления ребер кубических образцов.

Аналогичную закономерность изменения прочности бетона наблюдали [23] при ускоренных испытаниях образцов-кубов с ребром 70 мм, изготовленных из бетона исследуемого состава с повторным вибрированием в течение 60 с, но при замораживании-оттаивании в солевой среде – 5 % растворе NaCl (температура замораживания: около 50–55 °С).

Прочность бетона основных образцов превышала ее значения для контрольных образцов (испытанных после насыщения в течение 96 ч раствором NaCl) до 105 циклов замораживания-оттаивания, что по стандарту соответствует 500...600 циклам для испытаний при температуре -18 °С. Снижение прочности бетона к 155 циклам составило 0,5...1 % и к 205 циклам достигло 3...4 %, при уменьшении массы образцов бетона на 1,5...2 %, что соответствует морозостойкости бетона дорожных и аэродромных покрытий в 1000 циклов по базовому методу и марке по морозостойкости F1000.

Приведенные данные характеризуют взаимосвязь морозостойкости и долговечности бетона с состоянием его структуры (по существу – ее непроницаемостью) и высокой прочностью, которая обеспечивает возможность восприятия бетоном напряжений, возникающих от различий упруго-деформативных свойств его составляющих, расширения воды при замерзании, воздействия ее в процессе миграции и др. деструктивных явлений.

Необходимо отметить, что при безусловной обоснованности и значимости для понимания явления морозной деструкции бетона результатов исследований, приведенных в настоящем разделе, в них отсутствуют данные об *одновременном влиянии* на структуру бетона, ее проницаемость и на развитие процесса морозной деструкции бетона механических нагрузок. В частности, в том случае, если он в процессе испытаний (либо эксплуатации) подвергается механическим нагрузкам, как это имеет место при эксплуатации тротуарных и иных покрытий, дорожного полотна и др. подобных конструкций. Можно предположить, что «наложение» механических и физико-химических воздействий способно существенно усилить влияние

деструктивных факторов, снижая «противоморозную» устойчивость и долговечность бетона.

*Структура цементного камня и бетона*, как это следует из приведенных в предыдущих разделах данных, является важнейшим фактором, предопределяющим морозостойкость бетона. Ее качественные характеристики (величина пористости и вид пор) формируются под влиянием технологических факторов: характеристик материалов, водосодержания бетона, качества уплотнения, условий твердения и др. Тенденции влияния технологических факторов на структуру бетона в основном изучены и представлены в работах многочисленных исследователей, цитировавшихся ранее, а также в данных, приведенных далее в настоящем разделе [1, 2, 6–8, 12, 20, 21, 24, 26, 28, 33–34, 44, 49–59].

*Водоцементное отношение* оказывает наибольшее влияние на строение порового пространства цементного камня, раствора и бетона. Чем больше начальное водоцементное отношение сверх рационального значения, тем толще водные прослойки, окружающие цементные зерна и составляющие основу последующего формирования системы взаимосвязанных капиллярных пор, беспорядочно распределенных по всему объему цементного камня. С течением времени в условиях продолжающейся гидратации цемента общая и капиллярная пористость цементного камня уменьшается, так как продукты гидратации цемента занимают часть пространства, занятого вначале водой затвердения.

Таблица 1.3

Характеристика цементов [57]

Цемент	Минералогический состав, %					Физико-механические характеристики			
	гипс	C3S	C2S	C3A	C4AF	ρ <sub>c</sub> , г/см <sup>3</sup>	НГ, %	S, см <sup>2</sup> /г	R <sub>c</sub> , МПа
Белгородский	5	64	15	4	14	3,15	24,5	2560	47,5
Ново-Здолбуновский	2,7	62	17	7	13	3,15	28,5	3400	57,5

Для примера на рис. 1.6–1.10 приведены экспериментальные данные, полученные М. И. Бруссером [57], характеризующие влияние начального водоцементного отношения на открытую пористость, определенную по водопоглощению цементного камня и це-

ментно-песчаного раствора на цементах Белгородского и Ново-Здолбуновского заводов (табл. 1.3) в возрасте 28 сут, а также, средний размер пор и дифференциальные кривые распределения их по радиусам в зависимости от характеристик использованных цементов, срока и условий твердения цементного камня и цементно-песчаного раствора. Из этих данных видно, что объем открытых пор как в цементном камне, так и в цементно-песчаном растворе растет по мере увеличения водоцементного отношения.

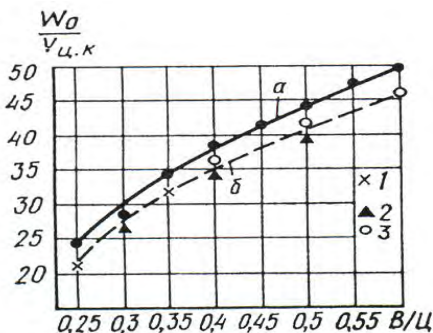


Рис. 1.6. Влияние водоцементного отношения на объем открытых пор цементного камня и цементно-песчаного раствора от минералогического состава цемента [57]: а – на белгородском цементе, б – на ново-здолбуновском цементе [57]

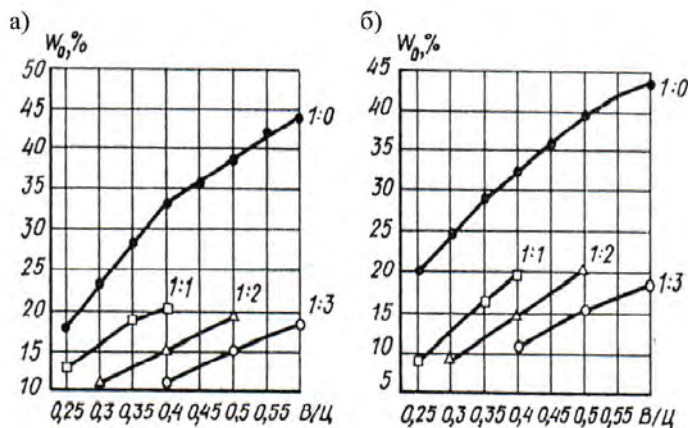


Рис. 1.7. Относительный объем открытых пор [57]: а – в цементном камне, б – в цементно-песчаном растворе различного состава (Ц/П) 1–1; 1; 2–1; 2; 3–1; 3

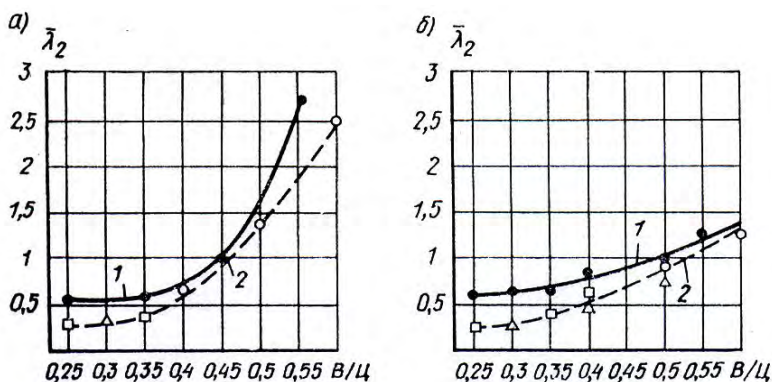


Рис. 1.8. Влияние водоцементного отношения на показатель среднего размера пор, обозначения те же, что и на рис. 1.7. [57]: 1 – цементный камень, 2 – цементно-песчаный раствор; на белгородском (а) и ново-здолбуновском (б) цементе

При этом объем открытых пор в цементном камне, растворах и бетонах при постоянном значении водоцементного отношения прямо пропорционален расходу цемента в этих материалах (при условии, что все пустоты между зернами заполнителей заполнены цементным камнем), а показатель среднего размера пор « $\lambda$ » полученный для тех же цементов и тех же условий, возрастает с ростом водоцементного отношения.

В табл. 1.4 [51] приведены экспериментальные данные о влиянии начального водоцементного отношения на пористость цементного камня и раствора, определенных методом ртутной порометрии.

Таблица 1.4

Влияние начального В/Ц на интегральную пористость цементного камня водного твердения [51]

В/Ц	Интегральная пористость		В/Ц	Интегральная пористость	
	см <sup>3</sup> /г	% по объему		см <sup>3</sup> /г	% по объему
0,25	0,105	19,5	0,35	0,145	24,8
0,3	0,1	18,9	0,5	0,219	33

Таким образом, можно отметить, что приведенные в качестве примеров, экспериментальные данные, подтверждают тенденцию

увеличения общей и открытой пористости и размеров пор с увеличением водоцементного отношения сверх рациональных значений.

На рис. 1.9 приведены экспериментальные [57] кривые распределения объема пор в единице объема цементного камня по радиусам, из которых следует, что даже при небольшом изменении начального В/Ц существенно изменяется положение пика в области капиллярных пор с радиусами до  $1000 \text{ \AA}$ ; при росте В/Ц пик смещается в сторону увеличения радиусов капилляров.

Подобное же распределение объема пор в единице объема цементного камня по радиусам сохраняется и через 360 сут твердения образцов в воде (рис. 1.10).

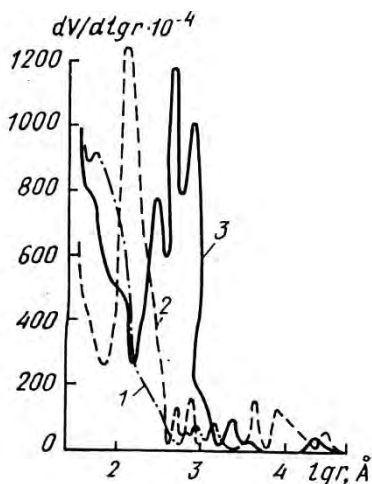


Рис. 1.9. Влияние водоцементного отношения на дифференциальные кривые распределения пор по радиусам для цементного камня, твердевшего 28 сут в воде ( $S=3000 \text{ см}^2/\text{г}$ ) [57]: 1 - В/Ц = 0,26; 2 - В/Ц = 0,3

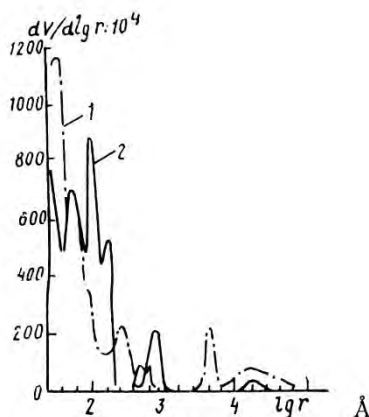


Рис. 1.10. Влияние водоцементного отношения на дифференциальные кривые распределения пор по радиусам для цементного камня, твердевшего 360 сут в воде [57]: 1 - В/Ц = 0,26; 2 - В/Ц = 0,3

Вместе с тем применительно к вибропрессованию, как к способу производства элементов благоустройства, следует отметить опасность снижения водоцементного отношения ниже оптимальных значений, зависящих от интенсивности уплотнения бетона. В ре-

зультате возможно его недоуплотнение, сопровождающееся ростом открытой капиллярной пористости материала.

*Возраст цементного камня и бетона.* С течением времени в условиях продолжающейся гидратации цемента уменьшается общая и интегральная пористость цементного камня и увеличивается объем пор в единице его объеме, представленный порами цементного геля (радиусом менее  $50 \text{ \AA}$ ).

Общая, капиллярная, гелевая и контракционная пористость цементного камня изменяются во времени (в условиях продолжающейся гидратации цемента) согласно тенденции, выраженной графиками на рис. 1.11 [1].

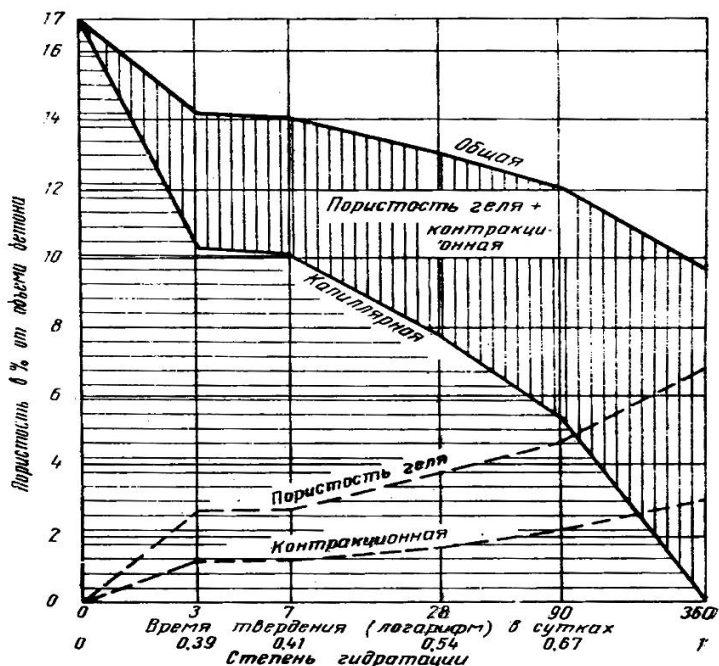


Рис. 1.11. Изменение характера пористости бетона в процессе твердения [1]

Из экспериментальных данных табл. 1.5, полученных методом ртутной порометрии П.П. Ступаченко [51], следует, что с увеличением возраста цементного камня уменьшается его интегральная по-

ристость, при этом возрастает капиллярная пористость, представленная порами с  $r < 300 \text{ \AA}$ , и уменьшается капиллярная пористость, представленная капиллярами большего радиуса ( $r > 300 \text{ \AA}$ ).

Изменения с течением времени в строении порового пространства цементного камня вызывается преимущественно продолжающейся гидратацией цемента, а поэтому они более существенны для цементов с меньшей удельной поверхностью, процесс гидратации которых идет медленнее, чем тонкомолотых. Согласно тем же исследованиям с увеличением возраста цементного камня с 28 до 360 сут капиллярная пористость цементного камня на цементе с удельной поверхностью  $S = 3000 \text{ см}^2/\text{г}$ , представленная капиллярами с радиусами от 300 до 1000  $\text{ \AA}$ , уменьшились в 3 раза, в то время как на цементе более тонкого помола ( $S = 4500 \text{ см}^2/\text{г}$ ) практически не изменилась. Подобное влияние времени твердения цемента на интегральную и дифференциальную пористости цементного камня отмечалось и в ряде других работ.

Таблица 1.5

Влияние продолжительности твердения цементного камня на строение его порового пространства [51]

Характеристика образцов	Возраст образцов (продолжительность твердения в воде)	Интегральная пористость		Объем микропор и переходных пор с радиусами от 50 до 1000 $\text{ \AA}$ , $\text{см}^3/\text{г}$
		$\text{см}^3/\text{г}$	%	
Цементный камень	28 сут	0,105	19,5	0,095
В/Ц = 0,25	6 мес.	0,068	13,6	0,033
Раствор состава 1 : 3	28 сут	0,07	14,8	0,038
В/Ц = 0,5	6 мес.	0,051	10,8	0,02

На рис. 1.12 и 1.13 представлены экспериментальные данные М.И. Бруссера [57] о влиянии возраста на объем открытых пор и показатель среднего размера пор пропаренных образцов цементного камня на цементе Белгородского завода, характеристика которого была приведена в табл. 1.3.

Аналогичные зависимости получены для цементного камня на ново-здолбуновском цементе и цементно-песчаных растворах на обоих цементах. Как видно из этих данных, с увеличением времени твердения (после пропаривания образцы твердели в камере нормально - влажностного твердения) снижается как общий объем открытых пор, так и их средний размер.

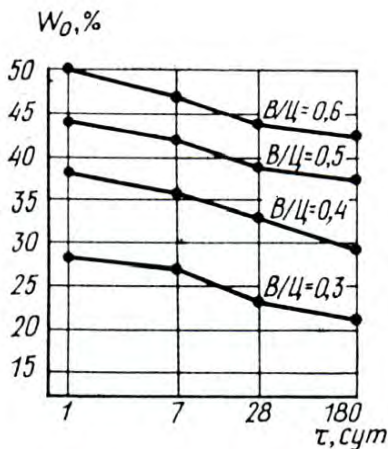


Рис. 1.12. Зависимость объема открытых пор от времени твердения цементного камня [57]

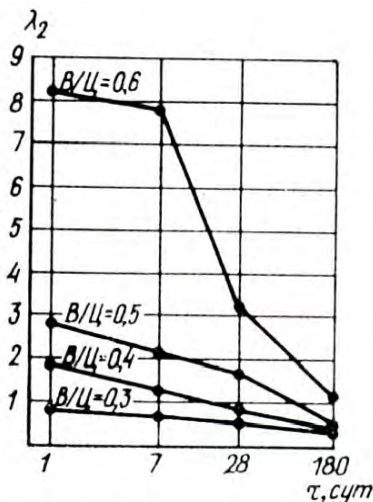


Рис. 1.13. Зависимость показателя среднего размера пор от времени твердения цементного камня [57]

На рис.1.14 показана взаимосвязь морозостойкости бетона с тонкостью помола цемента от 2300 – 2900  $\text{см}^2/\text{г}$  (0,23–0,29  $\text{м}^2/\text{г}$ ) до 5100  $\text{см}^2/\text{г}$  (0,51  $\text{м}^2/\text{г}$ ) и сделан вывод о снижении морозостойкости бетона с повышением удельной поверхности вяжущего, особенно при содержании в нем гипса, превышающем оптимальное значение. Этот вывод относится ко всем видам цемента по содержанию алюмината ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ), т. е. к низкоалюминатным ( $\text{C}_3\text{A} \leq 6\%$  от массы клинкера, что характерно для современных цементах, выпускаемых заводами Беларуси), среднеалюминатным (6–8 %) и высокоалюминатным (более 8 %). Указанный отрицательный эффект связывается с ростом усадочных явлений цементного камня на цементах с тонкостью помола более 3000 – 3500,  $\text{см}^2/\text{г}$  (0,3 – 0,35  $\text{м}^2/\text{г}$ ).



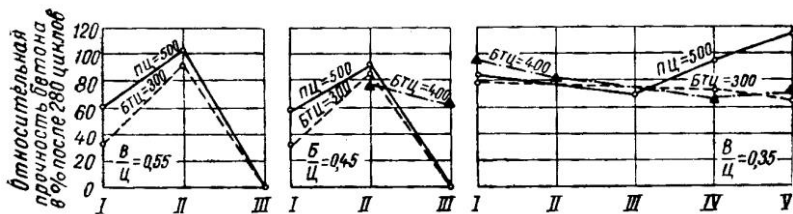


Рис. 1.14. Диаграмма морозостойкости бетонов из БТЦ-300, БТЦ-400 и портландцемента марки 500 [1]: I – нормальное твердение; II – то же при добавке 1,5 % CaCO<sub>2</sub>; III – пропаривание 2+6+2 ч при 80 °С; IV – прогрев 10 ч при 40 °С; V – пропаривание 2+2+1 ч при 80 °С

*Тонкость помола цемента* – существенно влияющий на морозостойкость бетона фактор, связанный с влиянием дисперсности вяжущего как на процессы его взаимодействия с водой, так и на последующее формирование структуры (порового пространства) цементного камня и бетона.

Среди многочисленных исследований, относящихся к проблеме формирования структуры цементного камня на цементах различной степени дисперсности [1, 7, 26, 28, 51, 57 и др.] и взаимосвязи этого фактора с морозостойкостью бетона выделим прямые экспериментальные данные, приведенные в исследованиях Г. И. Горчакова с соавторами в работе [1].

*Условия твердения* оказывают непосредственное влияние на формирование и строение порового пространства цементного камня (бетона), а в результате на его проницаемость и морозостойкость. Основной причиной образования в его структуре пор (кроме указанных в предыдущих разделах) в процессе твердения являются влажностные характеристики окружающей среды. При этом дефекты структуры в виде капиллярных пор, разных по размерам сечений и длины, формируются как в объеме цементного камня, так и в зоне контакта его с зернами заполнителя, что приводит к росту общей пористости [1, 8, 23, 26, 51, 56, 57, 60–74 и др.], росту проницаемости бетона и снижению его морозостойкости.

Еще А.В. Лыков [10,40] показал, что вода, находящаяся в порах и капиллярах с радиусами более 1000 Å (0,1 мкм), будет испаряться из бетона до установления равновесной влажности, и в случае, если

воздух насыщен водяными парами, а поэтому поры и макрокапилляры в бетоне могут обезвоживаться даже в камерах нормального твердения при высокой относительной влажности воздуха. Естественно, что этот процесс усугубляется при твердении бетона в воздушно-сухих условиях при меньшей влажности.

В твердеющем цементном камне вследствие развития контракции создается некоторое разрежение (вакуум) [75, 76], так как абсолютный объем новообразований меньше суммарного абсолютного объема клинкерных минералов и воды, вступивших в реакцию. При твердении на воздухе при любой относительной его влажности этот процесс также будет сопровождаться обезвоживанием макропор и макрокапилляров, так как мелкие поры заполняются водой из более крупных макрокапилляров (смачивающая жидкость перемещается от низшего капиллярного потенциала к высшему).

При твердении бетона в воде вследствие образования вакуума происходит непрерывный подсос влаги, и капиллярное пространство, свободное от продуктов гидратации цемента, заполняется жидкой фазой. В этих условиях с развитием процесса гидратации цемента капиллярное пространство наиболее плотно заполняется гидратными новообразованиями и в цементном камне будут преимущественно присутствовать капилляры с радиусами менее 1000 Å (0,1 мкм).

Таблица 1.6

Влияние условий твердения цемента на интегральную и дифференциальную пористость цементно-песчаного раствора [55]

Твердение	Общая пористость, %	Содержание пор, % общей пористости, с радиусом			
		До 50 Å	От 50 до 1000 Å	От 1000 до 10000 Å	Свыше 10000 Å
Воздушно-влажное (φ ~ 85 %)	17,4	15	20,6	25,7	38,4
В воде	16,6	17,8	40,2	39,5	11,5

Изложенное подтверждается многочисленными экспериментальными данными. В качестве примера в табл. 1.6 и 1.7 приведены данные Ф. М. Иванова, Т.Г. Красовской, В.Л. Солнцевой [55, 56] о строении порового пространства образцов из цементно-песчаного

раствора состава 1:2, приготовленных из пластичной растворной смеси при В/Ц, равном 0,3, твердевших в различных условиях. Очевидно, что при твердении в воде уменьшается общая (интегральная) пористость вследствие повышения степени гидратации цемента; при этом возрастает относительная пористость, представленная капиллярами с радиусами менее 1000 Å (0,1 мкм), при одновременном существенном уменьшении доли макрокапилляров с радиусами более 100 000 Å (10 мкм).

Таблица 1.7

Влияние условий твердения на распределение пор по радиусам [55]

Условия твердения	Суммарная пористость, см <sup>3</sup> /г	Распределение объема пор по радиусам					
		До 50 Å		От 50 до 1000 Å		Более 1000 Å	
		см <sup>3</sup> /г	%	см <sup>3</sup> /г	%	см <sup>3</sup> /г	%
Воздушно-влажное (φ ~85%)	0,055	0,001	2	0,021	38	0,033	60
Водное	0,057	0,01	18	0,045	79	0,002	3

Большое влияние на строение порового пространства цементного камня (бетона) оказывают режимы тепловой обработки, в частности, время и условия предварительной выдержки вид и степень влажности теплоносителя (водяной пар, топочные газы, нагретый воздух, использование нагревателей и т.п.), скорость подъема температуры, продолжительность и температура изотермического прогрева, скорость охлаждения, условия хранения пропаренных изделий после выгрузки из устройств для прогрева или распалубка и т. д.

Все перечисленные параметры, характеризующие режим тепловой обработки бетона в итоге оказывают существенное влияние на состояние его как общей так и дифференциальной пористости. Практически все исследователи отмечают, что в сравнении с образцами нормально-влажностного (и тем более водного – твердения) бетон после прогревов (особенно сухих его вариантов) характеризуется ростом пористости за счет повышения доли макропор [1, 24, 26, 31, 35, 51, 56 и др.].

В работе [26] приведены данные по сопоставлению строения порового пространства цементного камня и цементно-песчаного раствора после пропаривания и после 28 сут водного твердения, из которых следует, что пропаривание приводит к увеличению интегральной пористости цементного камня и раствора. В частности, интегральная пористость образцов из цементного камня на цементе с удельной поверхностью  $3000 \text{ см}^2/\text{г}$  после пропаривания составляет  $0,115 \text{ см}^3/\text{г}$  и соответственно после 28 сут водного твердения  $0,0607 \text{ см}^3/\text{г}$ . Пористость раствора на том же цементе после пропаривания равна  $0,092 \text{ см}^3/\text{г}$  и соответственно после 28-суточного твердения в воде  $0,066 \text{ см}^3/\text{г}$ .

Сравнение дифференциальной пористости цементного камня после 28 сут водного твердения и после пропаривания указывает на значительное уменьшение в пропаренных образцах объема пор радиусом от 300 до  $1000 \text{ \AA}$ . Так, у цементного камня 28-суточного водного твердения он составил  $74,1 \%$ , а у пропаренного объем тех же пор равен  $39,8 \%$ , за счет увеличения количества более крупных пор.

Для цементно-песчаного раствора сохраняется примерно та же зависимость, что и для цементного камня, причем абсолютный объем крупных пор всегда превышает объем аналогичных пор в образцах из раствора после 28-суточного водного твердения. Если образцы цементного камня или раствора после пропаривания помещали в воду, то вследствие продолжающейся гидратации цемента изменялось и строение их порового пространства. В частности уменьшалась интегральная пористость и средний радиус капилляров, однако при сравнении с бетонами нормального твердения в них же сохранялись особенности строения порового пространства пропаренных образцов - большая интегральная пористость и объем пор, представленных макрокапиллярами.

Кроме рассмотренных (и наиболее существенно влияющих на структуру цементного камня и бетона в целом) технологических факторов, для вибропрессованого бетона характерна непосредственная взаимосвязь и взаимозависимость качества (пористости) структуры бетона от степени его уплотнения при формовании. Использование жестких бетонных смесей различной формуемости (показателя жесткости) должно сочетаться с интенсивностью вибровоздействия и давления пригрузов (прессования), обеспечивающих для конкретных условий (по составу (рецептуре) бетона и тех-

ническим возможностям применяемого оборудования) проявления эффекта тиксотропии (временного разжижения) цементного теста во всем объеме уплотняемого бетона. Только при соблюдении этого условия создаются необходимые предпосылки для формирования в объеме бетона изделий слитной структуры цементного теста, трансформирующейся при последующем твердении в плотную, труднопроницаемую структуру цементного камня, что обеспечивает устойчивость бетона к морозной и солевой деструкции при эксплуатации изделий (тротуарных и иных плит, бортового камня и пр.).

### **1.3. Принципиальные основы методов прогнозирования (оценки) морозостойкости бетона**

Анализ материала, изложенного в предыдущих разделах, показывает, что механизм нарушения структуры бетона, подвергаемого попеременному замораживанию и оттаиванию в насыщенном водой состоянии, чрезвычайно сложен.

Стандартные базовые и ускоренный методы определения морозостойкости (ГОСТ 10060.0...3–95) бетона в целом отражают взаимосвязь его долговечности с параметром морозостойкости. Но это только общая взаимосвязанность означенных характеристик бетона, ее тенденция. В процессе эксплуатации элементов мощения и благоустройства они подвергаются интенсивному механическому воздействию: истирающим, сжимающим, изгибающим, ударным нагрузкам различной интенсивности и значений, которые многократно повторяются во времени. Этот аспект деструктивного воздействия на бетон стандартные методы не учитывают, как по причине непредсказуемости вероятных условий эксплуатации строительных изделий и конструкций, изготовленных из проверяемого бетона, так и из-за неопределенности критериев оценки их влияния, особенно при совместном влиянии факторов, оказывающих комплексное физико-механическое и химико-физическое воздействие на бетон.

Отражением сложности учета многофакторного влияния на долговечность бетона особенностей строения его структуры (то есть, технологических факторов: свойств материалов, состава, водосодержания, интенсивности формования, условий твердения и др.) в сочетании с агрессивностью эксплуатационной среды, явля-

ется отсутствие общепризнанного достоверного варианта метода теоретической оценки (расчета, прогнозирования) морозостойкости (а на этой основе - долговечности) бетона. И это несмотря на то, что известны многочисленные предложения в виде методик, вариантов испытаний, оценки по косвенным признакам, а также в форме математических зависимостей для экспериментального установления или теоретического расчета долговечности бетона по его морозостойкости в циклах замораживания-оттаивания [1, 77–84], подробно рассмотренные в работе А.Е. Шейкина – Л.М. Добшиц [28]. Проведенный ими анализ показывает, что, с одной стороны, исследователи предлагают разнообразные решения задачи ускорения оценки морозостойкости бетона, так как стандартные испытания длятся месяцы (а то и годы). А с другой, все они так или иначе связаны и основываются на особенностях строения порового пространства бетона, его проницаемости (через факторы – объемы капиллярной (сообщающейся) пористости, условно-замкнутых пор, коэффициенты льдистости, критерии морозостойкости и др.). Наиболее широко известны предложения научной школы Г.И. Горчакова [1], который провел исследования связи структурных характеристик бетона с его морозостойкостью и в результате получил зависимости, которые могут быть использованы для прогнозирования морозостойкости бетона.

Вначале определяется капиллярная пористость бетона по формуле

$$P_{кб} = \frac{B - \alpha \cdot Ц}{1000} \cdot 100, \%,$$

где  $B$  – расход воды, кг;

$Ц$  – расход цемента, кг;

$\alpha$  – степень гидратации цемента, доли ед.

Затем рассчитывается морозостойкость бетона как степенная функция его структурных характеристик, интегрально определяемых капиллярной пористостью, в которую вводится коэффициент  $K_з$ , учитывающий влияние загрязненности заполнителей:

$$F_{пз} = K_з \cdot (12 - P_{кб})^{2,7}, \text{ циклы,}$$

где  $K_3$  – коэффициент влияния загрязненности заполнителей на морозостойкость бетона, численно равный 1; 0,9; 0,8 и 0,7 при содержании примесей в заполнителе 0, 2, 4 и 6 % соответственно.

По результатам работ школы Горчакова Г.И. в ГОСТ 10060.3–95 зафиксирована методика дилатометрического метода ускоренного определения морозостойкости при одноразовом замораживании образцов бетона и фиксации их деформаций по ходу процесса. Следует отметить, что этот метод основан на огромном эмпирическом материале, накапливаемом с 30-х годов прошлого века, отражает закономерности деформационных изменений образца бетона в сопоставлении со стальным эталоном и методически не вызывает сомнений, т.к. испытуемый образец не извлекается (как в методе "РУП «Институт БелНИИС»", см. далее) из прибора, в котором герметизируется на период испытаний. В целом, это свидетельствует о перспективности дилатометрического метода, но он ограничен в применении и не распространяется на бетоны дорожных и аэродромных покрытий, согласно регламентируемой им области применения.

Для ускоренной оценки морозостойкости бетона известны более сложные по математическим зависимостям и методикам предложения, например, составивший основу ГОСТ 10060.4–95 структурно-механический метод ускоренного определения морозостойкости бетона. В основе метода – испытание образцов бетона при однократном замораживании и определении соотношения его прочности при этом, а также в насыщенном водой состоянии. Параллельно определяют ряд структурных характеристик цемента, заполнителей и бетона. Все это интерпретируется затем математическими зависимостями и серией данных, априори приведенных в документе.

Проверка этого метода, выполненная в НИИЛ БиСМ БНТУ, в сравнительных испытаниях с ГОСТ 10060.0...2–95 показала серьезный уровень расхождения данных (в некоторых случаях в два и более раза).

В настоящее время в Беларуси проходит апробацию метод, сочетающий аналитический расчет (включает более 20 формул) и измерение «обратных» деформаций предварительно замороженного образца бетона в период его оттаивания, разработанный под руководством Н.П. Блещика [85, 86]. Проблему оценки деформаций цементного камня и бетона (включая «обратные» деформации при

оттаивании) мы рассмотрели в обзоре исследований на примере работ Горчакова Г.И. и других авторов (см. п. 1.2), выполненных в 50-60-х годах XX века.

Особенностью предложения Н.П. Блещика является оценка деформаций бетонных образцов в процессе их оттаивания в воде после однократного замораживания (до  $-20$  °С). При этом (путем использования системы эмпирико-аналитических формул) предлагаемая методика оценки морозостойкости бетона рассчитана на учет основных влияющих на нее факторов: минералогию и тонкость помола цемента, водосодержания бетона, условий твердения и т. д.

Научный и практический интерес представляют предложения В.В. Бабицкого [87, 88] и С.Н. Ковшара [89, 90] по разработкам, выполненным ими в БНТУ на кафедре технологии бетона и строительных материалов и в одноименной научно-исследовательской лаборатории. Базируясь на собственных экспериментальных данных, а также результатах исследований Г.И. Горчакова, А.Е. Шейкина, Ю.М. Бутта и других исследователей их научных школ, В.В. Бабицкий предложил, аналитические зависимости для расчета морозостойкости тяжелого бетона как на чистых заполнителях, без химических добавок, так и для случаев их применения и использования загрязненных заполнителей. Эти дополнительные факторы учитываются на базе закономерностей взаимосвязи показателя морозостойкости бетона с капиллярной пористостью цементного камня (включая объем пор его контактной зоны с зернами заполнителей) и прогнозируемой (с учетом условий твердения) степенью гидратации цемента.

Методика ускоренной оценки морозостойкости бетона, предложенная и обоснованная в работах С.Н. Ковшара [89,90], базируется на схожести механизма разрушения бетона при циклическом замораживании-оттаивании с таковым при насыщении-высушивании с использованием солевых растворов, в частности – сульфата натрия. Автором установлена корреляционная связь между этими вариантами воздействия на бетон и предложена методика экспресс-контроля его морозостойкости по солестойкости, определяемой при многократном сокращении времени испытаний, т.к. деструкция бетона в сульфатной среде развивается прогрессирующим темпом.

Анализ результатов испытаний, приведенных в настоящей главе, и важнейших исследований, накопленных с 30-х годов XX века по



настоящее время, позволяет считать сложившимися основополагающие теоретические представления о причинах и механизме морозной деструкции бетона. Разнообразные экспериментальные, теоретические и комплексные методики позволяют (с разной степенью соответствия фактической) оценить (спрогнозировать) морозостойкость бетона уже на стадии проектирования его состава, а на этой основе – ожидаемую долговечность. Существуют методы экспресс-контроля показателя морозостойкости бетона как при циклических (низкая температура замораживания: «-50, °С» и более; агрессивная солевая среда), так и при однократном замораживании (оттаивании). Ценность и значимость накопленного исследовательского и практического опыта по проблеме оценки и прогнозирования морозостойкости бетона безусловна. Однако несомненна актуальность дальнейших исследований и новых предложений по оперативной (ускоренной) оценке морозостойкости вибропрессованного бетона, так как в анализируемой литературе рассматривается бетон как таковой и не отражена специфика его уплотнения вибропрессованием с использованием жестких бетонных смесей и ее влияние на формирование структуры бетона и его морозостойкость. Вместе с тем в стремлении к снижению начального водосодержания вибропрессованного бетона, как фактора роста его морозостойкости, зачастую не учитывается существование области рационального значения водоцементного отношения в соотношении с интенсивностью вибрирования и давления прессования. Снижение (В/Ц) без соответствующего роста интенсивности формирования приводит к недоуплотнению бетона из-за недостаточного проявления эффекта тиксотропии цементного теста в его объеме. В результате формируется пористая структура цементного камня, снижаются средняя плотность, прочность и морозостойкость бетона, особенно – при дополнительном воздействии механических нагрузок в процессе эксплуатации изделий.

Вместе с тем анализ результатов исследований, выполненных с 30-х годов XX века по проблематике взаимосвязи структуры тяжелого бетона, состояния (вида, количества, размеров) пор цементного камня и проницаемости бетона, позволяют сделать следующий вывод. Непроницаемым для воды под обычным давлением является бетон, структура которого характеризуется наличием микрокапиллярной пористости с размером сечения капилляров менее 0,1 мкм ( $0,1 \times 10^{-6}$  м или  $1000 \text{ \AA}$  (ангстрем, т. е.  $1 \times 10^{-10}$  м)). Одновременно

бетон, в котором отсутствует или сведена к минимуму пористость с сечением капилляров более  $\varnothing 0,1$  мкм, характеризуется высокой прочностью, морозо- и коррозионной стойкостью, т.е. долговечностью. Поэтому важнейшей технологической задачей формирования бетона является создания условий для формирования в нем слитной (непрерывной) структуры цементного камня, характеризующейся минимальным значением пористости (включая зону контакта его с заполнителем) в целом и, особенно, капиллярной (сообщающейся) пористости с сечением капилляров более  $\varnothing 0,1$  мкм. Успешное решение этой задачи зависит от сочетания ряда факторов: качества материалов для бетона, рациональности составов бетона, режимов приготовления и уплотнения при формировании, благоприятных условий его твердения.

В материале последующих разделов отражены результаты экспериментальных исследований свойств (в том числе морозостойкости) бетона, полученного вибропрессованием, включая испытания образцов, изготовленных с применением различных материалов и различающихся степенью (качеством) уплотнения, твердевших в различных условиях, а также испытания натуральных образцов (серийно изготовленных в производственных условиях) тротуарных плит (бортовых камней) и образцов бетона, полученных разрезкой плит (бортовых камней), с целью установления закономерностей влияния условий изготовления, твердения вибропрессованного бетона и разрезки образцов на показатель морозостойкости и выработки соответствующих рекомендаций для производителей элементов благоустройства по технологии вибропрессования.

## **2. ВЛИЯНИЕ ВИБРОВОЗДЕЙСТВИЯ И СВОЙСТВ СОСТАВЛЯЮЩИХ НА КАЧЕСТВО УПЛОТНЕНИЯ И СВОЙСТВА БЕТОНА**

### **2.1. Теоретические основы влияния параметров вибрирования и характеристик смеси на процесс уплотнения и свойства бетона**

#### ***2.1.1. Теоретико-физические основы вибровоздействия***

При приготовлении в бетонную (особенно жесткую) смесь вовлекается значительное количество воздуха. Содержание воздушной фазы в различных по составу смесях изменяется в широком диапазоне и оказывает существенное влияние на физико-технические свойства как самой смеси (напряжение сдвига, вязкость, коэффициент поглощения колебаний), так и затвердевшего бетона (снижение прочности, модуля упругости, ползучесть и пр.).

Первую теоретическую попытку обоснования механизма уплотнения бетона вибрированием сделал на рубеже 20-х годов XX века Фрейсине, представляя процесс во взаимном сближении и отталкивании частиц и уменьшении «внутреннего» трения системы, удаления воздуха и перемещения вниз более тяжелых и вверх - легких частиц. Современное представление о механизме уплотнения бетона вибрированием базируется на исследованиях А.Е. Десова, М. Рейнера, П. Ребю, Ю. Сторка, О.А. Савинова, Е.В. Лавринович, В.В. Михайлова, В.Н. Шмигальского, Г.Я. Куноса, Е.П. Миклашевского, А.А. Афанасьева, Б.В. Гусева и других исследователей [91–104]. В соответствии с ними механизм воздействия вибрированием на бетонную смесь – есть комплексное явление, которое включает устранение или резкое снижение сил трения и сцепления между частицами, при этом силы тяжести способствуют, в отличие от сил трения и сцепления, процессу уплотнения; эффект вибрирования зависит от вязкости, размеров, особенностей формы и «характера» поверхности частиц; насыщенности смеси твердой фазой, величины (амплитуды) и частоты воздействия импульсов; считается, что вибрация вызывает «самоуплотнение» смесей, уменьшая сдвигающие усилия. При этом относительное взаимное движение зерен твердой фазы (особенно – крупного заполнителя) и пересечение траекторий их колебаний создают возможность обмена импульса-

ми, равнодействующая которых «нормально приложена» к поверхности и стремится «расширить» объем смеси, подверженный вибродействию.

Современные представления о механизме уплотнения дополняются волновым характером распространения механических колебаний и моделированием бетонной смеси, как акустической среды, характеризующейся высоким коэффициентом затуханий колебаний, привлечением полиструктурной теории свойств бетонов и бетонных смесей на микро- и макроуровне.

При рассмотрении процесса распространения колебаний от излучателя в бетонной смеси установлено, что энергия расходуется на преодоление сил трения и сцепления между частицами, разрушение структуры цементного теста, снижение вязкости смеси. Смесь приобретает свойства тяжелой жидкости и способность к течению и заполнению заданной формы. Переход бетонной смеси под действием вибрации в состояние тяжелой жидкости создает давление, подчиняющееся закону гидростатики. Перепад давления в слоях смеси способствует миграции воздушных включений. При этом зерна заполнителя (в первую очередь крупного) стремятся занять устойчивое положение, обеспечивающее плотную пространственную структуру, способствующую росту её начальной прочности, а затем - и прочности бетона.

В зависимости от реологических свойств бетонных смесей энергетические затраты на процесс уплотнения существенно различаются. Так, подвижные и литые смеси требуют непродолжительной, малой интенсивности воздействий, а жесткие – высокой интенсивности колебаний в сочетании с динамическим или статическим давлением.

Задача формирования плотной и однородной структуры бетонной смеси является многоплановой и комплексной и базируется на современных представлениях о процессах структурирования и деформирования «упруго-вязко-пластичных» сред с использованием положений теории упругости, пластичности, физической химии, реологии, акустики и других областей знаний. Общим для всех бетонных смесей, находящихся в статическом состоянии (особенно жестких) является наличие сухого (кулонова) внутреннего трения между твердыми компонентами, в том числе зернами заполнителя. Внешнее сухое трение отчетливо проявляется также между бетон-

ной смесью и элементами контактирующей с ней поверхности опалубок и форм. При динамическом воздействии силы внутреннего и внешнего трения существенно уменьшаются и смесь переходит в состояние течения.

По классификации О.А. Савинова и Е.В. Лавринович [95, 96] общий цикл уплотнения разделяется на три стадии. На первой – происходит переукладка составляющих, для которой характерны случайное расположение зерен и воздушных пор, неполный контакт частиц между зёрнами. Такое строение структуры с позиции физико-механических и реологических свойств можно классифицировать как систему с неустойчивой структурой и преимущественным влиянием сил сухого трения.

Под действием динамической нагрузки система (путем перестройки случайной структуры системы в устойчивую) переходит в следующую стадию, как результат «переукладки» и взаимной более компактной ориентации зерен заполнителя. Этот период характеризуется интенсивным выделением воздушной фазы и появлением «свободной» жидкой фазы в системе и, в частности, на поверхности заполнителей, особенно - крупного. Вторая стадия характеризуется сближением твердофазных составляющих. На этой стадии отчетливо проявляется упругость смеси за счет остаточного объема воздуха. Завершением этой стадии служит окончание осадки смеси. Следует помнить, что продолжительность динамического воздействия второй стадии влияет не только на формирование однородной структуры материала, но и на проявление деструктивных процессов, которые являются следствием разуплотнения, расслоения, а в ряде случаев – подсоса воздуха.

Третья стадия – компрессионное уплотнение, которое производится путем дополнительного обжатия смеси статическим давлением. Такой прием целесообразен при уплотнении жестких бетонных смесей. При этом достигается определенное приращение плотности.

Не вызывает сомнения, что явление уплотнения бетона представляет собой единый процесс, но с существенно изменяющимися свойствами подвергаемой вибровоздействию смеси, поэтому деление на стадии есть некоторая условность, способствующая пониманию существа данного явления.

Представление механизма уплотнения бетонных смесей как непрерывного динамического процесса с плавным переходом из

начального реологического состояния в конечное состояние представляется наиболее приемлемым. На рис. 2.1 [95, 96] приведены тенденции изменения вибровязкости смесей по мере их уплотнения. Здесь зоны I—II—III представляют собой стадии уплотнения, характеризующиеся реологическим состоянием среды, моделируемым моделью сухого трения, Бингама и Кельвина – Фойгта. Процесс уплотнения бетонной смеси на каждой стадии подчиняется различным закономерностям. На первой – проявляются преимущественно силы кулоновского трения. В зависимости от консистенции смеси эта стадия имеет весьма широкий временной диапазон.

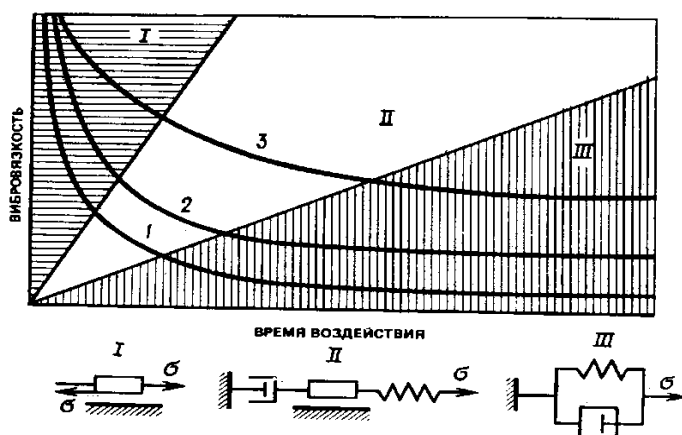


Рис. 2.1. Реологические кривые уплотняемости бетонных смесей [95, 96]:  
 I—II—III – реологические состояния смесей и их модели. 1 – режим уплотнения с вертикальными и горизонтальными колебаниями; 2 – режим уплотнения с преимущественным влиянием горизонтальной составляющей колебания; 3 – уплотнение только вертикальными колебаниями

На второй стадии происходит трансформация сил сухого трения. В системе проявляются силы вязкого и упругого происхождения. Смесь реагирует на внешнее уплотняющее воздействие, как упруго-вязкопластическое тело. Третья стадия описывается моделью Кельвина–Фойгта. В среде проявляются преимущественно вязкие и упругие силы.

Скорость перехода смесей в конечное реологическое состояние определяется главным образом режимом колебаний. Анализ иссле-

дований показывает, что для эффективного уплотнения рационально воздействие переменным (управляемым) режимом колебаний и внешнего механического воздействия. Каждому реологическому состоянию бетонной смеси соответствует определенный режим воздействия. При этом уплотнение жестких бетонных смесей, способных вовлечь значительное количество «защемленного» воздуха, на третьей (компрессионной) стадии виброуплотнения с прессующим усилием пригрузов характеризуется наличием «упругого последствия» сжатого воздуха. Расширение последнего (заблокированного в объёме уплотняемого бетона (цементного теста в нём)) при снятии давления пригруза способно нарушить слабые коагуляционные связи между сольватированными частицами (флокулами) цемента. Степень проявления этого отрицательного эффекта различна и он может наблюдаться как сразу после формования или после тепловой отработки, так и в процессе эксплуатации вибропрессованных изделий. Его внешнее проявление – наличие сети трещин, от микро размеров (невидимых после формования, но проявляющихся либо после тепловой обработки или в процессе эксплуатации) до макротрещин, видимых после формования.

Факторами, увеличивающими воздухововлечение в бетонную смесь и его упругое последствие при формировании изделий, в основном являются: использование мелких, малофракционных песков; химических добавок с эффектом воздухововлечения; повышенный (сверх минимально необходимого) расход цемента (увеличение объёма цементного теста); вибрационное воздействие недостаточной интенсивности, в результате чего не обеспечиваются условия для проявления эффекта тиксотропии цементного теста во всем объёме уплотняемого бетона. На стадии тепловой обработки действие отмеченных факторов может усиливаться деструктивными явлениями при подъёме температуры (особенно выше 40 °С), изотермии (значительной продолжительности и пониженной влажности среды) и остывании изделий с перепадом температуры «бетон – среда» более 20 °С.

В этой связи представляет практический интерес анализ исследований А.А. Афанасьева [103, 104] в части миграции воздуха в процессе вибрационного уплотнения бетонных смесей.

### *2.1.2. Миграция воздуха в смесях при вибровоздействии*

В зависимости от консистенции смесей и режима уплотнения, поведение воздушных включений может резко отличаться [103, 104]. Так, для жестких и малоподвижных смесей начальный этап уплотнения характеризуется высокой пористостью системы, смесь находится в условно рыхлонасыпном состоянии. Каналы воздушных прослоек не замкнуты, в системе преобладают силы сухого трения. Динамическое воздействие на данном этапе способствует удалению основной массы воздуха за счет перегруппировки составляющих и гидродинамического давления вышележащих слоев смеси. Часть оставшегося воздуха вследствие формирования слитной структуры цементного теста находится в виде разрозненных замкнутых пузырьков. На данном этапе уплотнения ставятся две технологические задачи: снизить до минимально возможного уровень пористости и обеспечить высокое качество поверхностей за счет удаления воздушных образований в зонах контакта с формообразующими элементами. Решение первой задачи связано с изучением движения воздушных пузырьковых образований в «лабиринте» растворной прослойки между частицами крупного заполнителя в зависимости от режимов динамического воздействия, вязкости системы, размеров пузырьков, давления и других параметров.

На воздушный пузырек, всплывающий в смеси, действуют три силы: подъемная, сила сопротивления окружающей среды и сила поверхностного натяжения. В результате действия сил поверхностного натяжения пузырек стремится сохранить шарообразную форму. С увеличением его размера из-за неравномерности давления по его окружности он деформируется, отклоняясь по форме от шара. Для воздушных образований диаметром 3–5 мм их форму можно считать сферической, а движение отдельного пузырька можно рассматривать как движение жесткой сферы.

Теоретическое описание движения воздушных образований вибрируемой смеси, разработанное А.А. Афанасьевым, позволяет установить зависимость или условие, при котором воздух будет удаляться. Этим условием является превышение подъемной силы над силами трения между воздушным пузырьком и цементным тестом. При этом существует взаимосвязь частоты  $f$  вибровоздействия с вибровязкостью и плотностью среды (смеси).



Установлено выражение для частоты, при которой силы трения между воздушными пузырьками и средой приближаются к нулю, соответствующее:

$$f > \frac{9\eta}{\pi r^2 \rho}. \quad (2.1)$$

В зависимости (2.1) величины  $\eta$  и  $\rho$  характеризуют соответственно вязкость жидкой фазы или растворной прослойки и ее плотность. Отсюда следует, что для удаления пузырьков воздуха различного диаметра требуется определенный диапазон частот, причем с уменьшением радиуса пузырьков вынужденная частота колебаний должна существенно повышаться вплоть до звукового и ультразвукового диапазонов.

На основании изложенного легко объясняется увеличение плотности и прочности бетонов, уплотненных с использованием ударных режимов уплотнения, воздействием поличастотных режимов с высокой частотой и частот ультразвукового диапазона. Для повышения прочности и плотности растворов необходимо использовать ультразвуковой диапазон колебаний, который создает условия удаления воздушных образований малого диаметра, значительно повышает плотность и прочность, что является результатом дополнительной активации цемента. На этой основе предложены активационные технологии бетона, обеспечивающие ему существенное повышение физико-механических свойств [105, 106].

Воздушные пузырьки в бетонной смеси в результате периодического сжатия и поступательных колебаний способны к миграции. Относительное движение пузырька ускоряется при наличии градиента давления. При периодическом движении определенная комбинация фаз давления и градиента давления вызывает дрейф пузырька. Как правило, направление движения пузырька совпадает с областью, где колебания давления больше. В опытах с использованием пульсирующих систем, а также глубинных вибраторов установлено повышение скорости всплытия пузырьков воздуха с ростом градиента динамического давления. При таких условиях достигается вытеснение воздушной фазы в слои бетона с меньшим давлением.

Получение высокого качества поверхностей бетонных изделий непосредственно связано с движением воздушных пузырьков в смеси. В зависимости от схемы приложения динамического воздействия на смесь рассмотрим несколько вариантов изготовления изделий из нее. Наиболее распространенный вариант — получение изделий в горизонтальном положении, когда источник вибрации передает колебания днищу формы и через нее смеси.

Качество поверхностей изделий, прилегающих к днищу, определяется многими факторами и, в частности, консистенцией смеси, ее вибровязкостью; степенью динамического давления, создаваемого вышележащим столбом смеси и системой пригруза; режимами колебаний, при которых обеспечивается безотрывное движение смеси от днища, либо наблюдаются явления отрыва и связанный с этим интенсивный подсос воздуха. Рассматривая условия отрыва пузырька воздуха от горизонтально расположенной вибрирующей поверхности А.А. Афанасьев получил следующую зависимость:

$$d \geq 18 \frac{A \cdot \omega^2}{g} \sqrt{\frac{\eta}{2\rho\omega}} \quad (2.2)$$

связывающую диаметр пузырьков ускорение вынужденных колебаний ( $A \cdot \omega^2$ ), ускорение свободного падения ( $g$ ), вязкость и плотность системы.

Отсюда следует, что на процесс всплытия пузырьков воздуха в равной степени влияет как ускорение, так частота вынужденных колебаний. Причем с увеличением частоты (при одинаковом ускорении) диаметр пузырьков, способных к миграции, будет уменьшаться; при наличии пузырьков в широком диапазоне размеров следует воздействовать режимами, включающими спектр необходимых частот.

Исследование движения пузырьков образований вызывает, что под действием вибрации они стремятся к вибрирующей поверхности, «сливаются» и разрастаются до объема, подъемная сила которого достаточна для их дальнейшего движения к открытой поверхности. Таким образом, вибрирующая поверхность формы является

как бы притягивающей. Этим объясняется сложность получения высокого качества поверхностей при изготовлении изделий на виброплощадках, кассетных формах и других устройствах, где вибрация передается через плоскости стен на смесь.

Проверка полученных зависимостей движения воздушных образований была осуществлена в лабораторных условиях путем определения скорости всплытия воздушных шариков различного диаметра в зависимости от частоты и ускорения колебаний. Результаты показывают, что с уменьшением диаметра пузырьков максимальная скорость всплытия достигается при более высокой частоте. Так, для пузырьков диаметром 12 мм эта частота лежит в диапазоне 50 Гц и с уменьшением диаметра до 3,2 мм возрастает до 80 – 90 Гц.

На характер движения воздушных образований существенное влияние оказывает направленность динамического воздействия. В случаях импульсного уплотнения, со смещением пульсации на 90 и 180° установлено, что процесс миграции воздушных образований в основном осуществляется в пристенной зоне. Данные регистрации динамического давления по высоте столба бетонной смеси на поверхности и внутри свидетельствуют о наличии градиента давления. Зона бетонной смеси, прилегающая к вертикальным стенкам формы, испытывает меньший перепад давления на 15–20%. Этот фактор способствует направленному движению воздушных образований в пристенную зону, их слиянию до размеров, при которых подъемная сила достаточна для их движения к открытой поверхности. Так как при импульсном уплотнении вертикальные стенки неподвижны, то за счет периодического движения смеси вокруг стенок образуется слой среды с пониженной вязкостью. Это обстоятельство способствует быстрому удалению воздушных включений и получению высокого качества прилегающих поверхностей. При воздействии гармонической нагрузки кривая динамического давления по высоте столба, имеет нулевые области и зоны отрицательного давления, что приводит к разрыву сплошности среды и интенсивному подсосу воздуха. В таких условиях получение высокого качества поверхностей изделий и однородной плотности весьма затруднительно.

### ***2.1.3. Скорость, ускорение и распространение колебаний в вибрируемой смеси***

Общие представления о поведении бетонной смеси при вибрировании можно получить, зная ее структурную вязкость. Важно знание предельных значений скорости движения частиц бетонных смесей разного состава и формуемости, по которым можно установить эффективность вибрации. Анализ ряда работ показал, что ни амплитуда колебания, ни скорость, ни ускорение, взятые в отдельности, не характеризуют эффект вибрирования, т. е. обеспечение требуемой прочности и плотности или определение необходимой продолжительности вибрирования. Решающим фактором, вызывающим тиксотропное разжижение цементного теста и влияющим на переход бетонной смеси в состояние жидкости, является не амплитуда или частота колебания, взятые в отдельности, а функция их, определяющая скорость или ускорение при перемещении под действием вибрации частиц бетонной смеси. Вибрирование будет эффективным только в том случае, когда скорость частиц бетонной смеси будет достаточна для преодоления сил внутреннего трения.

Для бетона конкретного состава при постоянной продолжительности вибрирования имеется оптимальная скорость, за пределами которой плотность и прочность медленно повышаются или остаются без изменений. При скорости ниже оптимальной значения прочности и плотности резко уменьшаются. Вибрирование бетонной смеси при амплитуде колебания выше предельной не изменяет плотности и прочности, кроме случаев больших амплитуд колебания, когда может произойти расслоение бетонной смеси за счет возникновения турбулентных явлений. Для конкретной скорости имеется критическая продолжительность вибрирования, ниже которой прочность бетона уменьшается и выше ее не изменяется. Для малых значений скорости движения критическое значение времени вибрирования может оказаться чрезвычайно большим. А.Е. Десовым [91] получена характеристика удобоукладываемости бетонной смеси в виде семейства кривых, показанных на рис. 2.2 для различных В/Ц и составов. Можно назначить время вибрирования, если известна амплитуда колебаний виброплощадки, или, наоборот, назначить необходимую амплитуду колебаний для заданного времени вибрирования. Показанная на графике область показателей

удобоукладываемости от 20 до 78 сек соответствует жестким бетонным смесям. Для сверхжестких бетонных смесей время вибрирования возрастает. Время вибрирования при установленной (зафиксированной) амплитуде колебаний влияет на прочность бетона, о чем свидетельствуют результаты, полученные А.Е. Десовым, приведенные в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Закономерность влияния времени вибрирования ( $A \sim \text{const}$ ;  $f \sim \text{const}$ ) жесткой смеси на относительный прирост плотности и прочности бетона [91]

Время вибрирования, с	Средняя плотность, % (кг/м <sup>3</sup> )	Прочность, %
10	100 (2360)	100
15	101	108
20	102	110
25	102	115
30	102,5	124
40	102,5	153
60	102,5	170
120	102,5	175

С увеличением времени вибрирования с 10 до 60 с предел прочности при сжатии увеличился на 70% и увеличилась плотность. При уменьшении амплитуды колебаний ниже оптимального для конкретного состава бетона предел времени вибрирования становится очень большим. Этим определяются предельные амплитуды или предельные скорости колебаний. С увеличением формуемости (снижением жесткости) смеси путем увеличения водоцементного фактора или путем увеличения расхода цемента, введением пластифицирующих добавок предельная скорость уменьшается. Для достижения качественного уплотнения бетонной смеси вибрированием необходимо, чтобы скорость колебаний была выше предельной для данного состава и принятых условий формования. Влияние частоты колебаний проявляется в росте скорости и ускорения.

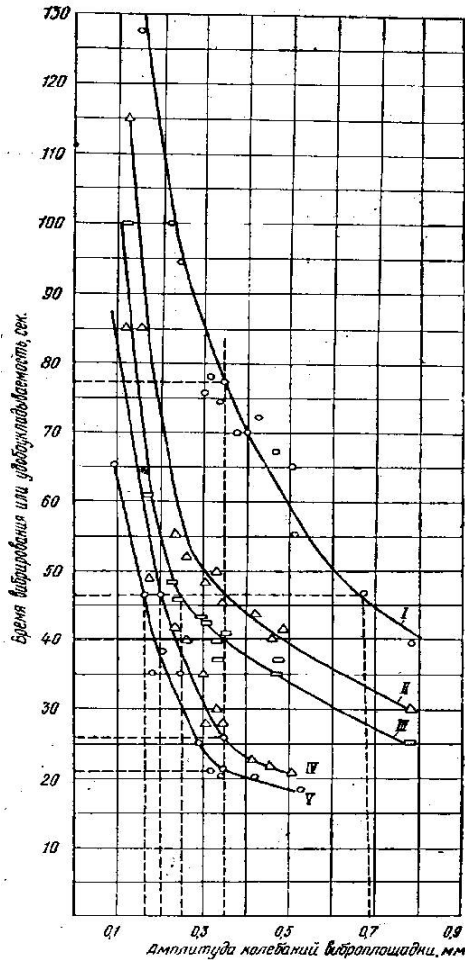


Рис. 2.2. График для выбора времени вибрирования в зависимости от амплитуды колебаний виброплощадки [91]: I - В/Ц = 0,4, Ж = 78 с; II - В/Ц = 0,45, Ж = 47 с; III - В/Ц = 0,5, Ж = 40 с, ОК = 0,5 см; IV - В/Ц = 0,55, Ж = 25 с, ОК = 4,5 см; V - В/Ц = 0,6, Ж = 21 с, ОК = 8 см; Ж - жесткость по техническому вискозиметру.

При этом установлены их минимальные значения, соответствующие различным уровням частоты колебаний и являющиеся необ-

ходимыми (табл. 2.2) для проявления эффекта тиксотропии цементного теста в бетоне.

Таким образом, влияние динамических характеристик вибрации – частоты и амплитуды колебаний, определяющих скорость колебаний, на прочность и плотность бетона оказывается существенным. Например, работая в режиме от нуля до предельной амплитуды для конкретных условий, можно получить весьма разнообразную прочность бетона, причем значительно меньшую, чем та, которую можно получить при правильно выбранном режиме. При этом рабочие значения амплитуды и частоты должны быть выше и обеспечивать амплитуду или скорость в данной точке, необходимую для полного проявления тиксотропных свойств, называемую минимальной скоростью или минимальной амплитудой (см. табл. 2.2).

Таблица 2.2

Значения минимальных скоростей, амплитуд и ускорений [91]

Частота колебаний, $\Gamma_{ц}$ (кол/мин)	Минимальная		
	амплитуда, см	скорость, см/с	ускорение, м/с <sup>2</sup>
25/1500	0,037	5,5	8,3
50/3000	0,014	3,3	10,0
75/4500	0,005	2,8	12,6
120/6000	0,004	2,5	15,0
125/7500	0,003	2,2	17,5

*Распространение колебаний в бетонной смеси* подчиняется общим закономерностям распространения колебаний в упруго-вязких средах.

Теоретическая зависимость между расстоянием от источника колебания  $\eta_2$  и амплитудой колебания  $A_2$  при известном значении амплитуды колебания данного вибратора  $A_1$  и известном коэффициенте затухания  $\beta$  описывается уравнением

$$A_2 = A_1 \sqrt{\frac{r_1}{r_2}} e^{-\beta(r_2 - r_1)} \quad (2.3)$$

Коэффициент затухания колебаний может с известным приближением характеризовать данную среду как проводник колебаний.

Для пользования выражением (2.3) при определении глубины пространства колебаний нужно знать коэффициент затухания  $\beta$  для различных бетонных смесей, а также значения минимальных амплитуд колебаний, при наличии которых происходит уплотнение бетонной смеси (значения их приведены в таблице 2.2). При этом допускается, что амплитуда колебаний передается без потерь прилегающим к вибрирующей поверхности частицам бетонной смеси.

На рис. 2.3 и 2.4 показаны экспериментальные кривые (по работам А.Е. Десова) изменения амплитуды колебаний и соответствующих им скоростей с увеличением расстояния от вибратора. Результаты индивидуальных определений скоростей и амплитуд указывали на малый разброс точек, укладываемых на плавную кривую. Между амплитудой и скоростью колебаний (при исследованной частоте колебаний в 100 Гц (6000 кол/мин)) имелось практическое соответствие.

Экспериментальная кривая близка к теоретической по уравнению (2.3) при коэффициенте затухания  $\beta \sim 0,08 \text{ см}^{-1}$ . Обработка экспериментальных данных других авторов показало соответствие теории и результатов опытов. На рис. 2.4 сплошной жирной линией показана теоретическая кривая изменения амплитуды, колебания по мере удаления от их источника, построенная по уравнению (2.3), а пунктирной линией - экспериментальная кривая [91].

Оценивая влияние различных факторов на распространение колебаний по экспериментальным данным можно заключить, что с увеличением времени вибрирования коэффициент затухания уменьшается и колебания распространяются на большее расстояние, что отражает рост плотности формирующейся структуры цементного бетона. Характерно, что с увеличением времени вибрирования с 30 до 60 с в пограничном к вибратору слое амплитуда колебаний увеличилась; при дальнейшем увеличении времени вибрирования до 210 с амплитуда колебаний в пограничном слое не изменялась. То есть, продолжительность вибрирования имеет большое влияние на коэффициент затухания; в начальный момент вибрирования (пока не установилось устойчивое состояние) коэффициент затухания значителен. По мере вовлечения большей части бетонной смеси в колебания коэффициент затухания уменьшается и после 60 с вибрирования обычно стабилизируется. Так, после 30 с вибриро-



вания коэффициент затухания был около  $0,145\text{см}^{-1}$ , а затем уменьшился до  $0,073\text{см}^{-1}$  и до 210 с не изменялся.

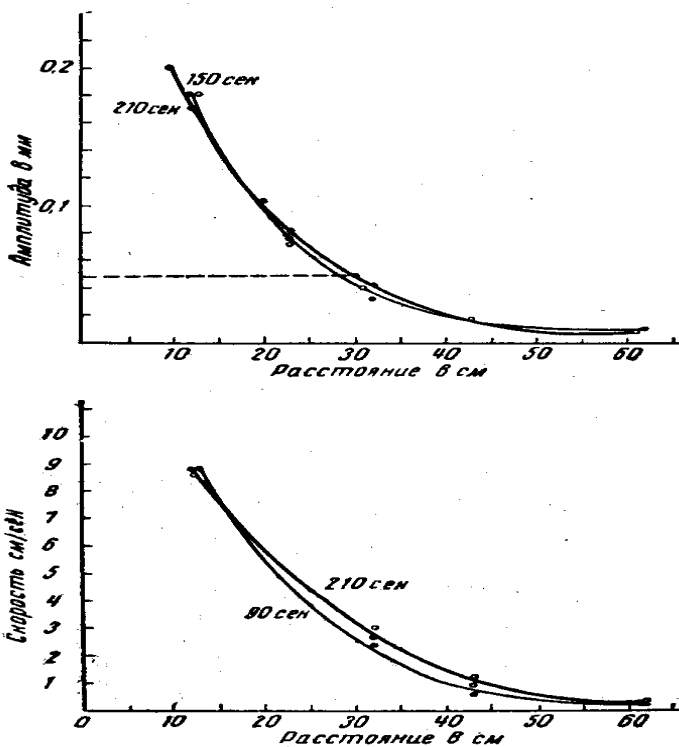


Рис. 2.3. Экспериментальные кривые затухания колебаний [91].

Влияние амплитуды проявляется в следующем. Коэффициент затухания колебаний при малой начальной амплитуде колебаний меньше, чем при большой. Например, при амплитуде  $0,04\text{мм}$  коэффициент затухания оказался равным  $\beta \sim 0,0472\text{см}^{-1}$ . Бетоны на вяжущем с добавлением минеральных добавок большой водопотребности (глины, трепела и др.) имеют значительно больший коэффициент затухания колебаний, чем бетон на портландцементе. С увеличением подвижности бетонной смеси коэффициент затухания уменьшается и растет с повышением ее жесткости.

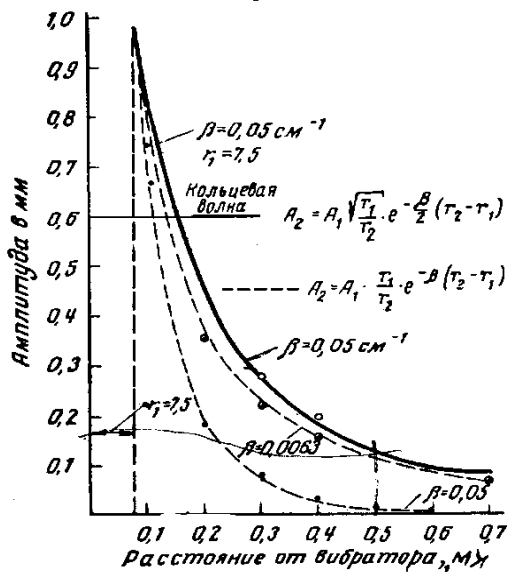


Рис. 2.4. Сравнение экспериментальной кривой изменения амплитуд колебаний с теоретическими кривыми; нижняя пунктирная кривая относится к сферической волне с  $\beta \sim 0,05 \text{ см}^{-1}$  [91].

С ростом частоты колебания (в исследованных пределах) коэффициент затухания в бетонной смеси снижается, т. е. колебания при низкой частоте затухают быстрее. Эти данные указывают на безусловную выгоду высокой частоты, особенно при уплотнении жестких смесей.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что коэффициент затухания колебаний в бетонной смеси зависит от её структурной вязкости и частоты колебаний; в меньшей степени – от величины возмущающей силы или начальной амплитуды при заданной частоте.

#### 2.1.4. Интенсивность и эффективность вибрирования

Таким образом, сущность вибрационного уплотнения бетонной смеси заключается в том, что путем сообщения механических колебаний отдельным частичкам твердой фазы бетонной смеси (для зе-

рен цемента – покрытым слоем жидкости; для заполнителей – жидкости и цементного теста) непрерывно нарушаются связи между ними, снижаются силы трения и сцепления, часть жидкости из внешнего диффузионного слоя сольватных оболочек у частиц твердой фазы переходит в свободное состояние. При этом даже жесткие смеси превращаются как бы в тяжелую жидкость, приобретающую при вибрации свойства «текучести». Режим вибрирования характеризуется тремя основными параметрами: амплитудой колебаний  $A$ , частотой колебаний  $f$  и временем вибрирования  $t$ , а для жестких смесей их заполняет давление пригруза (усилие прессования). Наибольшего эффекта вибрационное уплотнение достигает тогда, когда колебание частиц твердой фазы в бетонной смеси вступает в резонанс с источником колебаний. Поскольку каждой величине зерна твердой фазы соответствует своя собственная частота колебаний, то и наибольший эффект вибрирования обеспечивается много-частотным вибрированием, когда в резонанс будут вовлечены все «зерна» смеси. Фактически в бетонной смеси происходит самосинхронизация связанных между собой цементным тестом отдельных зерен заполнителя. Поэтому речь может идти о повышении эффективности вибрирования путем выбора такого режима, который обеспечит совпадение собственных колебаний всего объема смеси с частотой вибратора.

Особенностью виброформования жестких смесей (особенно с показателем жесткости более 10 с (марки Ж2 и выше) является недостаточное проявление эффекта тиксотропного разжижения в верхних слоях цементного теста виброуплотняемого бетона. Для его проявления необходимо сблизить сольватированные частицы вяжущего до взаимного контакта водных оболочек. Их взаимодействие, вначале упругое, переходящее затем по увеличивающейся площади в единый объём жидкой фазы между соседствующими частицами вяжущего, является необходимым условием формирования слитной структуры цементного теста в бетоне. Эту функцию при вибропрессовании выполняет давление пригрузов.

В общем случае эффект виброуплотнения зависит от частоты колебаний  $f$  и от амплитуды  $A$  [107]. Одинаковая степень уплотнения бетонной смеси данного состава и заданной консистенции за одно и то же время вибрирования « $t$ » возможна при различных сочетаниях амплитуд и частот колебаний, если соблюдается условие

$$A_1^2 \cdot f_1^3 \sim A_2^2 \cdot f_2^3 \sim \dots \sim A_n^2 \cdot f_n^3, \text{ см}^2/\text{с}^3. \quad (2.4)$$

Здесь сомножитель  $Af$  представляет собой путь, совершаемый колеблющейся частицей в единицу времени, т. е. скорость колебаний, а сомножитель  $A f^2$  — ускорение колебаний. Произведение скорости колебаний на их ускорение называется интенсивностью вибрации  $I$ , имеющую размерность  $\text{см}^2/\text{с}^3$ , то есть

$$I = A^2 \cdot f^3, \text{ см}^2/\text{с}^3. \quad (2.5)$$

Каждому конкретному составу и консистенции бетонной смеси соответствует своя оптимальная интенсивность вибрации, при этом чем больше жесткость смеси, тем выше должен быть показатель  $I$ . На рис. 2.5 показан график [107] для выбора амплитуды колебаний в зависимости от частоты и заданной интенсивности вибрации.

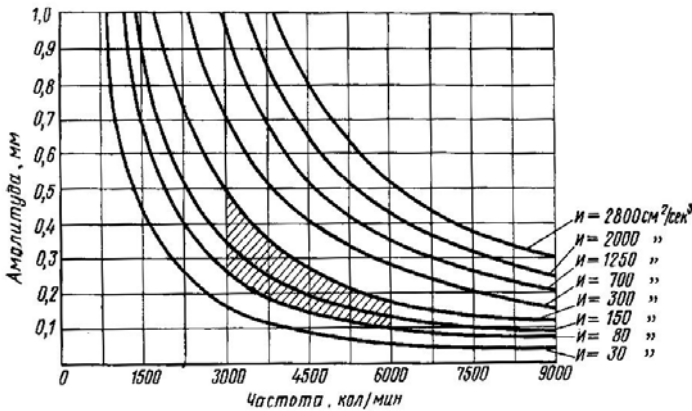


Рис. 2.5. Закономерность изменения интенсивности вибрирования в зависимости от амплитуды и частоты колебаний [107]

Заштрихованная площадь графика (между значениями  $I \sim 80\text{--}300 \text{ см}^2/\text{с}^3$ ) соответствует наиболее распространенным на практике амплитудам и частотам. Интенсивность колебаний виброплощадок со стандартными параметрами ( $A = 0,5 \text{ мм}$   $f = 3000 \text{ кол/мин}$ ):  $I \sim 312,3 \text{ см}^2/\text{с}^3$ .

С увеличением частоты колебаний до 100 Гц (6000 кол/мин), что сопровождается снижением амплитуды до  $\sim 0,3$  мм, интенсивность вибровоздействия возрастает до величины:  $I = 0,03^2 \cdot 100^3 = 900$ ,  $\text{см}^2/\text{с}^3$ , т. е. практически в три раза, в сравнении со стандартными параметрами вибрирования.

Помимо критерия интенсивности вибрирования, иногда пользуются критерием постоянства эффективности вибрации для различных бетонных смесей, показатель которого:

$$\mathcal{E} \sim I \cdot t^k, \quad (2.6)$$

Он показывает, что можно достичь одинаковой степени уплотнения бетонных смесей при различных значениях  $I$  и продолжительности вибрирования  $t$ , т. е. соблюдается условие

$$I_1 \cdot t_1^k \sim I_2 \cdot t_2^k \sim \dots \sim I_n \cdot t_n^k. \quad (2.7)$$

Показатель степени «к» в выражениях (2.6) и (2.7) зависит от показателя формуемости или жесткости смеси и может приниматься в расчетах применительно к современным условиям вибропрессования равным:  $k = 2$ . Для различных бетонных смесей при определенной интенсивности вибрирования существует своя оптимальная продолжительность виброобработки. Последняя зависит от консистенции и особенностей состава бетонной смеси и может колебаться в значительных пределах. Недостаточная продолжительность вибрирования приводит к недоуплотнению смеси, что сказывается на плотности и прочности бетона.

Тенденцию зависимости изменений плотности и относительной прочности бетона от продолжительности вибрирования жесткой бетонной смеси отражают результаты экспериментов, приведенные по данным А.Е. Десова [91] в табл. 2.1 и 2.3 по данным Э.И. Батыновского [23]. По существу аналогичная закономерность характеризует уплотнение без эффекта расслоения жестких бетонных смесей любого произвольного состава. Во всех случаях будет наличие оптимальной продолжительности уплотнения, превышение которой увеличивает затраты (энергоёмкость, износ оборудования и пр.) не приводя к заметному повышению качественным характеристик бетона.

Таблица 2.3

Влияние продолжительности повторного вибрирования  
на прочность бетона [23]

Продолжительность повторного вибрирования, С	Прочность бетона на сжатие (МПа) в возрасте, сут, нормально-влажностного твердения ( $t \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ; $f \geq 90 \%$ )			
	1	3	7	28
0	23,0	40,5	51,6	57,5
15	26,0	45,2	56,9	63,6
30	27,3	48,0	60,4	69,7
60	32,3	52,5	65,4	74,2
120	35,6	54,8	69,7	79,0
240	37,6	63,0	77,4	85,9
480	42,5	70,6	79,6	87,0

Сказанное относится и к данным табл. 2.3, в которой приведены результаты эксперимента с бетоном, полученным по специфической технологии «сухого формования». В этом случае сухую бетонную смесь (состава: Ц = 360 кг; П = 810 кг; Щ<sub>5-20</sub> = 1260 кг) уплотняли вибрированием ( $A \sim 0,5$  мм;  $f \sim 50$  Гц) в течение 60 с под пригрузом 0,025 МПа, затем насыщали водой под давлением 0,3 МПа и повторно вибрировали указанное в табл. 2.3 время под тем же пригрузом. Бетон одноразового уплотнения (время повторного вибрирования – «0») характеризовался водоцементным отношением  $(В/Ц)_6 = 0,28$ ; повторно вибрированный в течение 15 и 30 с, соответственно, 0,27 и 0,265, а повторно вибрированный в течение 60 с и более –  $(В/Ц)_6 \sim 0,26$ . Уменьшение водоцементного отношения при повторном вибрировании до 60 с связано с отжатием части воды затворения из фильтрационных каналов (образующихся в процессе водонасыщения сухой смеси), которого с дальнейшим увеличением времени вибрирования не наблюдалось [23]. Очевидно, что при традиционном приготовлении бетона это были бы сверхжесткие, трудноформируемые смеси. В рассматриваемом случае бетон был плотен и характеризовался  $\rho_b \sim 2500\text{--}2540 \text{ кг/м}^3$ .

Вместе с тем и в этом случае (несмотря на общий рост прочности с увеличением продолжительности вибрирования) относительный её прирост (МПа/с) был выше для начальных 15 с и 30 с (около

0,407 МПа/с) и 60 с с повторного вибрирования: (74,2 – 57,5): 60 около 0,273 МПа/с, чем для 120 с и более: (79,0–57,5): 120 около 0,179 МПа/с. То есть, наличествует тенденция оптимальной продолжительности виброуплотнения бетона по критерию относительного прироста его прочности.

В целом, в общих случаях, отраженных экспериментальными данными источников [23 и 91], прочность бетона из жестких смесей, уплотняемых с пригрузом и не подверженных расслоению, возрастает под влиянием продолжительного вибрирования по причине глубинных изменений в цементном тесте: дезагрегации цементных флоккул, перераспределения воды и «обводнения» дополнительно открывающихся поверхностей вяжущего, удаления воздуха из межзерновых пространств распадающихся флоккул цемента, уплотнения зон контакта цементного теста с зернами заполнителя и пр., что в совокупности относят к понятию «активации цемента» и обеспечивает рост плотности, непроницаемости и прочности бетона [105, 106, 108].

## **2.2. Влияние свойств составляющих на формуемость и свойства бетона**

Основной задачей при формировании бетона в процессе изготовления элементов благоустройства является создание максимально плотной структуры материала. Решение этой задачи во многом зависит от рациональности подбора гранулометрии или зернового состава полидисперсных твердофазных компонентов: цемента, песка для мелкозернистого бетона и более сложной композиции для бетона со щебнем. При этом для целого ряда регионов Беларуси остра проблема, заключающаяся в отсутствии крупнозернистого, многофракционного природного песка, либо в повышенном содержании в них глинистых (илистых) фракций. Речные пески также не однородны и характеризуются для р. Двины и р. Немана вполне приемлемой крупностью:  $M_k \geq 2,0$ , но для р. Днепра и р. Сож –  $M_k \leq 1,5$ , а для р. Припяти и р. Пины –  $M_k \sim 1,0-1,2$ , что создает проблемы получения бетона с требуемой для элементов мощения прочностью, морозостойкостью и износостойкостью (истираемостью). В этой связи необходима разработка четких рекомендаций произво-

дителям по наиболее рациональным подходам к подбору составов вибропрессованного бетона, включая подбор фракционного состава заполнителей, а также по возможности количественной оценки влияния качества материалов на свойства (прочность, водопоглощение, морозостойкость, истираемость) бетона.

Методика исследований формуюмости и качества уплотнения бетона в зависимости от его составляющих при формировании жестких смесей ставила целью уточнение влияние гранулометрии заполнителей, расхода цемента (и пигментов), водосодержания и химических добавок на качество уплотнения бетона. Во всех случаях бетонные смеси уплотняли вибрированием на стандартной лабораторной виброплощадке (параметры вибрирования: амплитуда – 0,5 мм; частота – около 50 Гц) под давлением пригруза примерно в 0,2 МПа, до получения требуемой средней плотности бетона.

*Материалы для исследований.* В исследованиях использовали материалы для бетона с характеристиками, приведенными в табл. 2.4; 2.5; 2.6; 2.7 и 2.8.

В качестве вяжущего использовали портландцемент марки ПЦ 500-Д0 (класс ЦЕМ I - 42,5N) ОАО «Кричевцементношифер» с характеристиками, приведенными в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Характеристики цемента

Прочность в возрасте 28 сут, МПа		Коэффициент нормальной густоты $K_{нг}$	Плотность $\rho_{ц}$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельная поверхность $S_{ц}$ , см <sup>2</sup> /г
на растяжение при изгибе	на сжатие			
6,4	43,6	0,25	3080	2980



Таблица 2.5

## Характеристики песка

5	Речной	4	3	2	1	Месторождение	
						Микашевичи (отсев)	Заславль
нет	нет	нет	нет	нет	Мытый	Дополнительного обработка	
						Крупяжино	То же
1465	1400	1560	1580	1580	1580	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	
						В рыхлонасыпном состоянии $\rho^0$	В виброуплотненном $\rho^{\text{в}}$
1669	1643	1770	1800	1800	1800	Плотность зерен, $\rho^{\text{з}}$ , кг/м <sup>3</sup>	
						< 0,14	0,14
2650	2700	2650	2650	2650	2650	Зерновой состав (частные остатки, %) на ситах:	
						0,14	0,315
7,1	2,6	3,0	3,2	3,2	1,0	12,6	1,25
44,9	15,6	23,0	17,5	17,5	18,0	Модуль крупности, $M_k$	
						18,0	2,67
35,9	27,9	35,5	37,0	37,0	37,4	Удельное водопоглощение поверхности, $V_{\text{ад}}$ , л/т	
						12,3	25,8
8,9	28,1	24,6	12,3	12,3	12,6	2,694	30,0
1,5	5,5	10,9	18,0	18,0	18,6	2,2	7820
1,7	20,3	3,0	12,0	12,0	12,4	2,2	33,3
1,55	2,79	2,2	2,694	2,694	2,67	Пустотность в виброуплотненном состоянии $\Pi^{\text{в}}$ , %	
						2,5	32,0
45,5	-	30,0	28,5	28,5	25,8	Удельная поверхность, $S_{\text{п}}$ , м <sup>2</sup> /т	
						7055	6410
10875	-	7820	7055	7055	6410	Пустотность в виброуплотненном состоянии $\Pi^{\text{в}}$ , %	
						32,0	32,0
37	39	33,3	32,0	32,0	32,0	Пустотность в виброуплотненном состоянии $\Pi^{\text{в}}$ , %	
						32,0	32,0

В качестве мелкого заполнителя использовали природный песок заславльского и крапужинского месторождений, характеристики которого приведены в табл. 2.5. Значения удельного водопоглощения песка  $V_{ад}$  и его удельной поверхности  $S_n$  получены расчетом по методике проф. И.Н. Ахвердова [49, 109].

Таблица 2.6

Характеристики щебня

№ п/п	Форма зерен	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>			Зерновой состав (частные остатки на ситах с круглыми отверстиями) в %			Пустотность в виброуплотненном состоянии $P^в$ , д. ед.
		В рыхлонасыщенном состоянии $\rho^0_n$	В виброуплотненном $\rho^в_n$	Плотность зерен, $\rho^з_n$	До 5	5–10	Свыше 10	
1	обычная	1280	1470	2700	5	89	6	0,456
2	кубовидная	1380	1550	2700	6	94	–	0,426

В качестве крупного заполнителя использовали щебень гранитный микашевичского месторождения обычного дробления (№ 1) и кубовидной формы (№ 2) с характеристиками, приведенными в табл. 2.6.

Для затворения бетона использовали воду водопроводную, удовлетворяющую требованиям СТБ 1114–98; ГОСТ В качестве пигментов использовали применяемые строительной отраслью при производстве цветных бетонов сухие порошкообразные вещества с характеристиками, приведенными в табл. 2.7.

Таблица 2.7

## Характеристики пигментов

№ п/п	Название пигмента	Цвет	Базовое вещество	Содержание базового вещества % от массы	Значение рН фактора	Цветовой аналог, производимый по ГОСТ
1	Colorox1100 (G)	Красный	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	96,9	4,2	Сурик железный ГОСТ 8135
2	Colorox 3120(G)	Желтый	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	87,3	3,65	Пигмент желтый железистоокисный ГОСТ 18172
3	Colorox6860 (G)	Коричневый	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	95,6	5,55	–
4	Colorox 3300(G)	Черный	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	96,4	5,9	Углерод технический (сажа) ГОСТ 7885
5	Chromox 5326	Зеленый	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,2	8,0	Окись хрома ГОСТ 2912

В качестве химических добавок в бетон использовали вещества, представленные на рынке Беларуси в качестве добавок для вибропрессованного бетона, характеристики которых приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8

## Характеристики химических добавок

Название добавки	Страна производитель добавки	Основной эффект	Состояние вещества, цвет	Плотность кг/л	Содержание хлорид-иона, % по массе	Значение рН-фактора
1	2	3	4	5	6	7
Plastolith-A	Германия	Противоналипание, пластификация	Жидкость, желто-зеленый	1,011	до 0,1	7,0

Окончание табл. 2.8

1	2	3	4	5	6	7
Вибропор Ж35	Беларусь	Противоналипание, воздуховлечение, пластификация	Жидкость, темно-коричневый	1,143	До 0,1	6,5
Софлексил 60-80	Россия	Противоприлипание, гидрофобизация	Жидкость, белый	0,945	-	5,5
Стахемент F	Беларусь	Противоприлипание, пластификация	Жидкость, темно-коричневый	1,161	До 0,1	7,0
Смола нейтрализованная воздуховлекающая (СНВ)	Россия	Противоприлипание, воздуховлечение, гидрофобизация	Паста 90 % концентрации, коричневый	-	-	5,0
Щелочной сток производства капролактама (ЩСПК)	Беларусь	Противоприлипание, воздуховлечение	Жидкость, темно-коричневый	1,196	-	10,7

### ***2.2.1. Особенности виброуплотнения жестких бетонных смесей***

Жесткие бетонные смеси, применяемые при изготовлении элементов благоустройства вибропрессованием, характеризуются достаточно узким диапазоном показателя жесткости, соответствующим примерно 15–40 с. В процессе формирования бетона с немедленной распалубкой возникает противоречие между необходимостью обеспечить изделиям качественную поверхность с сохранением приданной геометрической формы и одновременно добиться формирования плотной и непроницаемой структуры бетона, являющейся базой его прочностных и эксплуатационных свойств. Наилучшие результаты по качеству бетона обеспечивают условия формирования, при которых в объеме цементного теста уплотняемого бетона про-

является эффект кратковременного тиксотропного разжижения. В результате за период уплотнения формируется непрерывная (слитная) структура цементного теста по всему объему формируемого изделия. По физической сути данного явления происходит «слияние» сольватных оболочек и «объединение пленок» жидкости, адсорбированной поверхностью частиц (флоккул) цемента, механических примесей (пыли и т.п.), зерен заполнителей и между ними формируются зоны взаимных контактов по наибольшим площадям. Одновременно достигается более компактное взаимное расположение частиц (флоккул) вяжущего и зерен заполнителей, что в целом приводит к формированию плотной структуры бетона.

Однако явно выраженный эффект тиксотропии сопровождается появлением пленок свободной, не удерживаемой силами поверхности частиц твердой фазы жидкости, и ростом сил адгезии к поверхности формирующих устройств, в частности к плоскостям пригрузов, что проявляется в «отрывах» цементного теста (раствора) с формируемых поверхностей изделий.

Устраняют эффект налипания подогревом поверхности пригруза (тепловое поле заставляет жидкость двигаться «от теплого к холодному» и предотвращает налипание), введением в бетон или периодической обработкой поверхности пригруза гидрофобизирующими веществами (химдобавки соответствующей группы), снижением водосодержания бетона до значений, исключающих интенсивное проявление эффекта тиксотропии цементного теста.

Рекомендации по оптимизации составов бетона и режимам его формирования будут приведены позже, с учетом результатов всей совокупности исследований, включая данные, изложенные в последующих разделах работы.

### ***2.2.2. Влияние гранулометрии заполнителей***

На рис. 2.6 представлена закономерность изменения средней плотности свежееотформованного бетона, приготовленного на различных по крупности (модулю крупности,  $M_k$ ) заполнителях при постоянном номинальном расходе цемента ( $\Pi \sim 450$  кг на  $1 \text{ м}^3$  бетона) и неизменной формуемости смеси, оцениваемой показателем жесткости в 15–20 с и 35–40 с. В табл. 2.9 приведены расчетные значения модуля крупности смесей песка и щебня. Модуль крупности

рассчитывали по стандартной методике (без учета фракции менее 0,14 мм) до величины  $M_k \sim 2,7$  (Заславльский карьер, № 1 по табл. 2.9), а для значений более  $M_k \sim 2,7$  – с учетом фракции щебня крупностью 5-10 мм при расходе: Щ  $\sim 400$  кг ( $M_k \sim 3,4$ ); 600 кг ( $M_k \sim 3,8$ ); 800 кг ( $M_k \sim 4,1$ ); 1000 кг ( $M_k \sim 4,3$ ) и 1200 кг ( $M_k \sim 4,6$ ) на 1 м<sup>3</sup> бетона.

Таблица 2.9

Зерновой состав смеси заполнителей и модуль крупности смеси

Расход щебня фр. 5-10 мм в кг	Частные остатки (%) на ситах с размером ячейки, мм:							$M_k$ доли ед.
	0,14	0,315	0,63	1,25	2,5	5	10	
0	18,0	37,4	12,6	18,6	12,4	-	-	2,7
400	13,9	28,5	9,7	14,4	9,6	22,9	-	3,4
600	12,1	25,1	8,5	12,5	8,3	32,8	-	3,8
800	10,5	21,7	7,3	10,8	7,2	41,8	-	4,1
1000	9,0	18,7	6,3	9,3	6,2	50,0	-	4,3
1200	7,6	15,9	5,4	7,9	5,3	57,5	-	4,6
400+600 фр. 10–20 мм	9,0	18,7	6,3	9,3	6,2	20,0	30,0	44,64

При этом для бетона со щебнем использовали песок Заславльский ( $M_k \sim 2,7$ ). Методика расчета общего модуля крупности смеси крупного и мелкого заполнителя соответствует стандартизированной, применяемой для оценки этой характеристики мелкого заполнителя (песка), с учетом фракций использованного крупного заполнителя. Графическая иллюстрация рис. 2.6 отражает изменения средней плотности свежееотформованного бетона из смесей на различных по крупности заполнителях (в привязке к общему модулю крупности) при соблюдении правила прочих равных условий. Верхний график относится к смесям жесткостью: Ж  $\sim 15$  с, нижний – Ж  $\sim 40$  с. Зона I отражает изменение средней плотности мелкозернистого цементно-песчаного бетона; зона II – то же для бетона со щебнем крупностью 5–10 мм.

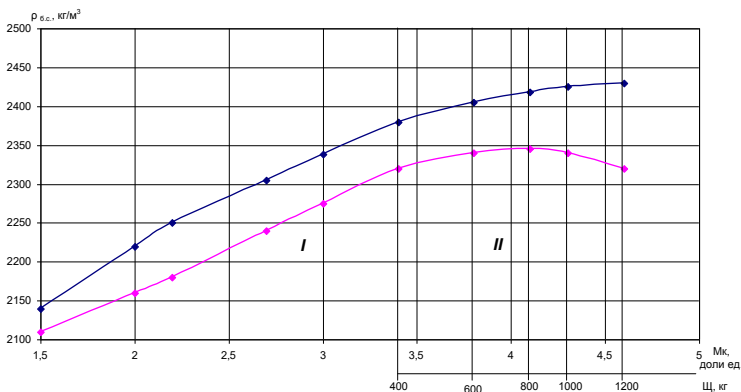


Рис. 2.6. Изменение средней плотности жесткой бетонной смеси в зависимости от модуля крупности заполнителя. Верхний график: Ж ~ 15 с; нижний: Ж ~ 40 с

Очевидна прямая зависимость роста средней плотности мелкозернистого бетона от крупности песка. Поскольку между средней плотностью и пористостью существует обратная связь, то изменение последней с достаточной для практического использования точностью можно оценивать и контролировать по легко определяемой величине средней плотности свежеотформованного бетона. Для такого контроля необходимо определить взаимосвязь и количественные соотношения между величинами: средняя плотность свежеотформованного бетона различных составов – водопоглощение затвердевшего бетона – морозостойкость бетона, что является одной из задач настоящих исследований. Их планируемый результат должен выразиться в рекомендациях по величинам контролируемой средней плотности свежеотформованного бетона, достаточным для обеспечения его эксплуатационных свойств, не ниже предъявляемых действующими стандартами ( $W_{\text{н}} \leq 5-6 \%$ ,  $F \geq 250$  циклов). Зависимость повышения средней плотности свежеотформованного бетона с крупным заполнителем от его расхода (и соответствующего изменения модуля крупности смеси заполнителей) не столь однозначна (см. рис. 2.6 и табл. 2.9).

Согласно полученным данным плотность укладки нарастает до дозировки щебня в (800–1000) кг на  $1 \text{ м}^3$  бетона ( $M_k \sim 4,1$ ) для смесей жесткостью в 15–20 с и до 600–800 кг при Ж ~ 40 с, а затем ста-

билизируется и снижается. Очевидно это связано с наличием «критической» толщины прослоек из растворной части смеси, обеспечивающей раздвижку и возможность взаимного перемещения зерен крупного заполнителя без образования жесткого пространственного «скелета» из них в процессе уплотнения. При этом в смеси меньшей жесткости эффект тиксотропии цементного теста проявляется в большей мере и в результате «критическая» толщина прослоек снижается, обеспечивая возможность введения в бетон большего количества крупного заполнителя.

Показателен результат, полученный на смеси (расчетный модуль крупности  $M_k \sim 4,64$ ) заполнителей: песок + щебень фракции 5–10 мм (400 кг) + щебень фракции 10–20 мм (600 кг), в сравнении, при прочих равных условиях, с расходом щебня фракции 5–10 мм в количестве 1000 кг. Средняя плотность бетона (жесткость 40 и 15 с) возросла с 2340–2420 кг/м<sup>3</sup> до 2400–2440 кг/м<sup>3</sup> соответственно, что свидетельствует о рациональности использования многофракционного заполнителя, в том числе и крупного.

### ***2.2.3. Влияние расхода цемента и пигментов***

В табл. 2.10 представлены экспериментальные данные, отражающие влияние содержания в бетонной смеси цемента (расхода) на среднюю плотность свежееотформованного бетона – мелкозернистого и с крупным заполнителем (щебень гранитный фр. 5–10 мм обычного дробления и кубовидный).

Для образцов мелкозернистого бетона содержание цемента изменяли: Ц = 450; 500 и 550 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона, при сохранении постоянным водоцементного отношения и условий формования образцов. Расход песка (заславльский, мытый) соответственно изменяли: П ~ 1690, 1600 и 1510 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона, сохраняя примерно неизменным объем выхода последнего.

При изготовлении образцов бетона со щебнем показатель жесткости бетонных смесей на обычном щебне был 20–25 с, а на кубовидном (при прочих равных условиях) примерно 15 с, что отражает положительное влияние на формуемость бетонной смеси формы зерен крупного заполнителя, близкой к кубообразной, и снижения количества лещадных зерен.



Таблица 2.10

Изменение средней плотности свежеотформованного бетона  
в зависимости от расхода цемента

Вид бетона	Состав бетона*, кг			Средняя плотность свежеотформованного бетона, кг/м <sup>3</sup>
	Цемент	Песок	Щебень	
Мелкозернистый	450	1690	–	2210
	500	1600	–	2250
	550	1510	–	2270
	500**	1600	–	2250
	500***	1600	–	2255
	500****	1600	–	2285
Со щебнем фр. 5–10 мм	400	1200	600	2350
	450	1150	600	2405
	500	1100	600	2420
	450**	1150	600	2400
	450***	1150	600	2410
	450****	1150	600	2430
С кубовидным щебнем	350	1250	600	2350
	400	1200	600	2400
	450	1150	600	2430

\* Номинальный (не приведен к фактической средней плотности свежеотформованного бетона).

\*\* Введено пигмента ( $Fe_2O_3$ ) 3 % от массы цемента.

\*\*\* То же – 5 % от МЦ.

\*\*\*\* Введено 0,5 % добавки пластификатора «Стахемент-Ф».

Данные, относящиеся к величине средней плотности мелкозернистого бетона, свидетельствуют, что рост расхода цемента сверх 500 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона не сопровождается существенным повышением плотности укладки твердой фазы при формировании. И это несмотря на то, что при постоянном исходном водосодержании в рассмотренных примерах с мелкозернистым бетоном показатель жесткости смеси изменялся от среднего значения в 20–25 с, возрастая со снижением расхода цемента до 30 с и уменьшаясь до 15–20 с при

повышении содержания цемента до 550 кг. То есть в последнем случае условия формования были более благоприятными.

Совершенно очевидно, что это связано с наличием «оптимального» объема цементного теста для конкретного зернового состава заполнителя, обеспечивающего такую «толщину» прослойки его между частицами заполнителя, которая позволяет последним взаимно перемещаться в процессе формования без механического контакта и «зацепления» поверхностями.

Ее «утонышение» сопровождается существенным ростом коэффициента трения при деформациях уплотняемой жесткой бетонной смеси, а «утолщение» незначительно снижает коэффициент трения. При этом одновременно увеличивается объем наиболее легкой (и пористой) составляющей бетонной смеси (бетона) – цементного теста (камня), и снижается средняя плотность бетона.

Данные, относящиеся к образцам бетона с крупным заполнителем, согласуются с общей тенденцией изменения плотности при формировании бетона в зависимости от содержания цемента (точнее, объема цементного теста), характерной для мелкозернистого бетона. Данные табл. 2.10 отражают как общую тенденцию взаимосвязи «расход цемента – средняя плотность бетона», так и то, что с превышением содержания цемента в мелкозернистом бетоне более 500 кг, в бетоне с обычным щебнем более 450 кг и с кубовидным щебнем более 400 кг, эффект «прироста» величин средней плотности свежетоформованного бетона снижается. Это означает, что прирост плотности укладки зерен твердой фазы при формировании бетона и снижение пористости материала (за счет повышения удобоукладываемости смеси вследствие увеличения раздвижки зерен заполнителя цементным тестом) начинает «компенсироваться» ростом общего объема пор бетона, за счет увеличения в нем объема цементного камня, то есть наиболее «легкой» и, отметим, пористой в затвердевшем бетоне составляющей.

Кроме того очевидна роль крупного заполнителя и, особенно, щебня кубовидной формы в повышении плотности бетона, что является базой роста его непроницаемости.

Введение в бетон пигмента (в частности,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) в количестве до 5 % от МЦ не вызвало изменений в качестве уплотнения бетона.

#### 2.2.4. Влияние водосодержания и химических добавок

Водоцементное отношение оказывает определяющее влияние на пористость цементного камня и бетона при вибропрессовании, если его величина не совпадает с оптимально-необходимым для проявления эффекта тиксотропии цементного теста и образования его слитной структуры (в затвердевшем бетоне – цементного камня) под воздействием вибрации и давления пригруза (пресса) в процессе формирования.

Область оптимальных значений водоцементного отношения бетона при вибропрессовании достаточно узка и соответствует содержанию воды, примерно равному сумме:  $B_{нз} + B_з$ , то есть «нормальной густоте» или водопотребности цемента и водопоглощению (в основном адсорбционному) применяемых заполнителей плотных горных пород. Применение химических добавок (в частности, характеризующихся пластифицирующим эффектом), способных частично блокировать потенциал поверхности твердой фазы, понижает уровень оптимального водоцементного отношения. Этот же эффект достигается с повышением интенсивности вибрационного воздействия при уплотнении бетона, которая характеризуется выражением

$$I = A^2 \cdot f^3, \text{ см}^2/\text{с}^3,$$

где  $A$  – амплитуда колебаний, см;  $f$  – частота, Гц (кол/с).

Например, для стандартных параметров, т.е. при  $A = 0,5$  мм = 0,05 см и  $f = 50$  Гц,  $I \sim 312,5$  см<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>.

В случае:  $A = 0,3$  мм = 0,03 см и  $f = 100$  Гц,  $I \sim 900$  см<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>, то есть в последнем случае интенсивность вибровоздействия на уплотняемый бетон примерно в 3 раза выше, чем это имеет место при стандартных параметрах вибрирования. Отметим большую эффективность вибровоздействия с ростом частоты колебаний, в сравнении с амплитудой, что особенно важно при уплотнении жестких бетонных смесей.

Снижение водоцементного отношения относительно оптимального значения, которое не сопровождается соответствующим ростом интенсивности вибровоздействия и его продолжительности, приводит к повышению пористости цементного камня и бетона. В этом случае возрастает показатель жесткости бетонной смеси, что не учитывается соответствующими (адекватными) изменениями

режима формирования. Физическая суть явления роста пористости бетона заключается в том, что в жестких бетонных смесях с понижением водосодержания бетона ниже некоторого критического уровня вся жидкость находится в физически связанном состоянии за счет потенциала поверхности твердой фазы и прочно удерживается ей в процессе формирования. В результате эффект тиксотропии проявляется ограничено и «слипная» структура цементного теста образуется только в зонах контакта сольватных оболочек жидкой фазы, адсорбированной зернами (флоккулами) цемента. Межзерновое пространство «мицелл» (в физической и коллоидной химии сочетание: твердофазная частица (ядро) и сольватная оболочка жидкости вокруг нее, носит название – мицелла) остается заполненным заземленным воздухом и, по сути, представляет собой будущий объем пор цементного камня, который (особенно при воздушно-сухих условиях твердения) будет увеличиваться в процессе твердения. В результате формируется структура затвердевшего цементного камня, в которой образующиеся вокруг остаточных цементных «ядер» реакционные каемки из продуктов его гидратации не развиты и контактируют между собой в зонах ограниченной площади. Как следствие, такая структура характеризуется наличием развитой капиллярной сообщающейся пористости, значительным водопоглощением и высокой проницаемостью. Такой бетон (из-за малых толщин сольватных оболочек воды на зернах (флоккулах) цемента и ускоренного заполнения ограниченного объема жидкости продуктами его гидратации (образующимися кристаллогидратами) достаточно быстро набирает прочность в начальные 24–48 ч твердения, после чего ее рост замедляется, а то и прекращается (при твердении в воздушно-сухих условиях) вовсе, зачастую не достигая уровня проектной прочности.

Если оценить с изложенной позиции величины минимально необходимого водосодержания (или водоцементного отношения бетона), то его значение для экспериментов, результаты которых приведены в табл. 2.10, должны быть следующими. Например, мелкозернистый бетон при  $\Pi \sim 500 \text{ кг/м}^3$  ( $K_{\text{нр}} = 0,26$ ) и расхода песка Заславльского (поз. № 1, см. табл. 2.5) –  $\Pi \sim 1600 \text{ кг/м}^3$ :

$$B/\Omega = K_{\text{нр}} + B_3 \sim K_{\text{нр}} + \frac{B_{\text{ад}} \cdot \Pi}{\Omega}, \text{ доли ед.}, \quad (2.8)$$

или

$$B/\Omega = 0,26 + \frac{25,8 \cdot 1,6}{500} \sim 0,34, \text{ доли ед.}, \quad (2.9)$$

что и соответствовало фактическому водоцементному отношению бетонной смеси при показателе жесткости  $J \sim 20$  с.

*Химические добавки*, содержащие в своем составе поверхностно-активные вещества (ПАВ), способны существенно повлиять на качество уплотнения жестких бетонных смесей и обеспечить рост плотности и непроницаемости вибропрессованного бетона [1, 26, 52, 100, 110].

По определению и состоянию водных растворов химических веществ, относящихся к «поверхностно-активным» [111, 112], концентрация молекул ПАВ всегда выше у поверхности раздела фаз: «жидкость – твердое тело» или «жидкость – газообразная среда», чем в объеме раствора. В системе «цемент-вода», то есть в цементном тесте, поверхность раздела твердой и жидкой фаз «проходит» по поверхности зерен (флоккул) вяжущего, обладающей огромным избыточным потенциалом, который стремится к самоликвидации при контакте с водой в форме образующейся вокруг частиц солевой водной оболочки некоторой толщины.

Как известно, потенциал поверхности распределен не равномерно и обладает явно выраженными участками его превышения - «активными центрами» поверхности. Для частиц измельченного клинкера это могут быть как проявления особенностей (выступы, разломы) поверхности, так и «выходы» на поверхность молекул наиболее активного клинкерного минерала – трехкальциевого алюмината или  $C_3A$ . Благодаря повышенному энергетическому потенциалу активные центры в первую очередь гидратируются, т. е. взаимодействуют с водой в обычных условиях, а при наличии в ней ПАВ именно к ним перемещаются его молекулы и в первую очередь адсорбируются у этих участков поверхности зерен цемента.

На начальном этапе результатом адсорбции крупных молекул ПАВ является частичная блокировка электростатического потенциала поверхности, вследствие которой уменьшается толщина слоя

жидкой фазы, удерживаемого частицами (флоккулами) вяжущих в отсутствие ПАВ. То есть значительная часть воды перейдет из связанного в свободное состояние, что и обуславливает первоначально эффект пластификации. При этом, чем значительнее уровень блокировки электростатического потенциала поверхности (либо за счет активности молекул ПАВ (качества добавки), либо за счет их количества (величины дозировки)), тем значительнее эффект пластификации. Одновременно проявляется побочный отрицательный эффект присутствия в системе «цемент-вода» молекул ПАВ, заключающийся в препятствии доступу молекул воды к поверхности цемента и соответствующем «торможении» процесса гидратации вяжущего и последующего твердения (т.е. роста прочности бетона). Особенно это характерно для рядовых пластификаторов, например ЛСТ, ЩСПК, мылонафта, ГКЖ и др. Поэтому для каждой пластифицирующей добавки существует вполне определенная область ее рационального дозирования [113], по существу учитывающая обе означенные стороны эффекта адсорбции молекул ПАВ на поверхности вяжущего.

Особенности изготовления изделий из вибропрессованного бетона является необходимость немедленной, в основном частичной (на поддон), а иногда полной распалубки их после формования. Поэтому эффект, обеспечиваемый пластифицирующими добавками, используется, во-первых, частично, а во-вторых, двояко. Частично потому, что необходимо обеспечивать сохранение формы свежизготовленных изделий и использование эффекта пластификации добавок ниже, чем у пластичных смесей. Дополнительный эффект добавок, который не используется при формовании пластичных бетонов, заключается в том, что ПАВ понижают адгезию свежееотформованного бетона к поверхностям формирующих устройств. Сущность этого явления заключается в следующем.

При формовании изделий вибропрессованием из жесткой бетонной смеси вибровоздействие передается бетону от днищ и стенок формирующих устройств. В зоне контакта бетона с поверхностями матрицы, пригруза и поддона создаются наиболее благоприятные условия для проявления эффекта тиксотропного разжижения «пристенного» слоя цементного теста. В соответствии с присущими им свойствами молекулы ПАВ добавок концентрируются у поверхности раздела фаз, то есть, у поверхностей формирующего устройства,

контактирующего с уплотняемой смесью через прослойку (пленку) «освободившейся» под воздействием вибрации воды. Повышенная концентрация молекул ПАВ (в том числе входящих в вещественный состав добавок, характеристики которых приведены в табл. 2.8) снижает силы адгезии тонких пленок жидкости к поверхностям формирующих устройств и сводит к минимуму или вовсе предотвращает налипание цементного теста (раствора) и отрыв его при подъеме пригруза и смещении матриц. При этом наибольшим эффектом «антиналипания» характеризуются добавки, содержащие ПАВ гидрофобной группы (первые три позиции табл. 2.8 и в меньшей степени СНВ и остальные).

Эффективность пластифицирующих добавок с позиций повышения плотности вибропрессованного бетона подтверждают данные табл. 2.10 о росте плотности свежееотформованного бетона с 0,5 % «Стахемент- $F$ » от массы цемента (данные с 4-мя звездочками). Так, для мелкозернистого бетона средняя плотность повысилась с 2250 кг/м<sup>3</sup> до 2285 кг/м<sup>3</sup> (около 1,5 %) и для бетона с традиционным щебнем с 2405 до 2438 (около 1,0 %). Это при прочих равных условиях соответствует практически равнозначному снижению водопоглощения затвердевшего бетона, т. е. может обеспечить существенное повышение его эксплуатационных свойств.

### **2.3. Влияние свойств заполнителей на свойства бетона**

Влияние свойств заполнителей: песка различной крупности, щебня гранитного (традиционного) крупностью 5–10 мм и кубовидной формы (5–10 мм) на свойства бетона определяли по стандартизированным методикам на образцах-кубах размерами 70 x 70 x 70 мм. Все испытания выполнены на образцах (немедленная распалубка после формования), пропаренных по режиму: предварительная выдержка – 2 ч; подъем температуры до 50 °С – 2 ч; изотермическая выдержка – 6 ч при последующем остывании в закрытой камере. Начало всех испытаний – через 24 ч после формования образцов. Данный режим принят для ускорения процесса испытаний и исходя из принципа создания одинаковых условий твердения образцов бетона с целью установления относительного изменения его характеристик (прочности, водопоглощения, морозостойкости, истираемости), приняв за 100 % результаты испытаний об-

разцов мелкозернистого бетона, приготовленного на мытом Заславльском песке (№ 1 по табл. 2.5).

Во всех случаях для мелкозернистого бетона использован базовый состав цементно-песчаного бетона: расход цемента Ц = 500 кг, расход сухого песка П = 1600 кг, расход воды В  $\approx$  160-170 л, примерно соответствующий производственным составам, а для изготовления образцов бетона со щебнем использовали состав, характеризующийся расходом цемента 450 кг, щебня гранитного 600 кг, песка 1150 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона и воды 160–180 л, принятый как оптимальный (см. п. 2.2.2 и данные источника [110]).

Данные по определенным в исследованиях характеристикам бетона получены как средние значения с соблюдением правил обработки результатов испытаний, установленных в соответствующих стандартах.

Циклическое замораживание-оттаивание вели по 3-му методу ГОСТ 10060–95 как для дорожного бетона (образцы 70 x 70 x 70 мм). Замораживание (с охлаждением образцов до  $t = -(50-55) ^\circ\text{C}$ ), оттаивание (при  $18 \pm 2 ^\circ\text{C}$ ) осуществляли в емкостях с 5 % водным раствором NaCl.

Водопоглощение бетона определили по методике ГОСТ 12730.3 с начальным водонасыщением образцов и последующим высушиванием.

Прочность бетона на сжатие определили по ГОСТ 10180 (с учетом масштабного коэффициента – 0,85) в состоянии естественной влажности образцов и после насыщения их в растворе соли по методике ГОСТ 10060.0, т. е. за 96 ч с периодическим «погружением» образцов в жидкость. Данные по прочности насыщенных таким образом образцов являются контрольными в процессе слежения за изменениями этого показателя при последующих испытаниях.

Истираемость бетона определили по методике ГОСТ 13087 на кругу истирания ЛКИ-3 в состоянии естественной влажности образцов.

### ***2.3.1. Прочность и истираемость бетона***

В табл. 2.11 приведены экспериментальные данные сравнительных испытаний изменения прочности и истираемости бетона в относительных величинах (в процентах), в зависимости от вида и качества примененного песка и щебня. За 100 % приняты данные, полученные на образцах мелкозернистого бетона на мытом Заславльском песке (поз. № 1).



Очевидно, что чем мельче использованный песок, тем хуже показатели бетона по прочности и истираемости. Так, прочность бетона для позиций № 2, 3 и 4 снижается соответственно на 5–15 %, а его истираемость растет на 5–55 %. Если оценивать эти изменения с учетом того, что в экспериментах модуль крупности песка уменьшился с  $M_k \sim 2,67$  (Заславльский) до 1,55 (речной), т. е. на  $\sim 1,1$  доли ед., то на каждую 0,1 доли единицы снижения модуля крупности песка приходится, примерно, 1,36 % снижения прочности и 5 % роста истираемости бетона, т.е. снижения его износоустойчивости.

Таблица 2.11

Относительная прочность и истираемость образцов бетона

Вид песка	$M_k$ , доли ед.	Вид щебня		Прочность бетона, %	Истираемость бетона, %
		Обычный	Кубовидный		
1 Заславльский (мытый)	2,67	–	–	100*	100**
2 То же (без промывки)	2,69	–	–	95	105
3 Крапужино	2,2	–	–	91	120
4 Речной	1,55	–	–	85	155
5 Заславльский (мытый) + щебень	3,8	+	–	120	80
6 То же	3,8	–	+	133	75

\* Прочность бетона – 45 МПа.

\*\* Истираемость бетона – 0,41 г/см<sup>2</sup>.

Введение в бетон крупного заполнителя сопровождается ростом прочности на 20–33 % и снижением истираемости бетона на 20–25 % (последние значения для кубовидного щебня).

### **2.3.2. Водопоглощение и морозостойкость бетона**

В табл. 2.12 приведены данные результатов сравнительных испытаний образцов бетона на морозостойкость и определения его водопоглощения по массе. Анализируя их по аналогии с ранее из-

ложенным в п. 2.3.1 приходим к выводу, что может быть установлена относительная количественная взаимосвязь между снижением крупности песка (соответственно ростом его водопотребности, ростом площади контакта с цементным камнем, ухудшением формуемости смеси при равенстве начального водосодержания, что в целом приводит к росту пористости и проницаемости бетона) с повышением величины водопоглощения бетона и снижением его морозостойкости.

Таблица 2.12

Изменение водопоглощения и морозостойкости бетона

№ п/п	Вид песка	M <sub>к</sub> , доли ед.	Вид щебня		Водопоглощение (относительное), %	Морозостойкость (относительная), %
			обычный	кубовидный		
1	2	3	4	5	6	7
1	Заславльский (мытый)	2,67	–	–	100*	100**
2	То же (без промывки)	2,69	–	–	112	85***
3	Крапужино	2,2	–	–	120	80
4	Речной	1,55	–	–	133	62
5	Заславльский (мытый) + щебень	3,8	+	–	78	120 (эксперимент прекращен)
6	То же	3,8	–	–	70	То же

\* Водопоглощение по массе  $W_m = 4,0 \%$ .

\*\* Морозостойкость после 28 циклов (F 250) – эксперимент прекращен.

\*\*\* Снижение прочности более 5 % после 23 циклов.

Так, основываясь на данных табл. 2.12, можно сделать вывод, что снижение модуля крупности песка на 1,1 доли ед. сопровождается ростом водопоглощения по массе мелкозернистого бетона на 34 % и примерно соответствует его удельному росту в 3 % на каждую 0,1 доли ед.

Рост водопоглощения, отражая увеличение объема капиллярной (сообщающейся) пористости бетона, согласуется с данными о сни-

жении его морозостойкости. Примерное «удельное» снижение морозостойкости с изменением крупности песка составило порядка 3,5 % на каждые 0,1 доли ед. уменьшения модуля крупности песка.

Отсутствие промывки песка Заславльского (наличие дополнительно 2 % пыли (№ 2, см. табл. 2.12)) привело к росту водопоглощения бетона на 12 % и отразилось в снижении морозостойкости бетона на 15 %.

Введение в бетон щебня гранитного (отметим, что расход цемента на 50 кг меньше, чем для мелкозернистого бетона) способствовало снижению водопоглощения на 20–30 % и обеспечило существенный рост морозостойкости, в сравнении с образцами мелкозернистого бетона. Это связано с его возросшей плотностью (непроницаемостью) и прочностью (т.е. с повышением способности сопротивляться «деформативно-механическим» воздействиям при циклических испытаниях).

#### **2.4. Влияние пигментов на свойства бетона**

Информация о влиянии пигментов неорганического происхождения, используемых для окрашивания бетона при производстве элементов благоустройства, на его эксплуатационные характеристики в основном сводится к тому, что введение пигментов в количестве более 5 % от массы цемента не рекомендуется (для пигментов органической группы (в исследованиях не рассматриваются) дозировка по СТБ 1071 ограничивается 0,5 % от массы цемента). При этом рекомендации сводятся к применению их с позиций качества окрашивания бетона в различные цвета, интенсивности окрашивания и сохранению приданной окраски. Современные красители (пигменты) импортируются в Беларусь. Наиболее основательно на рынке представлены германские фирмы. В настоящих исследованиях использовали пигменты «Colorox», представляющие совокупность наиболее часто применяемого цветового спектра: красный, желтый, коричневый, черный, фиолетовый, базовым веществом которых является окись трехвалентного железа ( $Fe_2O_3$ ), и зеленый (базовое вещество – окись хрома,  $Cr_2O_3$ ). Их основные характеристики приведены в табл. 2.7. Задачей исследований было выявление возможного влияния пигментов в дозировке 0–5 % от МЦ на основные свойства цемента, а также прочность, водопоглощение, морозостойкость и истираемость бетона. Во всех экспериментах, результаты которых представлены далее, пигменты дозиро-

вали в количестве: 0 (контрольные образцы), 2, 4 и 5 % от массы цемента. Для определения прочности, водопоглощения, морозостойкости и истираемости пигментированного мелкозернистого (песок поз. № 1, см. табл. 2.5; Ц ~ 500 кг) бетона использовали образцы размерами 70 x 70 x 70 мм, изготовленные и испытанные по стандартным методикам.

### 2.4.1. Свойства пигментированного цемента

В таблице 2.13 приведены основные физико-технические характеристики использованного в экспериментах цемента (см. табл. 2.3) и их изменение с введением ряда пигментов (см. табл. 2.7) в дозировке до 5 % от МЦ. При выборе пигментов исходили из того обстоятельства, что пигменты № 1–5 по табл. 2.7 имеют одно и то же базовое вещество ( $Fe_2O_3$ ) и сопоставимы по влиянию на свойства цемента. Зеленый пигмент основывается на другом веществе ( $Cr_2O_3$ ) и следовало установить его влияние на свойства цемента.

Таблица 2.13

Свойства пигментированного цемента

Пигмент (вид и количество, % от МЦ)	Коэффициент нормальной густоты $K_{нг}$ , доли ед.	Равномерность изменения объема	Прочность (МПа) цементного камня (тесто нормальной густоты; образцы 20 x 20 x 20 мм) через 24 ч от изготовления с пропариванием (по режиму: 2+3+6+13 ч)
–	0,260	Равномерное	72
Красный ( $Fe_2O_3$ )			
2 %	0,260	Равномерное	71
3 %	0,260		71
4 %	0,262		68
5 %	0,265		63
Зеленый ( $Cr_2O_3$ )			
2 %	0,260	Равномерное	71,5
3 %	0,262		70
4 %	0,263		67
5 %	0,266		64

Из приведенных в табл. 2.13 данных следует, что введение пигментов исследуемой группы не оказывает существенного влияния на водопотребность цемента (рост при 5%-й дозировке пигментов от МЦ составил примерно 2 %) и не вызывает изменений равномерности объема.

Прочность пигментированного цементного камня изменяется в большей степени: при 5%-й дозировке в экспериментах снизилась примерно до 12,5 %. При этом снижение прочности, которое целесообразно учитывать, соответствует дозировке в 4 % от МЦ (составило 5–7 %).

#### **2.4.2. Свойства пигментированного бетона: прочность, водопоглощение, морозостойкость, истираемость**

В табл. 2.14 соответственно представлены результаты испытаний пигментированного бетона на прочность (на сжатие), водопоглощение, морозостойкость и истираемость. Из полученных данных с указанными дозировками пигмента следует, что прочность бетона не снизилась с введением пигментов: красного и желтого – до 5 % от МЦ; зеленого – до 4 % от МЦ; коричневого и черного – до 2 % от МЦ.

Таблица 2.14

Свойства пигментированного бетона

Пигмент:		Относительная величина: прочности, % (МПа)	Водопоглощения по массе, % (%)	Морозостойкости, %	Истираемости, % (см <sup>2</sup> /г)
Цвет	Дозировка, % от МЦ				
–	–	100(52)	100(4,4)	100	100(0,45)
Красный (сурик железный)	2	103	100	100	100
	4	103	102	98	–
	5	100	104	96	100
Желтый (железо-окисный)	2	102	100	100	100
	4	102	102	96	–
	5	100	104	93	100

Окончание табл. 2.14

Коричневый	2	100	102	96	100
	4	97	104	93	–
	5	94	108	85	89
Черный (углерод тех- нический)	2	100	102	95	100
	4	97	105	90	–
	5	97	107,5	80	93
Зеленый (окись хрома)	2	103	100	100	100
	4	100	103	98	–
	5	98	106	95	100

Водопоглощение бетона имеет тенденцию к росту с введением пигментов более 2 % от МЦ, особенно для коричневого и черного красителей. Его рост отразился в снижении морозостойкости образцов бетона при 4–5 % дозировке всех пигментов и, особенно, с черным и коричневым красителями.

Истираемость бетона практически не увеличилась с введением пигментов, кроме образцов бетона при 5%-й дозировке коричневого и черного красителей.

## 2.5. Влияние химических добавок на свойства бетона

При использовании химических добавок в бетон для изготовления элементов благоустройства кроме задач качественного формирования изделий преследуется цель снижения водопоглощения и повышения (обеспечения) требуемой морозостойкости бетона. Традиционно считается, что решению последних задач способствует введение в бетон добавок, обладающих эффектами гидрофобизации, пластификации и вовлечения воздуха в объем бетона в виде замкнутых сфер, создающих некоторый «буферный» объем замкнутой пористости. На данном этапе исследований были выполнены эксперименты по оценке влияния химических добавок в бетон, широко применяемых в производстве изделий благоустройства, характеристики которых приведены в табл. 2.8. Дозировки добавок в бетон (мелкозернистый) приняты в соответствии с рекомендациями сопровождающей технологи-

ческой документации от производителей, как рациональные для каждой из них.

Результаты экспериментов по выявлению влияния добавок на свойства цемента и бетона представлены в табл. 2.15 и 2.16.

### 2.5.1. Свойства цемента с добавками

В табл. 2.15 приведены экспериментальные данные об изменении водопотребности цемента и прочности цементного камня (тесто нормальной густоты; образцы 20 x 20 x 20 мм) после пропаривания (режим по п. 2.4.1), из которых следует, что все исследованные добавки обладают пластифицирующим эффектом, способствующим понижению водопотребности цемента при консистенции цементного теста нормальной густоты. Это снижение составило для ЩСПК примерно 3,8 % и для Стахемент-*F* – 10 %, при «расположении» эффекта остальных добавок в пределах этих значений. Отметим, что этот результат соответствует приведенной в табл. 2.15 дозировке добавок от массы цемента.

Таблица 2.15

Свойства цемента с добавками

Добавка:		К <sub>нг.</sub> доли ед.	Относительная прочность на сжатие, % (МПа):
Вид	Дозировка, % от МЦ		
–	–	0,26	100 (72)
Plastolith-A	0,025	0,238	88
Вибропор Ж35	0,075	0,265	85
Софлексил 60-80	0,1	0,244	77
Стахемент- <i>F</i>	0,5	0,236	108
СНВ	0,005	0,252	80
ЩСПК	0,3	0,25	83

При этом все отмеченные добавки, обладающие дополнительными эффектами (воздухововлечение, гидрофобизация, антиприлипание), способствовали снижению прочности цементного камня несмотря на эффект снижения его начального водосодержания. Наиболее значительно снижение прочности для добавок «Софлексил 60-80», «СНВ» и «ЩСПК».

### 2.5.2. Свойства бетона с добавками: прочность, водопоглощение, морозостойкость, истираемость

В табл. 2.16 приведены экспериментальные данные об изменении прочности, водопоглощения, морозостойкости и истираемости образцов мелкозернистого бетона с добавками по табл. 2.8. Из результатов экспериментов следует, что все исследованные добавки (за исключением суперпластификатора «Стахемент-Ф») способствовали снижению прочности бетона, относительно прочности контрольных образцов (примерно, на 15–28 %). Одновременно они обеспечили снижение водопоглощения образцов бетона на 15–16 %. Истираемость бетона повысилась (отметим, в соответствии со снижением его прочности) при введении добавок «Софексил 60-80» и «СНВ».

Таблица 2.16  
Характеристики бетона с добавками

Добавка:		Относительные величины характеристик бетона:			
Вид	Дозировка, % от МЦ	Прочность на сжатие, %, МПа	Водопоглощение по массе, % (%)	Морозостойкость, %, (цикл)	Истираемость, % (г/см <sup>2</sup> ) (28 циклов)
–	–	100 (52)	100 (4,4)	100 (28)	100 (0,45)
Plastolith-A	0,025	85	95	100*	100
Вибропор Ж35	0,075	79	93	95	100
Софексил 60-80	0,1	72	84	91	90
Стахемент-Ф	0,5	114	95	110*	116
СНВ	0,005	77	85	95	95
ЩСПК	0,3	85	89	95	95

\* Эксперимент прекращен.

Результаты определения морозостойкости свидетельствуют, что ряд добавок (Софексил 60-80; ЩСПК и СНВ), способствующих снижению прочности, в итоге не повысили, а снизили показатель «F». Причина в росте пористости бетона, что отразилось в



росте водопоглощения после 3-5 циклов замораживания-оттаивания, а также в снижении прочности бетона при их введении в состав, т. е. в снижении способности бетона сопротивляться механическим (деформационным) и иным (см. раздел 1) разрушающим факторам.

Необходимо отметить, что, несмотря на снижение водопоглощения бетона за счет введения в состав этих добавок, вещество которых способствует, с одной стороны, вовлечению воздуха (в виде замкнутых сфер, рассекающих (кроме прочего) каналы капиллярной пористости, снижающих величину капиллярного подсоса бетона и его водопоглощения), а с другой – гидрофобизации стенок капилляров (и др. дефектов структуры цементного камня и бетона в целом), их эффективность проявляется только на начальном этапе испытаний на морозостойкость (в виде сниженного водопоглощения (водосодержания) бетона) и, соответственно, при эксплуатации изделий.

По прошествии 5–6 циклов замораживания (при  $t \geq (-50) \text{ } ^\circ\text{C}$ ) и оттаивания (что соответствует более 75 циклам базовых испытаний бетонов дорожных покрытий) действие гидрофобизации фактически прекращается и в бетоне начинает «работать» весь физический (фактический) объем его пористости, включая и искусственно созданную пористость за счет воздухововлечения добавок.

В результате через  $n$ -ное количество испытательных (или эксплуатационных, естественных) циклов резко возрастает водопоглощение бетона, т.е. возрастает объем проникающей в его поры воды со всеми вытекающими деструктивными последствиями: возрастающим давлением при замерзании воды, ростом знакопеременных деформаций, накоплением усталостных явлений, нарастающим солевым воздействием и т.д. Бетон ускоренно разрушается, т.к. при введении указанных добавок его прочность существенно снижается (на 15–30 %, см. табл. 2.16), а значит, снижается и способность к сопротивлению физико-механическим деструктивным явлениям.

Очевидно, что безусловная эффективность воздухововлекающих, гидрофобизирующих добавок в тяжелых бетонах низких классов (прочностью менее 40 МПа, т. е. со структурой с достаточно высокой открытой пористостью, характеризующейся водопоглощением бетона без добавок 5 % и более по массе) не подтверждается в бето-

нах более плотных и прочных. В последнем случае целесообразно использовать добавки (например, качественные пластификаторы) с целью повышения плотности (непроницаемости) и прочности бетона, что подтверждают экспериментальные данные табл. 2.16, относящиеся к введению в бетон (с понижением его водосодержания), например, суперпластификатора «Стахемент-F». Способствуя снижению водосодержания бетона при сохранении консистенции смеси, необходимой для качественного уплотнения, эти добавки обеспечивают рост плотности, непроницаемости и прочности бетона, т. е. все необходимые предпосылки для повышения его морозостойкости и долговечности.

### 3. ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ТВЕРДЕНИЯ И КАЧЕСТВА УПЛОТНЕНИЯ НА ПРОНИЦАЕМОСТЬ БЕТОНА

#### 3.1. Направления и общая методика исследований

В настоящих исследованиях использовали цементно-песчаный бетон и бетон со щебнем гранитным при водоцементном отношении В/Ц  $\sim 0,33-0,36$  и  $0,36-0,400$  соответственно при показателе жесткости  $J \sim 15-25$  с. Образцы бетона уплотняли на виброплощадке со стандартными параметрами ( $A = 0,5$  мм;  $f \approx 50$  Гц) в течение времени и под пригрузом, обеспечивающим получение расчетного качества (степени) его уплотнения, которую оценивали по средней плотности свежеотформованного бетона.

*Качество (степень) уплотнения*, как технологический фактор, влияющий на проницаемость бетона и другие его физико-технические свойства, исследовали варьируя среднюю плотность бетона за счет изменения эффективности уплотнения при формовании образцов.

*Фактор времени твердения бетона* и его роль в изменении проницаемости оценивали, отслеживая кинетику изменения водопоглощения, используя стандартную методику и водонасыщение под вакуумом бетона в возрасте 3, 7, 14, 28 и 90 сут твердения.

Периодичность испытаний, начиная с 3 сут твердения образцов бетона без пропаривания, обусловлена фактическими режимами твердения изделий – элементов благоустройства на предприятиях отрасли, изготавливающих вибропрессованные изделия, и тем обстоятельством, что при классе С20/25 проектная прочность бетона (при обеспеченности 0,95 и коэффициенте вариации  $V_m = 0,135$ ) составляет 32 МПа, а отпускная 90%-я прочность бетона:  $0,9 \cdot 32 \approx 29$  МПа, и достигается, как правило, к исходу 3 суток. В летний период по истечении этого времени продукция вполне может быть отпущена потребителю.

Периодичность испытаний пропаренных (режим: предварительная выдержка – 2 ч; подъем температуры в лабораторной ямной камере до  $50$  °С – 2 ч; изотермическая выдержка и при  $t_n = 50$  °С – 6,5 ч; остывание образцов бетона вместе с камерой – 6–10 ч) образцов была принята, включая немедленные после распалубки испытания

(практически, не позднее 24 ч после их изготовления), а также через 28 сут. Низкотемпературный прогрев бетона принят исходя из соображений обеспечения роста плотности и прочности бетона в дальнейшем, что и подтверждается данными наших исследований. Повышение температуры изотермического прогрева сверх 50 °С обеспечивает рост прочности бетона сразу после пропаривания, но замедляет его при последующем твердении. В случае использования цемента 1-й группы эффективности при пропаривании прогрев при  $t > 70$  °С может приостановить процесс последующего набора прочности бетоном полностью. Это явление обусловлено тем, что при высокой температуре вокруг цементных «ядер» (по Юнгу-Ахвердову) достаточно быстро формируется плотная и непроницаемая для воды «каемка» новообразований, способная остановить реакции гидратации цемента. Вместе с тем ее объем, т.е. объем новообразований, возникших в процессе реакций гидратации, недостаточен для создания слитной и плотной структуры цементного камня в бетоне. Как следствие, увеличивается его капиллярная пористость, растет проницаемость и, соответственно, снижаются эксплуатационные характеристики бетона.

*Влияние условий твердения бетона* на его проницаемость и другие физико-технические свойства оценивали, моделируя условия нормально-влажностного твердения (относительная влажность среды  $\varphi \geq 90$  %, температура –  $t \sim 20 \pm 5$  °С); воздушно-сухие ( $\varphi \approx 65\text{--}70$  %;  $t \sim 18\text{--}22$  °С), при хранении образцов открытыми в помещении лаборатории; естественные, при которых образцы помещали в полиэтиленовый мешок и хранили в помещении лаборатории; пропаривание (с укрытием поверхности образцов с целью исключения попадания конденсата в бетон) по ранее приведенному режиму, затем до 28 сут образцы твердели в камере с нормально-влажностным режимом.

*Фактор качества заполнителя* и его влияние на проницаемость и другие физико-технические свойства бетона оценивали по сравнительным характеристикам пропаренных образцов, изготовленных с использованием песка природного (без промывки) крапужинского карьера, с физическими характеристиками по табл. 2.5. Использованный крапужинский песок по значению модуля крупности отвечает нижнему допускаемому значению, т. е.  $M_n \geq 2,2$ , по ГОСТ 1071–97 (изменения № 2).

### *Общая методика исследований.*

Учитывая, что в процессе исследований идет накопление эмпирического материала для выработки общих рекомендаций, важно отследить возможные изменения их свойств не только во времени, но и в сравнении влияния одних и тех же факторов на мелкозернистый бетон и бетон с крупным заполнителем.

Как это следует из анализа литературных данных, а также накопленного опыта испытаний образцов бетона, натуральных испытаний и обследований изделий-элементов благоустройства, существует непосредственная связь между эксплуатационной надежностью и долговечностью бетона (способностью без нарушения переносить продолжительное комплексное физико-химическое воздействие) и его проницаемостью. Последняя характеризуется наличием и объемом открытой капиллярной пористости и может быть количественно оценена величиной водопоглощения бетона (особенно при насыщении его под вакуумом). Качественная оценка диффузионной способности открытой капиллярной пористости может быть получена по фильтрационной проницаемости бетона, то есть по величинам коэффициента фильтрации и водонепроницаемости. В совокупности эти характеристики дают возможность оценить бетон с позиций количества поглощаемой им воды (а значит и последующего воздействия на бетон при замораживании-оттаивании) и диффузии растворов солей в его «поровом пространстве», вызывающих «солевую коррозию» и усиливающих деструктивное воздействие мороза.

На начальном этапе экспериментов исследовали кинетику водопоглощения бетона в зависимости от изменения технологических факторов, затем для основных значений последних определяли водонепроницаемость и коэффициент фильтрации бетона. Параллельно отслеживали изменения кинетики роста прочности бетона в состоянии естественной влажности для различных условий твердения и в водонасыщенном состоянии разной степени.

Водопоглощение и прочность на сжатие на образцах размерами 70 x 70 x 70 мм; водонепроницаемость – на образцах-цилиндрах диаметром и высотой в 150 мм: коэффициент фильтрации – на образцах в виде усеченного конуса с размером меньшего (расчетного) диаметра 70 мм и высотой (толщиной слоя бетона) 50 мм. Во всех случаях при изготовлении образцов бетона для испытаний смесь

уплотняли с пригрузом до получения расчетной средней плотности свежеотформованного бетона. «Внутри» серии образцов ее отличие составляло не более  $20 \text{ кг/м}^3$  между меньшим и большим значениями.

Во всех случаях, кроме отдельно оговоренных в соответствующих разделах, для мелкозернистого бетона использован «базовый» состав цементно-песчаного бетона: расход цемента  $C = 500 \text{ кг}$ , расход сухого песка  $П = 1600 \text{ кг}$ , расход воды  $В \approx 160\text{--}170 \text{ л}$  при  $В/Ц \approx 0,33\text{--}0,34$ , показателе жесткости смеси :  $Ж \approx 20\text{--}30 \text{ с}$ , примерно соответствующий традиционным производственным составам цементно-песчаного бетона, а для изготовления образцов бетона со щебнем использовали составы характеризующиеся расходом цемента  $350\text{--}500 \text{ кг}$ , щебня гранитного  $400\text{--}800 \text{ кг}$ , песка крапужинского карьера  $900\text{--}1400 \text{ кг}$  на  $1 \text{ м}^3$  бетона и воды  $160\text{--}180 \text{ л}$  при водоцементном отношении  $0,36\text{--}0,4$  и показателе жесткости смеси  $15\text{--}25 \text{ с}$ . Изменения состава, связанные с изменением содержания цемента в бетоне, приведены в соответствующих разделах.

Данные по определенным в исследованиях характеристикам бетона получены как средние значения (при количестве образцов в серии  $6\text{--}12$  шт. и более) с соблюдением правил обработки результатов испытаний, установленных в соответствующих стандартах. Особенности методик проведения отдельных экспериментов приведены в соответствующих разделах.

### 3.2. Кинетика водопоглощения бетона

Исследование изменений в водопоглощении бетона под влиянием различных технологических факторов осуществляли с использованием основных положений ГОСТ 12730.3. и нестандартной методики водонасыщения под вакуумом со степенью разрежения, соответствующей  $P_{раз} \approx -0,095 \text{ МПа}$  (остаточное давление или «давление вакуумирования»)  $P_{вак} \approx 0,005 \text{ МПа}$ ).

Образцы бетона, твердевшие в различных условиях  $3, 7, 14, 28$  и  $90$  сут, помещали в воду и, в соответствии с положением ГОСТ 12730.3, определяли количество поглощенной за  $24 \text{ ч}$  воды. Затем ванну с водой и размещенными в ней образцами (уровень воды не доходил до верхней грани образцов на  $30\text{--}35 \text{ мм}$ ) помещали в вакуумный шкаф, в котором создавали разрежение, и выдерживали в

общей сложности еще 24 ч. После чего определяли как дополнительное количество поглощенной воды, так и общее водопоглощение бетона. Проверка на возможное «донасыщение» образцов 28 суточного возраста по стандартной методике после 24 ч водонасыщения их под вакуумом показала отсутствие прироста их массы. То есть, полученные при вакуумировании значения водопоглощения не ниже соответствующих истинному водопоглощению бетона, величина которого обусловлена объемом открытых (сообщающихся) пор.

### ***3.2.1. Влияние условия и времени твердения***

В таблице 3.1 приведены данные о количестве поглощаемой образцами мелкозернистого бетона и бетона со щебнем воды (за 24 ч и при последующем вакуумировании 24 ч) в возрасте 3, 7 и 14 сут в расчете на  $1 \text{ м}^3$ , а также о количестве воды, соответствующем понятию «постоянной массы», в 28 сут и о величине водопоглощения бетона по массе ( $W_m$ , %) в зависимости от времени и условий его твердения. При изготовлении образцов (70 x 70 x 70 мм) принят базовый состав мелкозернистого бетона: Ц = 500 кг; П = 1600 кг; В/Ц  $\approx 0,34$ ; степень уплотнения характеризуется средней плотностью свежееотформованного бетона  $\rho_{bc} \sim 2250 \text{ кг/м}^3$ ; базовый состав бетона с обычным щебнем: Ц = 450 кг; П = 1150 кг; Щ = 600 кг; В  $\sim 160\text{--}170$  л (при В/Ц  $\approx 0,36\text{--}0,38$ ); жесткость 15–20 с и средней плотностью свежееотформованного бетона  $\rho_{bc} \approx 2350 \text{ кг/м}^3$ .

По полученным в исследованиях и приведенным в табл. 3.1 данным требуемое по СТБ 1071–97 и СТБ 1097–98 для бортовых камней и тротуарных плит водопоглощение по массе в проектном 28-суточном возрасте (составляющее  $W_m \leq 6$  % для мелкозернистого, а для бетона с крупным заполнителем:  $W_m \leq 5$  %), обеспечивают нормально-влажностные условия твердения, пропаривание с дозреванием и естественное твердение в условиях влагоизоляции образцов бетона. К 90 суткам твердения в этих условиях водопоглощение по массе мелкозернистого бетона снижается до величин 2–3,6 %, а образцов, хранившихся в воздушно-сухих условиях, до 4–5 %.

Таблица 3.1

Зависимость количества поглощаемой воды и  $W_m$  от времени  
и условий твердения бетона

Условия твердения бетона	Условия водона- сыщения бетона	Количество поглощаемой 1 м <sup>3</sup> бетона воды (кг) в возрасте, сут				$W_m$ , %, в 28 сут	$W_m$ , %, в 90 сут
		3	7	14	28		
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>1. Мелкозернистый бетон</b>							
Нор- мально- влаж- ностные	ГОСТ	29	52	63	68	5,5	3,1
	После вакуум.	36	68	82	86	6,4	3,5
Воздуш- но-сухие	ГОСТ	38	66	70	91	6,8	4,2
	После вакуум.	47	80	96	108	8,7	5,0
Есте- ственные (под пленкой)	ГОСТ	25	44	56	60	4,9	2,0
	после вакуум.	31	56	64	75	5,5	2,4
После пропари- вания*	ГОСТ	76*	–	–	–	6,8	–
	после вакуум.	94*	–	–	–	8,8	–
Нор- мально- влаж- ностные после пропари- вания	ГОСТ	–	–	–	75	5,2	3,6
	после вакуум.	–	–	–	98	6,4	4,4



Окончание табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8
<b>2. Бетон со щебнем фр. 5-10 мм</b>							
Нормально-влажностные	ГОСТ	20	36	52	59	4,3	–
	после вакуум.	22	42	64	73	5,1	–
Воздушно-сухие	ГОСТ	29	46	65	76	5,2	–
	после вакуум.	35	57	80	91	6,5	–
Естественные (под пленкой)	ГОСТ	18	34	42	51	4,2	–
	после вакуум.	20	40	51	65	4,7	–
После пропаривания*	ГОСТ	40*	–	–	–	4,9	–
	после вакуум.	51*	–	–	–	5,4	–
Нормально-влажностные после пропаривания	ГОСТ	–	–	–	56	4,5	–
	после вакуум.	–	–	–	76	5,2	–
<b>3. Бетон** со щебнем кубовидной формы фр. 5-10 мм</b>							
Нормально-влажностные	ГОСТ	–	–	–	44	3,6	–
	после вакуум.	–	–	–	62	4,2	–
После пропаривания*	ГОСТ	36*	–	–	–	4,4	–
	после вакуум.	50*	–	–	–	5,0	–

\* Начало водонасыщения не позднее 24 ч от момента изготовления образцов.

\*\* Средняя плотность свежетоформованного бетона с кубовидным щебнем  $\rho_{бс} \approx 2400 \text{ кг/м}^3$  при расходе цемента 400 кг.

Водонасыщение под вакуумом, в отличие от стандартного метода, создает условия для заполнения капиллярных пор бетона, которые в обычных (стандартных) условиях водонасыщения не заполняются водой из-за противодействия заземленной газообразной фазы, что и отражается в росте количества «поглощаемой» жидкости и водопоглощения бетона.

Тенденция роста количества поглощаемой бетоном воды непосредственно связана с условиями его твердения. Так, условиям твердения, ограничивающим развитие процесса гидратации цемента и приводящим к испарению воды затворения, а в общем итоге к росту капиллярной пористости (а именно – воздушно-сухим), соответствует рост объема «поглощаемой» воды во все исследованные сроки твердения и водопоглощения бетона как в проектном, так и в более позднем возрасте; при этом в период активного твердения бетона (до 28 сут) возрастает как абсолютное, так и относительное ее количество. Например, для 3, 7, 14 и 28 сут воздушно-сухого твердения образцов мелкозернистого бетона количество «поглощаемой» воды составляет: 47; 80; 96 и 108 л на 1 м<sup>3</sup> и для бетона со щебнем: 35, 57, 80 и 91 л, что больше, чем при других исследованных условиях твердения. Это есть количественное отражение роста капиллярной пористости бетона, вызванного замедлением процесса гидратации цемента и снижением степени его гидратации. В это же время процесс водонасыщения образцов бетона одинакового состава и качества (степени) уплотнения, но твердевших в других, приведенных в таблице и более благоприятных условиях, характеризуется достаточно стабильным относительным приростом количества поглощаемой воды во все сроки твердения бетона, что отражает нормальное развитие гидратационного процесса и связанное с ним формирование структуры цементного камня и бетона более высокой плотности. Например, для 3, 7, 14 и 28 сут нормально-влажностных условий твердения для образцов мелкозернистого бетона относительное (%) соотношение:  $B_{\text{вак}}^{\text{ногл}} / B_{\text{ГОСТ}}^{\text{ногл}}$  будет: 124; 130; 130 и 126 %, т. е. практически стабильно весь этот период. Это факт подтверждается оценкой степени гидратации цемента ( $\alpha$ ) по количеству химически связанной воды в проектном возрасте образцов бетона, твердевших в различных условиях (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Количество химически связанной и испаряемой воды (свободной)  
в бетоне в расчете на 1 м<sup>3</sup>

Условия твердения бетона в течение 28 сут	Вид бетона (мелкозернистый и со щебнем)	Средняя плотность бетона при естественной влажности, кг/м <sup>3</sup>	Потери воды при 110 °С, кг	Средняя плотность бетона в сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>	Потери воды при прокаливании (600 °С), кг	Степень гидратации цемента $\alpha$ , %
1	2	3	4	5	6	7
Нормально-влажностные	мелк.	2245	85	2160	79,4	69,0
	со щебнем	2345	74	2271	68,8	66,5
Воздушно-сухие	мелк.	2220	69	2151	70,7	61,5
	со щебнем	2325	70	2246	58,0	56,0
Естественные (под пленкой)	мелк.	2240	80	2160	80,5	70,0
	со щебнем	2345	88	2257	67,2	65,0
После пропаривания*	мелк.*	2255	106	2143	63,3	55,0
	со щебнем*	2350	92	2246	58,1	56,2
Нормально-влажностные после пропаривания	мелк.	2245	99	2146	75,3	65,5
	со щебнем	2350	88	2254	64,2	62,0

\* Начало высушивания проб не позднее 24 ч от момента изготовления образцов.

В зависимости от условий их твердения степень гидратации цемента различна. Так, она составила для образцов бетона со щебнем и мелкозернистого бетона нормально-влажностного твердения, а также хранившихся в полиэтиленовой упаковке: 65–70 %; при воздушно-сухих условиях твердения: 55–61 %; сразу после пропаривания: 55 %, и для образцов, созревающих после пропаривания в нормально-влажностных условиях – до 65 %. Методика этих определений включала дробление до порошкообразного состояния продуктов разрушения бетона при испытании образцов на сжатие (путем выделения фракции размером менее 1,25 мм, доизмельчения ее истиранием), высушивание пробы до постоянной массы при 110 °С и прокаливание (6 ч) проб при температуре около 600 °С. Следует отметить, что бетон с крупным заполнителем характеризуется, при прочих равных условиях, несколько меньшей степенью гидратации цемента, чем мелкозернистый. Этот факт согласуется с известными данными о взаимосвязи степени гидратации цемента, снижающейся при росте плотности бетона. В нашем же случае бетон, содержащий щебень, отформован с более высокой степенью уплотнения, чем мелкозернистый, что отражает объем поглощаемой его образцами воды в процессе водонасыщения как по «ГОСТ», так и под вакуумом.

Кроме изложенного, данные таблицы 3.1 о тенденции изменений количества воды, поглощаемой бетоном в начальные сроки твердения в благоприятных условиях твердения, свидетельствуют о развитии реакции гидратации цемента и сопровождающего этот процесс явления «внутреннего вакуума» в твердеющем цементном камне (бетоне). При этом к 7 сут количество поглощаемой воды за равный период времени начинает снижаться, а к 14 сут твердения проявляется тенденция стабилизации процесса поглощения воды (прирост количества жидкости от 7 до 14 сут до 15 л/м<sup>3</sup>, а от 14 до 28 сут (при водонасыщении до «постоянной массы») до 9 л/м<sup>3</sup>).

Изложенное подтверждается также кинетикой снижения водопоглощения пропаренного бетона, определенного непосредственно после тепловой обработки и по «дозреванию» до возраста 28 сут. В среднем степень гидратации цемента после пропаривания составила около 55 %. В результате в процессе высушивания водонасыщенных после пропаривания образцов, одновременно с поглощен-

ной бетоном водой испаряется и часть воды затворения, близкая по количеству разнице между общим количеством воды затворения и химически связанной (ХСВ). Так, в экспериментах с образцами мелкозернистого бетона, при массе воды затворения приблизительно  $170 \text{ кг/м}^3$ , испарилось примерно  $70\text{--}100 \text{ кг}$  от этого количества, что и составило (например, с «поглощенными» за 24 ч и под вакуумом объемами жидкости в 76 и 94 л), величину водопоглощения бетона  $W_m \sim 7\text{--}9 \%$  (см. табл. 3.1).

К 28 суткам «дозревания» пропаренного бетона, которое способствует развитию гидратационного процесса, связыванию воды и снижению капиллярной пористости, водопоглощение образцов мелкозернистого бетона снизилось до  $5\text{--}6,4 \%$ , а бетона со щебнем – до  $4\text{--}5 \%$ , что взаимосвязано с ростом степени гидратации цемента примерно до  $65 \%$ ; к возрасту 90 сут «пропаренный» бетон характеризуется водопоглощением  $3,5\text{--}4,5 \%$ . В этой связи следует считать ошибочным положение действующего стандарта о введении оценки водопоглощения бетона свежестотформованных изделий в практику оперативного контроля его качества.

Выявленные зависимости количественной оценки процесса водонасыщения бетона мелкозернистого и с крупным заполнителем под влиянием условий твердения позволяют оценить общую тенденцию их изменений.

Так, практикуемые достаточно широко (что следует констатировать с сожалением) воздушно-сухие условия твердения бетона (которые ошибочно считают «естественными») изделий - элементов благоустройства по существу недопустимы для цементного бетона, так как приводят к росту его водопоглощения до значений, превышающих нормируемые. В соответствии с этим следует ожидать снижения эксплуатационных свойств бетона.

Нормальное развитие гидратационного процесса, обеспечиваемое при твердении бетона в условиях, предотвращающих испарение влаги или при пропаривании по «мягким» режимам, закономерно приводит к снижению количества поглощаемой бетоном воды и величины его водопоглощения.

По полученным данным интенсивность поглощения жидкости бетоном снижается к 7 сут естественного твердения и может быть связана с достижением им прочности на уровне  $\geq 70 \%$  от прочно-

сти проектного возраста. При этом количественная оценка водопоглощения в сочетании с величиной степени гидратации цемента позволяет получить информацию о содержании в бетоне «свободной» жидкости, которая является одним из основных факторов морозного разрушения бетона.

Некоторое превышение качественных характеристик бетона, твердевшего в естественных условиях «под пленкой» над образцами «нормально-влажностного твердения» связано со следующим. В лабораторной камере режим твердения характеризовался относительной влажностью  $\varphi \geq 90\%$  при температуре  $t \sim 15-20^\circ\text{C}$ . А замкнутый ограниченный объем полиэтиленовой упаковки, хранившейся в помещении лаборатории, обеспечил  $\varphi \geq 95\%$  при частичной аккумуляции теплоты экзотермии гидратирующегося цемента, что способствовало некоторому превышению температуры (особенно в первые 3 сут. твердения) среды твердения этих образцов, по сравнению со средой в камере. Необходимо подчеркнуть, что системное использование этого приема в производственных условиях («парникового» эффекта) может дать существенный экономический эффект в сочетании с благоприятным воздействием на качественные характеристики бетона.

Анализ результатов экспериментов по установлению закономерностей влияния условий и времени твердения бетона на количество (объем) поглощаемой им воды при водонасыщении свидетельствует о следующем. Активное развитие в первые 28 сут (особенно в начальные сроки твердения) процессов гидратации цемента, формирования и становления структуры (пористости) цементного камня способствует переходу значительной части воды затворения в химико-физически связанное состояние. Формирующиеся в результате взаимодействия клинкерных минералов с водой новообразования (в виде кристаллогидратов силикатов, алюминатов, ферритов) занимают несколько меньший объем, чем начальный суммарный объем системы: «цемент + вода + заземленный воздух». В результате одновременно с этим образуется пористость открытая, сообщающаяся (контракционная, капиллярная), способная заполниться водой, так как обладает определенным потенциалом «капиллярного подсоса» и гидрофильностью твердой фазы (стенок формирующихся капилляров). Этот

эффект усиливается в воздушно-сухих условиях твердения цементного камня и бетона в целом за счет, с одной стороны, испарения части воды затворения, а с другой – из-за торможения в силу этого реакций гидратации цемента (за 28 сут степень гидратации  $\alpha \sim 55\text{--}60\%$ , см. табл. 3.2). В результате возрастает открытая пористость, что отражается в росте количества поглощаемой бетоном воды и величине водопоглощения.

Очевидно, что наиболее интенсивно означенные процессы развиваются в первые 7 суток твердения бетона и в этот период бетон (как мелкозернистый, так и с крупным заполнителем) в наибольшем (относительно единицы времени) количестве поглощает воду. Следует отметить, что за 3 сут. твердения при температуре более  $15^\circ\text{C}$  вибропрессованный бетон достигает уровня прочности в 30 МПа (и более) и изделия зачастую поставляются потребителю.

По существу же к этому времени структура бетона находится в стадии активного формирования и не готова к восприятию эксплуатационных нагрузок от агрессивных сред. В частности, воздействия солей, минеральных масел, замораживания-оттаивания и пр.

Из приведенных данных о кинетике и количестве поглощаемой бетоном воды следует, что бетон, приготовленный с использованием крупного заполнителя – гранитного щебня, обладает более высоким качеством (степенью) уплотнения, меньшей по объему пористостью. Как следствие, образцы бетона со щебнем характеризуются меньшим количеством поглощаемой при водонасыщении жидкости и величиной водопоглощения, что является предпосылкой для повышения его эксплуатационных характеристик.

### ***3.2.2. Влияние качества уплотнения бетона***

В табл. 3.3 приведены данные о величине водопоглощения бетона по массе, определенного по ГОСТ 12730.3, в зависимости от качества (степени) его уплотнения и условий твердения образцов.

Их изготавливали из цементно-песчаной смеси базового состава (Ц = 500 кг; П = 1600 кг; В/Ц  $\sim 0,34$ ), при необходимости уплотняя ее послойно, изменяя время уплотнения и величину пригрузки для получения средней плотности свежееотформованного бетона, равной 2150; 2200; 2250 и 2300 кг/м<sup>3</sup>; а также из бетонной смеси с

обычным щебнем ( $\Pi \sim 450$  кг;  $\Pi = 1150$  кг;  $\Pi = 600$  кг;  $B/\Pi \sim 0,38$ ) фракции 5–10 мм и со щебнем кубовидной формы ( $\Pi \sim 400$  кг;  $\Pi = 1200$  кг;  $\Pi = 640$  кг;  $B/\Pi \sim 0,38$ ) этой же фракции при уплотнении до средней плотности 2300; 2350, 2400 и 2430 кг/м<sup>3</sup>. До начала водонасыщения образцы бетона 28 сут (кроме оценки водопоглощения после пропаривания) твердели в условиях по п. 3.1.

Очевидно, что снижение качества уплотнения бетона как мелкозернистого, так и содержащего крупный заполнитель при соответствующем росте его капиллярной пористости сопровождается повышением проницаемости, ростом количества поглощаемой им воды.

Следует отметить, что снижение средней плотности бетона на 50 кг/м<sup>3</sup> (например, от ее значения в 2250 кг/м<sup>3</sup>) сопровождается увеличением объема пор примерно на 2,0–2,5 % и, в соответствии с этим, примерно на 20–22 л увеличивается количество «поглощаемой» бетоном воды (при насыщении до постоянной массы) в пересчете на 1 м<sup>3</sup>.

Исходя из полученных данных, можно считать минимально необходимыми для обеспечения нормативных показателей бетона по водопоглощению в проектном возрасте значения его средней плотности при формовании (приготовленного на исследованных материалах), для мелкозернистого бетона примерно равными 2250 кг/м<sup>3</sup>; для бетона с обычным щебнем при благоприятных условиях твердения более 2300 кг/м<sup>3</sup>, а при пропаривании без дозревания и для воздушно-сухих условий твердения более 2400 кг/м<sup>3</sup>; для бетона на кубовидном щебне более 2350 кг/м<sup>3</sup>. Отметим, что в более поздние сроки твердения бетона его водопоглощение имеет общую тенденцию к снижению.

Очевидно, что область значений водопоглощения бетона, относящихся к бетону «нормального» твердения и «дозревавшему» после пропаривания, выражает общую тенденцию интенсивного и устойчивого снижения сообщаемой капиллярной пористости бетона, твердеющего в благоприятных условиях. Вместе с тем, даже в этом случае вызываемый недоуплотнением бетона на стадии формования изделий рост его пористости не может быть «перекрыт» в дальнейшем.



Таблица 3.3

Зависимость  $W_m$  от степени уплотнения, вида и условий  
твердения бетона

Условия твердения бетона	Водонасыщение бетона по массе, %, при средней плотности свежеотформованного бетона ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) из:									
	цементно-песчаной смеси				смеси с обычным щебнем			смеси с кубовидным щебнем		
	2150	2200	2250	2300	2300	2350	2400	2350	2400	2430
Нормально-влажностные	8,0	6,6	5,5	4,6	4,5	4,2	3,8	3,8	3,3	2,8
Воздушно-сухие	9,4	8,2	6,8	6,0	5,6	5,2	4,7	–	–	–
Естественные (под пленкой)	7,8	6,4	4,9	4,4	4,3	4,2	3,6	–	–	–
После пропаривания*	9,9*	8,7*	6,8*	6,4*	5,9*	5,4*	4,9*	5,0*	4,4*	4,0*
Нормально-влажностные после пропаривания	8,0	6,8	5,2	4,8	4,6	4,5	4,2	–	–	–

\* Начало водонасыщения — не позднее 24 ч от момента изготовления образцов.

### 3.3. Влияние условий твердения на проницаемость бетона

#### 3.3.1. Водонепроницаемость бетона

Испытания осуществили в соответствии с положениями ГОСТ 12730.0 и ГОСТ 12730.5. Образцы бетона (каждая серия – 6 шт., размеры цилиндра:  $d/h = 150/150$  мм) после твердения в нормально-влажностных; воздушно-сухих; естественных (под пленкой) усло-

виях в течение 28 сут, а пропаренные – через 1 сут после изготовления, были подвергнуты испытаниям.

При изготовлении образцов из мелкозернистого бетона использовали базовый состав (Ц = 500 кг; П = 1600 кг (заславльский, мытый); В/Ц ~ 0,34); а цементно-песчаную смесь уплотняли послойно (перед укладкой последующего слоя верх ранее уложенного взрыхляли на глубину 3–5 мм, чтобы избежать «слоистости» бетона) до средней плотности свежееотформованного бетона  $\rho_{\text{бс}} \sim 2250 \pm 10 \text{ кг/м}^3$ .

Образцы из бетона со щебнем (обычным и кубовидной формы) изготавливали по приведенной методике из бетонной смеси состава: Ц = 450 кг; П = 1150 кг (крапужинский); Ш<sub>1</sub> = 600 кг; В ~ 0,36–0,38, уплотняя до средней плотности свежееотформованного бетона с обычным щебнем  $\rho_{\text{бс}} \sim 2350 \text{ кг/м}^3$  и с кубовидным щебнем до  $2400 \text{ кг/м}^3$ .

Результаты испытаний (при значении максимального давления, при котором на четырех из шести образцов серии не наблюдалось просачивания воды) представлены в табл. 3.4.

Несмотря на то, что ныне действующие требования к бетону тротуарных плит и бордюрных камней не включают показатель водонепроницаемости, полученные данные показательны, т.к. они полностью соотносятся с ранее полученными данными по водопоглощению бетона в зависимости от условий его твердения, подтверждают их. По существу, данные по водонепроницаемости характеризуют соотношение объемов открытой капиллярной пористости бетона и являются сравнительной характеристикой «эффективного» (усредненного) диаметра пор цементного камня в бетоне, формирующихся под влиянием среды и условий твердения, поскольку «прочие условия» были приняты одинаковыми.

Из полученных данных следует, что качество уплотнения бетона, возрастающее при наличии крупного заполнителя, существенно сказывается на его непроницаемости для одинаковых условий твердения образцов. По существу во всех случаях водонепроницаемость бетона со щебнем выше, чем у мелкозернистого при меньшем расходе цемента.

Водонепроницаемость является важной характеристикой, позволяющей судить о вероятной проницаемости бетона. Однако она не позволяет количественно оценить его фильтрационные свой-

ства, от которых зависит его морозо- и коррозионная стойкость. Поэтому важно определить проницаемость бетона по коэффициенту фильтрации воды  $K_f$ . Особенно, как сравнительную характеристику образцов бетона различного состава и твердевших в различных условиях, с целью получения в дальнейшем соответствующих зависимостей для оценки изменения при этом его проницаемости.

Таблица 3.4

Влияние условий твердения на водонепроницаемость бетона

Вид бетона	Условия твердения бетона	Наибольшее давление воды, МПа	Марка бетона по водонепроницаемости	Относительное изменение водонепроницаемости, %
Мелкозернистый	Нормально-влажностные	0,9	W8	100
	воздушно-сухие	0,5	W4	56
	Естественные (под пленкой)	0,9	W8	100
	После пропаривания	0,7	W6	78
С обычным щебнем	Нормально-влажностные	1,1	W10	100
	Воздушно-сухие	0,5–0,6	W4	Около 60
	Естественные (под пленкой)	1,1	W10	100
	После пропаривания	0,7–0,8	W6	Около 80
С кубовидным щебнем	Нормально-влажностные	Более 1,1	Более W10	100–120
	После пропаривания	0,8	W6- W8	Около 80

### 3.3.2. Коэффициент фильтрации бетона

Коэффициент фильтрации воды определили (табл. 3.5) по методике ГОСТ 12730.5 на образцах мелкозернистого бетона базового состава при средней плотности свежесформованного бетона  $\rho_{бс} \sim 2250 \text{ кг/м}^3$  и на образцах бетона с обычным и кубовидным щебнем ( $\rho_{бс} \sim 2350 \text{ кг/м}^3$  и  $2400 \text{ кг/м}^3$  соответственно) составов, приведенных в п. 3.1.

Давление воды при испытаниях увеличивали ступенями до 0,1 МПа с выдержкой в течение 1 ч. После появления фильтрата, поддерживая достигнутое при этом давление, определяли расход фильтрата ( $Q$ ,  $\text{см}^3$ ), как среднее значение пяти наибольших замеров (при разнице расхода воды между замерами не более 20 %) на каждом образце (при 3-х образцах в серии).

Значение  $K_{\phi}$  вычисляли по формуле

$$K_{\phi} = \eta \cdot \frac{Q \cdot \delta}{S \cdot \tau \cdot \Delta P} \cdot K, \text{ см/с}, \quad (3.1)$$

где  $\eta$  – коэффициент, учитывающий вязкость воды в зависимости от температуры; в наших экспериментах  $t \sim 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $\eta \sim 1,13$ ;

$Q$  – расход воды (фильтрата) за время  $\tau$ ,  $\text{см}^3$  или г;

$\delta$  – толщина образца,  $\delta = 5 \text{ см}$ ;

$\tau$  – время сбора фильтрата, 1800 с (30 мин);

$\Delta P$  – разность давления на входе и выходе воды (при  $P_{\text{вых}} = 0$ ,  $\Delta P = P_{\text{изм}}$ ), Па;

$S$  – площадь образца, равная:  $S = 38,5 \text{ см}^2$ ;

$K$  – коэффициент, учитывающий влияние диаметра образца, равный  $K = 2,8$  при диаметре 80 мм (ГОСТ 12730.5).

Значения коэффициента фильтрации, определенные на образцах диаметром 80 мм (поправочный коэффициент  $K = 2,8$ ) и высотой 50 мм, соответствуют области допустимых по ГОСТ 12730.5 значений для W 8; W 10 (нормально-влажные условия твердения и «под пленкой»), W6 (после пропаривания) и W4 для воздушно-сухих условий твердения.

Таблица 3.5

Влияние условий твердения на коэффициент фильтрации воды

Вид бетона	Условия твердения бетона	Давление измерения $P_{изм}$ , МПа	Средний расход воды, по массе, г за $\tau$ (с):	Расчетный коэффициент фильтрации воды $K_f$ , см/с
Мелкозернистый	Нормально-влажные	0,6	1,4	$5,3 \cdot 10^{-10}$
	Воздушно-сухие	0,3	4,2	$32 \cdot 10^{-10}$
	Естественные (под пленкой)	0,6	1,28	$4,9 \cdot 10^{-10}$
	После пропаривания	0,5	3,0	$15,7 \cdot 10^{-10}$
С обычным щебнем	Нормально-влажные	0,8	0,35	$1,0 \cdot 10^{-10}$
	Воздушно-сухие	0,5	4,8	$22 \cdot 10^{-10}$
	Естественные (под пленкой)	0,8	0,28	$0,81 \cdot 10^{-10}$
	После пропаривания	0,6	2,9	$11 \cdot 10^{-10}$
С кубовидным щебнем	Нормально-влажные	1,0	0,39	$0,9 \cdot 10^{-10}$
	После пропаривания	0,6	2,37	$9 \cdot 10^{-10}$

Данные табл. 3.5 подтверждают ранее выявленные закономерности взаимосвязи и взаимозависимости качества структуры бетона (как мелкозернистого, так и с крупным заполнителем) от условий его твердения, определяющих (при прочих равных условиях) проницаемость (или непроницаемость) материала, отраженную в величинах коэффициента фильтрации. Приведенные в табл. 3.5 к размерности с порядком  $10^{-10}$ , они свидетельствуют об очень большой разнице в величинах коэффициентов фильтрации бетона, твердевшего в благоприятных условиях, в сравнении с воздушно-сухими, а также с образцами, испытанными сразу после пропаривания. В последнем случае структура бетона еще находится в стадии активного

формирования, что подтверждается относительно небольшим количеством химически связанной воды и степенью гидратации цемента (см. табл. 3.2)  $\alpha \approx 55\text{--}56\%$ . В этой связи после пропаривания рационален прием последующего дозревания бетона, например, путем пакетирования изделий в полиэтиленовую упаковку.

### **3.4. Взаимосвязь условий твердения, водопоглощения (пористости) и прочности бетона**

Методика экспериментов заключалась в определении изменений прочности мелкозернистого бетона в зависимости от возраста (3, 7, 14, 28 и 90 сут) и бетона со щебнем (составы по п. 2.1) в возрасте до 28 сут, степени насыщения водой (естественная влажность для данных условий твердения; водонасыщения за 24 ч и полное водонасыщение под вакуумом) и условий твердения: нормально-влажностных; воздушно-сухих; естественных (под пленкой); пропаривание и нормально-влажностные после пропаривания (табл. 3.6).

Прочность бетона определена, как среднее значение 3–6 образцов в серии по ГОСТ 10180 и приведена к прочности куба 150 x 150 x 150 мм. Данные табл. 3.6 отражают известную закономерность снижения прочности цементного бетона с ростом его пористости при твердении в воздушно-сухих условиях.

Очевидно практическое соответствие прочности образцов бетона проектного возраста, твердевших в нормально-влажностных условиях и «дозревавших» в них после пропаривания по «мягкому» режиму.

Видна тенденция некоторого превышения роста прочности бетона при воздушно-сухих условиях его твердения в первые трое суток и закономерное ее снижение в дальнейшем, в сравнении с образцами нормально-влажностного твердения.

Изменение прочности бетона под влиянием увлажнения при водонасыщении под вакуумом отражает ее взаимосвязь с пористостью. Чем больше количество поглощаемой воды (как отражение роста пористости), тем значительно снижается прочность влажного бетона. Например, если для образцов бетона нормально-влажностного твердения относительное снижение прочности составило, примерно до 5–7 %, то при воздушно-сухих условиях твердения оно достигало 10–15 %. Это связано с проявлением в бетоне «расклинивающего» эффекта жидкой фазы (эффекта Ребиндера), возника-

ющего под действием нормально приложенной сжимающей нагрузки и прямо зависящего от количества поглощенной им жидкости.

Таблица 3.6

Кинетика роста прочности бетона на сжатие

Вид бетона	Условия твердения бетона	Прочность бетона на сжатие ( $f_{cm}$ , МПа) в возрасте, сут:				
		3	7	14	28	90
Мелкозернистый	Нормально-влажностные	26,0	34,0	39,0	43,0/40,0*	45,0
	Воздушно-сухие	27,6	30,0	33,0	35,5/30,1	42,0
	Естественные (под пленкой)	28,5	36,0	42,6	46,0/42,5	51,0
	После пропаривания**	29,5	–	–	–	–
	Нормально-влажностные после пропаривания	–	–	–	–	43,8
С обычным щебнем фр. 5-10 мм	Нормально-влажностные	32,5	44,9	49,0	52,2/49,6	–
	Воздушно-сухие	33,0	45,2	46,5	48,0/41,2	–
	Естественные (под пленкой)	37,0	48,0	52,0	55,4/51,0	–
	После пропаривания**	34,8	–	–	–	–
	Нормально-влажностные после пропаривания	–	–	–	50,8/45,9	–
С кубовидным щебнем	После пропаривания**	37,6	–	–	–	–
	Нормально-влажностные после пропаривания	–	–	–	58,1/55,5	–

\*За чертой – в насыщенном водой под вакуумом состоянии.

\*\* Сразу после окончания тепловой обработки.

*Из обобщения результатов экспериментов* данного раздела следует, что водопоглощение бетона (в экспериментах – по массе), определенное по стандартной методике в проектном (и более позднем) возрасте, вполне адекватно отражает состояние структуры

(объем открытой пористости) бетона, как фактора, определяющего его проницаемость (или – непроницаемость) и предопределяющего его морозостойкость.

Данный вывод следует из оценки соотношения между величинами водопоглощения, водонепроницаемости и коэффициента фильтрации образцов бетона (мелкозернистого и с крупным заполнителем), при прочих равных условиях. Во всех случаях снижения или роста водопоглощения бетона под влиянием изменения качества заполнителей, наличия-отсутствия щебня, его вида, изменения качества (степени) уплотнения, условий твердения, практически адекватно изменялись величины водонепроницаемости и коэффициента фильтрации бетона, отражая снижение или рост пористости и проницаемости его структуры.

Учитывая относительную простоту определения водопоглощения бетона (по сравнению с водонепроницаемостью и коэффициентом фильтрации) использование этой характеристики для оценки его качества обоснованно. Одновременно необходимо отметить, что «оперативное» определение водопоглощения с высушиванием образцов бетона, не достигшего проектного возраста (т. е. 28 сут), искажает реальное состояние его структуры за счет испарения части воды затворения. Такое определение вводить в стандарт на изготовление и контроль качества изделий из вибропрессованного бетона (а в принципе – любого другого цементного бетона) не допустимо.

Учитывая необходимость оценки влагосодержания бетона ранее проектного возраста, возникающую в каких-то случаях практики производства вибропрессованных изделий, целесообразно использовать для этой цели иные методы, в частности, стандартизированный диэлькометрический метод (и приборы) контроля влажности, избегая оценки с применением высушивания образцов (изделий).



## 4. МОРОЗОСТОЙКОСТЬ БЕТОНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ТВЕРДЕНИЯ, СПОСОБА ИЗГОТОВЛЕНИЯ БРАЗЦОВ И ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

### 4.1. Влияние условий твердения бетона на его морозостойкость

#### 4.1.1. Методика исследований

В настоящих исследованиях использовали цементно-песчаный бетон и бетон со щебнем гранитным при водоцементном отношении В/Ц  $\sim 0,33$ – $0,36$  и  $0,36$ – $0,40$ , соответственно, при показателе жесткости  $J \sim 15$ – $25$  с. Образцы бетона уплотняли на виброплощадке со стандартными параметрами ( $A = 0,5$  мм;  $f \approx 50$  Гц) в течение времени и под пригрузом, обеспечивающим получение расчетного качества (степени) его уплотнения. Последнюю оценивали по средней плотности свежесформованного бетона, принятую не ниже для цементно-песчаного бетона –  $2250$  кг/м<sup>3</sup>, а для бетона со щебнем –  $2350$  кг/м<sup>3</sup>.

Во всех случаях для мелкозернистого бетона использован базовый состав цементно-песчаного бетона: расход цемента Ц =  $500$  кг, расход сухого песка П =  $1600$  кг, расход воды В  $\approx 160$ – $170$  л, примерно соответствующий производственным составам предприятий-производителей элементов благоустройства и для изготовления образцов бетона со щебнем использовали состав, характеризующийся расходом цемента  $450$  кг, щебня гранитного  $600$  кг, песка  $1150$  кг на  $1$  м<sup>3</sup> бетона и воды  $160$ – $180$  л.

Данные по определенным в исследованиях характеристикам бетона получены как средние значения с соблюдением правил обработки результатов испытаний, установленных в соответствующих стандартах.

Учитывая цель исследований и практикуемые предприятиями варианты твердения изделий, испытания вели для серий образцов, хранившихся от момента изготовления в помещении лаборатории в условиях гидроизоляции (под полиэтиленовой пленкой); на воздухе в помещении лаборатории (воздушно-сухие: со средней температурой воздуха около  $18$ – $23$  °С и относительной влажностью  $60$ – $70$  %),

а также в помещении лаборатории после пропаривания (режим: предварительная выдержка – 2 ч; подъем температуры в лабораторной ямной камере до 50 °С – 2 ч; изотермическая выдержка при этой температуре – 6,5 ч; остывание образцов бетона вместе с камерой 6–10 ч. Во всех случаях образцы распалубливали не позднее 24 ч от момента изготовления.

Образцы всех серий подвергали всем видам испытаний по достижении проектного возраста, т. е. через 28 суток после изготовления.

Цель настоящих исследований заключалась в выявлении закономерностей изменения свойств бетона (изменения массы и прочности) под воздействием циклического замораживания–оттаивания. С учетом того, что продолжительное воздействие «размораживание» должно в какой-то момент привести к нарушениям структуры бетона, отслеживали изменение скорости прохождения ультразвукового импульса, что бы уловить эти изменения во взаимосвязи с изменяющимися свойствами бетона: прочностью и изменениями массы.

Циклическое замораживание-оттаивание вели по 3-му методу ГОСТ 10060–95 как для дорожного бетона (образцы 70 x 70 x 70 мм). Замораживание (с охлаждением образцов до  $t = - (50-55) \text{ } ^\circ\text{C}$ ), оттаивание (при  $18 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) осуществляли в емкостях с 5%-м водным раствором NaCl.

Периодичность испытаний бетона по различным показателям: изменению массы, прочности и скорости ультразвука, приведена в соответствующих разделах, так же как и особенности методик отдельных испытаний.

#### ***4.1.2. Характеристики образцов бетона для испытаний***

На начальной стадии исследований определили характеристики контрольных образцов бетона цементно-песчаного и с крупным заполнителем в возрасте 28 сут (табл. 4.1). Условия твердения различных серий образцов (по 3–6 на каждый вид испытаний) приняты: с гидроизоляцией полиэтиленовой пленкой; воздушно-сухие и пропаривание с последующим хранением на воздухе в помещении лаборатории ( $t \sim 18-23 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $\phi \sim 60-70 \text{ } \%$ ).

Таблица 4.1

## Характеристики образцов бетона

Условия твердения бетона	Прочность на сжатие, $f_c$ , МПа		Скорость ультразвука, $V_{уз}$ , м/с		Водопоглощение по массе, $W_m$ , %
	ест.*	нас.**	ест.	нас.	
Мелкозернистый бетон					
Естественные (под пленкой)	44,0	43,0	4210	4530	4,2
Воздушно-сухие	40,5	38,0	4100	4520	5,9
Пропаривание с дозреванием	42,0	41,0	4150	4550	4,7
Бетон со щебнем					
Естественные (под пленкой)	53,0	52,0	4530	4710	3,0
Воздушно-сухие	49,2	47,0	4400	4770	4,2
Пропаривание с дозреванием	52,0	50,0	4500	4710	3,6

\* Образцы бетона естественной влажности для соответствующих условий твердения.

\*\* Образцы бетона после водонасыщения.

Водопоглощение бетона определили по методике ГОСТ 12730.3 с начальным водонасыщением образцов и последующим высушиванием.

Прочность бетона на сжатие определили по ГОСТ 10180 (с учетом масштабного коэффициента – 0,85) в состоянии естественной влажности образцов и после насыщения их в растворе соли по методике ГОСТ 10060.0, то есть за 96 ч с периодическим «погружением» образцов в жидкость. Данные по прочности насыщенных таким образом образцов являются контрольными в процессе слежения за изменениями этого показателя при последующих испытаниях.

Скорость распространения ультразвукового импульса (далее – скорость ультразвука) определили в соответствии с положениями ГОСТ 18105 «Бетоны. Правила контроля прочности» и ГОСТ 17624

«Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности» при сквозном прозвучивании образцов.

#### ***4.1.3. Изменение массы бетона в процессе испытаний***

Образцы бетона взвешивали на лабораторных электронных весах с точностью до 0,1 г, предварительно убрав с поверхности влажных образцов избыток жидкости влажной тканью до «матового» состояния их поверхности. Влага, в отдельных случаях появлявшаяся на поверхности площадки весов, засчитывалась в вес образца.

В табл. 4.2 и 4.3 приведены соответствующие данные об изменениях массы образцов мелкозернистого бетона и бетона со щебнем основных серий, подвергавшихся воздействию циклического замораживания – оттаивания в растворе соли. Каждая строка таблиц – это усредненные данные по серии не менее 3 образцов, отдельные значения которых в подавляющем большинстве случаев отличалась не более, чем на 10 %, а в целом: менее 15 %.

Прирост массы образцов показан без знака, а снижение массы дано со знаком «←» (минус).

При этом прирост массы и ее снижение, приведены по фактическим значениям абсолютной величины в граммах. То есть каждое из этих значений соответствует изменениям массы образца в граммах относительно предыдущей ее величины. По существу положительный прирост массы отражает увеличение водосодержания бетона в процессе циклического замораживания – оттаивания (или водосодержания при испытаниях солестойкости) на начальной этапе испытаний, а последующее ее снижение – начало и развитие деструктивных процессов с поверхности образцов. Увеличение потерь их массы сопровождается появлением признаков деструкции бетона в виде округления ребер (медленно развивающегося, так как бетон достаточно плотен).

Анализ результатов исследований свидетельствует о следующем.

Очевидна общая тенденция «поведения» образцов бетона (как цементно-песчаного, так и со щебнем) при циклических испытаниях на морозостокость в растворе соли, заключающаяся в поглощении его порами «дополнительного» (к водонасыщению в течение 96 ч) количества жидкости. Это связано с рядом причин: проникнове-

нием жидкости в поры, не заполненные ей в процессе водонасыщения, с накоплением в них вещества соли, а также со своеобразным «ускоряющим» воздействием переменного замораживания-оттаивания бетона в водных условиях на течение и развитие процесса гидратации цемента и «дополнительного» связывания им воды. Последний эффект подробнее рассмотрен далее.

Явно выражена общая закономерность перехода от положительной к отрицательной динамике в изменениях массы образцов после определенного количества циклов циклических испытаний. Так, при испытаниях на морозостойкость в растворе соли снижение массы образцов зафиксировано к 10–15 циклам для мелкозернистого бетона и к 20 циклам - для бетона со щебнем. В дальнейшем наблюдается существенный рост темпа деструкции бетона в солевой среде, выраженный ускоренным снижением массы образцов.

*Влияние условий твердения образцов.* Во всех вариантах испытаний видно отрицательное влияние воздушно-сухих условий твердения бетона, проявляющееся в ускоренном снижении массы образцов.

Большее количество жидкости, поглощенной бетоном при воздушно-сухих условиях твердения образцов, равно как и ускоренное снижение их массы (как будет показано далее – и прочности) в процессе испытаний на морозостойкость непосредственно связано с возрастающим в этом случае объемом капиллярной пористости и ростом проницаемости структуры бетона. Эта взаимосвязь детально рассмотрена на предыдущем этапе работы и подтверждается приведенными данными.

Изменения массы образцов пропаренного по «мягкому» режиму бетона с последующим хранением в воздушно-сухих условиях занимают промежуточное положение и незначительно уступают по этому показателю образцам, твердевшим 28 сут под пленкой. Следует отметить, что все испытанные на морозостойкость в растворе соли серии контрольных образцов бетона по показателю снижения массы не превысили допустимого значения ее потерь в 3 %. Например, для образцов мелкозернистого бетона воздушно-сухих условий твердения к 35 циклам (~ F 300) потери массы составили около 2,6 %; для остальных – меньше.

Таблица 4.2  
Изменения массы контрольных образцов мелкозернистого бетона в процессе испытаний

Условия твердения бетона	$m_{\text{исп. г}}$	$m_{\text{исп. г}}$	$V_{\text{полн. г}}$	Изменения массы образцов, г, после количества циклов замораживания-оттаивания (насыщения в растворе соли – высушивания), цикл:										
				5	10	15	20	25	30	35				
Испытания морозостойкости в 5 % растворе соли (NaCl)														
Естественные (под пленкой)	802,0	812,0	10,0	2,1	0,6*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	788,0	799,8	11,8	1,3	0,2	–1,0	–1,6*	–	–	–	–	–	–	–
	794,5	804,3	9,8	2,5	0,4	–1,1	–1,5	–2,2*	–	–	–	–	–	–
	800,5	811,0	10,5	0,9	1,2	–0,9	–1,2	–1,8	–3,4*	–	–	–	–	–
	783,8	793,7	9,9	1,5	0,4	–0,6	–0,9	–2,3	–3,9	–6,8*	–	–	–	–
	781,0	797,3	16,3	2,5	1,8*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Воздушно- сухие	769,4	789,9	20,5	3,0	–0,2	–1,9	–3,4*	–	–	–	–	–	–	–
	792,0	815,3	23,3	2,2	–0,8	–1,8	–2,9	–3,8*	–	–	–	–	–	–
	778,0	799,5	21,5	2,9	1,9	–0,5	–2,4	–3,1	–6,6*	–	–	–	–	–
	772,2	794,6	22,4	3,3	–0,6	–1,2	–3,2	–4,3	–7,6	–10,5*	–	–	–	–
	790,1	803,1	13,0	2,2	1,8*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	775,5	786,6	11,1	1,9	–0,6	–1,6	–2,0*	–	–	–	–	–	–	–
Пропаренные с до- зреванием	789,0	801,8	12,8	1,6	1,4	–1,4	–1,9	–2,4*	–	–	–	–	–	–
	781,5	792,3	10,8	2,0	1,8	–0,7	–1,9	–3,0	–5,1*	–	–	–	–	–
	778,8	790,3	11,5	2,3	–0,2	–0,9	–2,2	–2,6	–4,3	–7,6*	–	–	–	

\* После означенного количества циклов серия образцов испытана на сжатие.

Таблица 4.3

## Изменения массы контрольных образцов бетона со щебнем

Условия твердения бетона	$m_{\text{ест.}}$ , г	$m_{\text{нас.}}$ , г	$V_{\text{пол.}}$ , г	Изменения массы образцов, г, после количества циклов замораживания-оттаивания (насыщения в растворе соли – высушивания), цикл										
				5	10	15	20	25	30	35				
Испытания морозостойкости в 5 % растворе соли (NaCl)														
Естественные (под пленкой)	861,0	870,2	9,2	1,9	0*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	842,5	852,5	10,0	1,9	0,4	0,9	–0,8*	–	–	–	–	–	–	–
	858,0	866,0	8,0	1,6	0,1	–0,3	–0,3	–1,1*	–	–	–	–	–	–
	864,1	872,6	8,5	1,7	0,5	0,1	–0,1	–0,9	–2,2*	–	–	–	–	–
	850,0	859,4	9,4	1,0	0,6	0,2	–0,4	–1,2	–3,4	–5,6*	–	–	–	–
	851,5	865,3	13,8	2,2	1,5*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Воздушно-сухие	839,9	852,4	12,5	1,9	1,9	0,4	–0,9*	–	–	–	–	–	–	–
	842,2	857,8	15,6	2,5	1,2	–0,9	–2,2	–2,6*	–	–	–	–	–	–
	840,0	857,0	17,0	2,8	1,1	–1,3	–1,8	–3,0	–4,6*	–	–	–	–	–
	834,5	849,8	15,3	3,1	0,7	–0,2	–1,8	–3,1	–4,9	–7,8*	–	–	–	–
	848,0	858,2	10,2	2,0	1,0*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Пропаренные с дозреванием	856,0	865,8	9,8	1,9	1,0	0,4	–0,3*	–	–	–	–	–	–	–
	844,5	855,8	11,3	2,2	0,8	–0,9	–0,4	–2,3*	–	–	–	–	–	–
	860,0	870,0	10,0	2,2	0,9	–0,2	–0,7	–1,5	–2,8*	–	–	–	–	–
	853,0	861,9	8,9	1,8	1,3	–0,6	–1,4	–2,5	–4,0	–6,2*	–	–	–	–

\*После значительного количества циклов серия образцов испытана на сжатие.

#### 4.1.4. Изменение прочности бетона

В соответствии с принятой общей методикой исследований изучили влияние циклического замораживания-оттаивания ( $t_s = -(50-55)^\circ\text{C}$ ) в растворе соли на образцы бетона, твердевшие 28 суток в естественных (под пленкой), воздушно-сухих условиях и в этих же условиях после пропаривания. В табл. 4.4 приведены экспериментальные данные об изменениях прочности образцов бетона (контрольных и основных).

Следует отметить непосредственную взаимосвязь изменений прочности образцов бетона от условий их твердения и состояния структуры (пористости) материала. Во всех вариантах испытаний наименьшей прочностью характеризуется бетон, твердевший в воздушно-сухих условиях. Но даже и в этом случае после первых 10–20 циклов замораживания-оттаивания в растворе соли или в воде и до 10 циклов испытаний на солестойкость прочность образцов бетона (до уровня статической нагрузки в 10–20 МПа для мелкозернистого бетона и в 15–25 МПа для бетона со щебнем) несколько возрастает. Этот эффект значительнее для образцов, твердевших в растворе. Явление роста прочности бетона под знакопеременным температурным воздействием есть отражение специфического влияния последнего на процесс гидратации цемента. Необходимо подчеркнуть, что это явление имеет место (особенно при глубоком охлаждении) только в бетонах с достаточно высокой плотностью структуры. При циклическом замораживании бетона (достигшего проектной прочности и характеризующегося степенью гидратации цемента в 60–70 % при водопоглощении по массе в 3–4 %, как в нашем случае) происходит следующее. Жидкость в объеме пор «под пленкой» и пропаренных после изготовления цементного камня содержит гидратированные ионы клинкерных минералов, как результат медленно текущей (к более чем 28 суткам твердения) реакции гидратации цемента. То есть представляет собой раствор, в котором растворителем является вода. При охлаждении до глубокой отрицательной температуры в первую очередь замерзает растворитель, т. е. вода. Растворенные в ней ионы «отжимаются» к поверхности твердой фазы, создавая в этих объемах их повышенную концентрацию вплоть до пересыщения раствора и тем самым обеспечивая условия для возникновения и формирования твердофазных кристаллогидратных



новообразований. Поскольку эта реакция необратима, то при последующем оттаивании сформировавшиеся кристаллогидраты дополняют ранее сложившуюся структуру «реакционных каемок» вокруг негидратировавших цементных «ядер» и постепенно уплотняют ее. А многократное повторение этой ситуации способствует росту прочности цементного камня и бетона в целом.

Таблица 4.4

Изменения прочности контрольных и основных образцов бетона

Условия твердения бетона	Значения прочности бетона на сжатие, МПа, после количества циклов замораживания-оттаивания, цикл:					
	0	10	20	25	30	35
Образцы мелкозернистого бетона						
Естественные (под пленкой)	43	45	45	43	41	40*
Воздушно-сухие	41	42	41	40	38*	34
Пропаривание с дозреванием	42	44	43	42	40	39*
Образцы бетона со щебнем						
Естественные (под пленкой)	53	54	55	54	52	51
Воздушно-сухие	49	51	50	49	46*	43
Пропаривание с дозреванием	52	53	54	52	50	49*

\* Снижение прочности более 5 %.

Одновременно с этим явлением знакопеременные температурные воздействия вызывают деструктивные процессы, сопровождающие испытания бетона на морозостойкость. В результате на начальном этапе испытаний превалирует эффект побуждения гидратационного процесса, выражающийся в росте прочности бетона. С течением времени начинают преобладать деструктивные явления, подробно рассмотренные в 1-й главе, а их совокупное действие сопровождается снижением прочности бетона.

Обобщая данные исследований изменений массы и прочности образцов бетона при испытаниях на морозостойкость можно сделать следующие выводы о влиянии на процесс деструкции бетона условий его твердения.

Из исследованных вариантов твердения бетона: в условиях гидроизоляции (полиэтиленовой пленкой), пропаривание с последующим твердением на воздухе и твердение на воздухе (воздушно-сухие), последние оказывают существенное влияние на снижение показателя морозостойкости вибропрессованного бетона, проявившееся в ускоренном снижении массы и прочности образцов в процессе сравнительных испытаний. В пределах данного эксперимента наиболее благоприятны условия естественного твердения с гидроизоляцией образцов на период не менее 7 сут, с последующим твердением на воздухе. Практически близкие данные получены для пропаривания бетона по мягкому режиму ( $t \leq 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ) с последующим твердением до проектного возраста (28 сут) на воздухе.

Основной причиной отмеченной закономерности является состояние структуры бетона, характеризующейся ростом капиллярной пористости цементного камня при твердении в воздушно-сухих условиях. В соответствии с этим возрастает проницаемость бетона, что отражается в увеличении его водопоглощения, т.е. увеличивается количество «свободной» воды, заполняющей поры бетона. При последующем попеременном замораживании-оттаивании (как при испытаниях, так и в процессе эксплуатации) этот фактор оказывает решающее влияние на снижение морозостойкости и долговечности бетона.

Существенным фактором, влияющим на долговечность, является прочность бетона. Ее снижение (при твердении в воздушно-сухих условиях образцов вибропрессованного бетона) понижает способность структуры бетона воспринимать деформации от воздействия воды и мороза, развитие которых приводит к трещинообразованию и нарастающим во времени деструктивным явлениям. Этот отрицательный эффект подробно рассмотрен в первой главе на основе результатов исследований других авторов.

Таким образом, условия твердения свежееотформованных вибропрессованных изделий на воздухе без защиты бетона от испарения влаги (воды затворения) не допустимы с позиций обеспечения их эксплуатационной долговечности. К сожалению следует отметить,

что на многих производствах вибропрессованных изделий они широко практикуются, так как ошибочно трактуются как «естественные условия твердения».

## **4.2. Влияние разрезки образцов на показатель морозостойкости бетона**

### ***4.2.1. Характеристики образцов бетона для испытаний***

В соответствии с планируемыми исследованиями испытаниям подвергались серийно выпущенные одним из предприятий г. Минска изделия, номинальными размерами 200x100x80 мм, т.е. тротуарная плита в виде прямоугольного параллелепипеда (брусчатка). Возраст бетона к началу испытаний соответствовал 28 сут. Все образцы после формования (по технологии изготовления изделий, принятой на выпускающем предприятии) пропаривались в ямных камерах предприятия и в дальнейшем хранились на открытой складской площадке.

Для проведения экспериментов использовали образцы как в виде целых изделий, так и подготовленные «образцы-кубы» из плит, распиленных по одной грани; по 2-м граням и 3-м граням специальной дисковой металлической пилой. Получены образцы номинальными размерами: 100x100x80 мм. Состав цементно-песчаного бетона, из которого были изготовлены образцы соответствовал принятому на момент изготовления изделий, а именно: портландцемента (со свойствами по табл. 2.4) марки ПЦ 500-Д0 ОАО «Кричевцементношифер» 500 кг/м<sup>3</sup> бетона и песка природного (со свойствами по табл. 2.5) заславльского месторождения –1700 кг/м<sup>3</sup> бетона, воды (СТБ 1114–98) – 155 л/м<sup>3</sup>. В состав бетона входит небольшое количество гидрофобизирующей добавки, являющейся «ноу-хау» предприятия.

В табл. 4.5 и 4.6 приведены данные о типоразмерах образцов, средней плотности и скорости ультразвука в бетоне естественной влажности при определении «сквозным прозвучиванием» (прибор УК 14П) и «прозвучиванием с поверхности» (прибор УК-1401).

Таблица 4.5

## Данные о натуральных образцах-плитах

№	Дли- на, мм	Шири- на, мм	Высота, мм	Объём, м <sup>3</sup>	m <sub>0</sub> , гр	V <sub>уз.о.</sub> , м/с		ρ <sub>бет</sub> <sup>0</sup> , кг/м <sup>3</sup>
						УК-1401	УК -14П	
<b>Целая плита</b>								
1	199	99,0	80,0	1,576·10 <sup>-3</sup>	3469,6	4690	4232,8	2202
2	200	99,0	79,0	1,564·10 <sup>-3</sup>	3499,0	5050	4413,4	2237
3	200	99,0	79,0	1,564·10 <sup>-3</sup>	3524,0	5100	4438,2	2253
4	200	99,0	78,0	1,544·10 <sup>-3</sup>	3483,4	5020	4406,8	2256
5	200	98,5	78,5	1,546·10 <sup>-3</sup>	3528,5	4950	4537,6	2282
6	200	98,5	80,5	1,586·10 <sup>-3</sup>	3629,1	5080	4447,5	2288
7	200	98,0	79,0	1,548·10 <sup>-3</sup>	3520,3	4980	4438,2	2274
8	200	98,5	79,0	1,556·10 <sup>-3</sup>	3607,5	5080	4566,5	2318
9	200	98,5	78,5	1,546·10 <sup>-3</sup>	3590,3	5050	4564,0	2322
Среднее значение						5000	4449,4	2270,2

Для мелкозернистого бетона (далее – бетона) образцов-плит «брусчатка» средняя скорость распространения ультразвукового импульса (далее – скорость ультразвука) при сквозном прозвучивании вдоль продольной оси плит в среднем составила приблизительно 4450 м/с, а при прозвучивании с поверхности около 5000 м/с. Отличие последнего варианта определения скорости ультразвука заключается в том, что в этом случае ультразвуковая волна распространяется по касательной, параллельно поверхности испытуемого образца.

Расстояние между датчиком-излучателем и датчиком-приемником прибора УК-1401 составляет 150 мм, что позволяет определять скорость ультразвука непосредственно на свежетоформованных изделиях, а также на уложенных в покрытия тротуаров, а значит и в процессе их эксплуатации. Наблюдение за ними (контроль за изменениями влажности и скорости ультразвука) в сочетании с обобщенными данными настоящих исследований могут позволить оперативно оценивать морозостойкость бетона в свежизготовленных изделиях, а также с достаточно высокой степенью точности определять фактическое состояние бетона в элементах эксплуатируемых покрытий и прогнозировать его «остаточную» морозостойкость и долговечность [114–116].

Таблица 4.6

Данные о натуральных образцах-кубах, полученных резкой плит

№	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Объём, м <sup>3</sup>	m, гр	V <sub>уз.о</sub> , м/с УК -14П	$\rho_{бет}^0$ , кг/м <sup>3</sup>
<b>Образцы - (1 грань)</b>							
1	97,5	98,5	79,0	0,759·10 <sup>-3</sup>	1711,9	4438,2	2255
2	98,0	98,5	79,0	0,763·10 <sup>-3</sup>	1720,7	4438,2	2255
3	100	99,0	80,0	0,792·10 <sup>-3</sup>	1832,3	4545,5	2314
4	100	98,5	80,0	0,788·10 <sup>-3</sup>	1762,7	4395,6	2237
5	96,0	98,5	79,0	0,756·10 <sup>-3</sup>	1729,0	4463,3	2287
6	100	98,5	79,0	0,778·10 <sup>-3</sup>	1699,0	4293,5	2184
7	99,5	99,0	78,0	0,768·10 <sup>-3</sup>	1687,4	4285,7	2197
8	97,0	98,0	80,0	0,760·10 <sup>-3</sup>	1640,2	4278,1	2158
9	97,0	98,4	78,5	0,749·10 <sup>-3</sup>	1649,1	4313,2	2202
Среднее значение:						4383,5	2232,1
<b>Образцы - (2 грани)</b>							
1	97,0	84,5	78,8	0,646·10 <sup>-3</sup>	1477,2	4477,3	2287
2	97,0	86,0	79,0	0,659·10 <sup>-3</sup>	1481,4	4413,4	2248
3	96,5	86,0	79,5	0,660·10 <sup>-3</sup>	1479,6	4417,7	2242
4	99,5	84,5	79,3	0,667·10 <sup>-3</sup>	1486,4	4405,6	2229
5	98,5	83,5	78,2	0,643·10 <sup>-3</sup>	1466,2	4468,6	2280
6	99,0	87,0	79,5	0,685·10 <sup>-3</sup>	1594,4	4517,0	2328
7	104	87,0	80,5	0,728·10 <sup>-3</sup>	1559,7	4282,0	2142
7	100	86,0	79,0	0,679·10 <sup>-3</sup>	1515,3	4413,4	2232
9	96,0	85,0	79,3	0,647·10 <sup>-3</sup>	1469,8	4455,1	2272
Среднее значение:						4427,8	2251,1
<b>Образцы - (3 грани)</b>							
1	96,5	72,5	77,0	0,539·10 <sup>-3</sup>	1230,1	4477,3	2287
2	97,0	70,0	79,0	0,536·10 <sup>-3</sup>	1215,9	4413,4	2248
3	100,0	72,0	78,0	0,562·10 <sup>-3</sup>	1315,5	4417,7	2242
4	98,0	74,5	80,5	0,588·10 <sup>-3</sup>	1356,9	4405,6	2229
5	98,5	70,0	79,0	0,545·10 <sup>-3</sup>	1244,3	4468,6	2280
6	98,5	76,5	80,0	0,603·10 <sup>-3</sup>	1397,0	4517,0	2328
7	95,0	74,0	78,0	0,548·10 <sup>-3</sup>	1227,2	4282,0	2142
8	100,5	71,5	78,0	0,561·10 <sup>-3</sup>	1233,1	4413,4	2232
9	97,0	70,0	77,0	0,523·10 <sup>-3</sup>	1128,6	4455,1	2272
Среднее значение						4427,8	2251,1

Прочность образцов бетона определяли на образцах-плитах по ГОСТ 1152–99 «Плиты тротуарные и камни бортовые бетонные вибропрессованные. Методы определения прочности и морозостойкости» с переходным коэффициентом  $K = 1,0$  (принятым по фактическим данным предприятия-изготовителя), а также на образцах-кубах из половинок плит при испытуемом сечении  $100 \times 100$  мм и высоте «80 мм» с поправочным коэффициентом 0,95 (как для образцов  $100 \times 100 \times 100$  мм по ГОСТ 10180); при сечении, примерно  $80 \times 80$  мм (2 грани) –  $k = 0,9$ ; при сечении  $\sim 110 \times 80$  мм –  $k = 0,85$ .

Данные о прочности бетона в состоянии естественной влажности приведены в табл. 4.7,а, из которых следует, что ее величина, определенная на разных по конфигурации образцах, примерно одного уровня и соответствует приблизительно 36 МПа.

Таблица 4.7а

Прочность бетона образцов

№ п/п	Фактический показатель прочности при испытании, МПа	Переходный коэффициент К	Прочность бетона, МПа
<b>Образцы-плиты</b>			
1	37,8	1,0	37,8
2	35,1	1,0	35,1
3	36,5	1,0	36,5
Среднее значение			36,5
<b>Образцы- (1 грань)</b>			
4	37,8	0,95	35,9
5	36,3	0,95	34,5
6	38,6	0,95	36,7
Среднее значение			35,7
<b>Образцы- (2 грани)</b>			
7	38,0	0,9	34,2
8	41,4	0,9	37,3
9	42,3	0,9	38,1
Среднее значение			36,5
<b>Образцы- (3 грани)</b>			
10	43,3	0,85	37,7
11	42,6	0,85	36,2
12	43,2	0,85	36,7
Среднее значение			36,9

Водопоглощение бетона определяли по ГОСТ 12730.3, вначале водонасыщая образцы до постоянной массы ( $\Delta m \leq 0,1 \%$ ), затем высушивая до постоянной массы. В табл. 4.7,б представлены данные о полученных результатах исследований, из которых следует, что водопоглощение бетона в целом (средние значения) ниже, допускаемых 6 % для тротуарных плит из мелкозернистого бетона.

Величины средних значений водопоглощения бетона, соответственно, образцов-плит, образцов-кубов с разрезкой на «1 грань», «2 грани» и «3 грани» закономерно возрастают и равнялись: 2,1; 4,4; 4,6 и 5,4 %. Этот факт свидетельствует о следующем.

Таблица 4.7б

Водопоглощение бетона

№ п/п	Масса образцов, г			Водопоглощение бетона по массе, %
	при естеств. вл.	водонасыщенных	сухих	
1	2	3	4	5
<b>Образцы-плиты</b>				
1	3530,4	3585,9	3520,3	1,9
2	3614,1	3682,1	3607,5	2,1
3	3598,4	3673,3	3590,3	2,3
Среднее значение				2,1
<b>Образцы-кубы (1 грань)</b>				
1	1698,3	1766,9	1687,4	4,7
2	1655,5	1739,7	1640,2	6,1
3	1657,4	1727,3	1649,1	4,7
Среднее значение				4,4
<b>Образцы-кубы (2 грани)</b>				
1	1619,0	1642,1	1559,7	5,3
2	1558,8	1578,6	1515,3	4,2
3	1502,5	1532,9	1469,8	4,3
Среднее значение				4,6
<b>Образцы-кубы (3 грани)</b>				
1	1315,0	1329,6	1256,5	5,5
2	1352,0	1366,0	1305,9	4,4
3	1390,8	1410,2	1322,8	6,2
Среднее значение				5,4

Во-первых, водопоглощение бетона целых плит значительно ниже фактического физического объема пор бетона. В разрезанных образцах оно нарастает, в сравнении с плитами. Причина низкого водопоглощения бетона целых плит, есть проявление эффекта от введения гидрофобизирующей добавки и особенностей уплотнения бетона при виброформовании жестких бетонных смесей.

В процессе виброформования жестких смесей эффект тиксотропии развивается не равномерно по сечению формуемого изделия. Максимален он в зоне контакта формообразующих устройств с бетоном. Именно здесь, по контуру изделия (в данном случае – тротуарных плит) в наибольшей мере наблюдается выделение «свободной» воды, а в ней содержатся молекулы вещества гидрофобизирующей добавки.

Эти крупные молекулы, обладающие гидрофобными свойствами выполняют и другую роль: они понижают адгезию разжиженного слоя цементного теста к поверхности формообразующих элементов (поддона, стенок матрицы и пригруза), снижая (или устраняя полностью) явление налипания цементного теста на поверхность пригруза (матрицы)

Вследствие эффекта миграции с водой молекул добавки в процессе формования концентрация этих веществ в «пристенном» слое бетона (по наружному контуру изделия) возрастает. Одновременно, за счет более значительного проявления эффекта тиксотропии, растет плотность наружного слоя бетона, в сравнении с внутренним его объемом. Последний эффект тем значительнее, чем ниже водоцементное отношение формуемой жесткой бетонной смеси и, соответственно, больше разница между необходимой для такой жесткости интенсивностью вибровоздействия (частота, амплитуда колебаний и давление прессования) и фактической при уплотнении бетона.

Отмеченная неравнозначность по плотности (пористости, а значит – непроницаемости для воды) и содержанию гидрофобизирующих веществ наружного и внутренних слоев (объемов) бетона приводит к тому, что при разрезке образцов «вскрываются» более пористые объемы материала, с меньшим эффектом гидрофобизации.

Как следствие, закономерно возрастает водопоглощение бетона образцов и тем больше, чем значительнее площадь поверхно-



сти разреза, что и подтверждают экспериментальные данные табл. 4.7,б.

#### ***4.2.2. Морозостойкость бетона по изменению массы, прочности, скорости ультразвука***

Сравнительные испытания морозостойкости бетона контрольных образцов в виде плит и образцов-кубов, полученных разрезкой плит, осуществляли в соответствии с требованиями СТБ 1152–99 по ГОСТ 10060, по третьему методу ( $t = -50...-55^{\circ}\text{C}$ ; испытательная среда - 5%-й раствор NaCl). Все образцы загружались и выгружались из камеры одновременно, т.е. испытывались в одинаковых условиях. Результаты испытаний в динамике изменения массы, прочности и скорости ультразвука представлены в таблицах 4.8 и 4.9. Прочность бетона в водонасыщенном состоянии в начале испытаний для образцов соответствовала  $\sim 36$  МПа (здесь и далее значения прочности бетона плит и других образцов приведены с учетом поправочного коэффициента  $K$ , значения которого приведены в табл. 4.7а).

В процессе насыщения образцов в водном растворе соли определили изменение при этом скорости ультразвука при сквозном прозвучивании и с поверхности (вдоль верхней грани образцов-плит), а также в процессе испытаний на морозостойкость (через каждые 5 циклов замораживания-оттаивания) с целью накопления данных о возможности использования ультразвука для контроля за изменением качества бетона в процессе эксплуатации тротуарных (дорожных) покрытий.

##### **А. Результаты испытаний образцов-плит (целые)**

Изменения прочности бетона плит (табл. 4.8) в процессе попеременного замораживания-оттаивания аналогичны ранее установленным закономерностям. Так, наблюдается ее рост до 10 циклов, а к 15 циклам среднее значение прочности бетона  $\sim 36$  МПа, т. е. равно начальному, и к 20 циклам снижается до 32 МПа, т. е. на 11 % от начального значения. Схема приложения нагрузки в этих экспериментах отличалась от стандартной (предполагает испытания с расположением пластин по геометрическому центру образца такого

типоразмера, что несколько повышает значение прочности, в сравнении с использованной в настоящих исследованиях). В данном случае прочность определяли при сжатии (через пластины 100 x 100 x 20 мм) края плиты, что ближе по физической сути к испытаниям образцов-кубов, полученных резкой. Поэтому схема загрузки края плиты была принята для большей сопоставимости результатов сравнительных исследований натуральных образцов-плит и образцов-кубов. Изменения скорости ультразвука коррелируется с данными изменений прочности бетона и отражают соответствующие изменения в его структуре. Уплотнение и упрочение последней до 10 циклов сопровождается ростом скорости ультразвука при сквозном и прозвучивании с поверхности. Очевидно, что несмотря на заметную разницу в абсолютных значениях скорости ультразвука, определенную «с поверхности» и при сквозном прозвучивании бетона образцов и примерно равную 350–600 м/с тенденции их изменений общие, что подчеркивается (для равных других условий) их синхронностью. Это означает, что установленные в рамках выполненных экспериментов закономерности распространения ультразвука при сквозном прозвучивании бетона аналогичны для прозвучивания с поверхности. Такой вывод подтверждает и общая динамика измерений скорости ультразвука: в обоих случаях наблюдается более высокий темп роста при начальном водонасыщении, некоторое замедление роста на начальной фазе замораживания-оттаивания образцов (до 10-15 циклов), затем кратковременная стабилизация (при прекращении роста плотности и прочности бетона), после которой снижение скорости ультразвука идет нарастающим темпом, что отражает начало и развитие процесса деструкции бетона.

Это свидетельствует о возможности использования ультразвукового метода и, в частности, прозвучивания «с поверхности» для оперативного контроля ожидаемой морозостойкости бетона [114, 116], а также для контроля за состоянием и для прогноза вероятной (остаточной) долговечности бетона эксплуатируемых плит и покрытий из них [114, 115].

Таблица 4.8

## Морозостойкость бетона контрольных образцов-плит

№ обр.	Ест. влажн.			Насыщение						5 циклов					10 циклов				
	V <sub>ос</sub> , м/с		m <sub>0</sub> , г	V <sub>нас</sub> , м/с		Δm, г	m <sub>п</sub> , г	V <sub>1</sub> , м/с	Δm, г	m <sub>п</sub> , г	Δm, г	f c, МПа	V <sub>2</sub> , м/с		m <sub>2</sub> , г	Δm, г	f c, МПа		
	УК-1401	УК-14П		УК-1401	УК-14П								УК-1401	УК-14П				УК-1401	УК-14П
1	5020	4407	3483,4	5140	4407	3534,9	51,5	5100	4407	3551,6	16,7	—	5030	4382	3555,0	3,4	38,0		
2	4950	4538	3528,5	5100	4460	3556,7	28,2	5120	4460	3585,5	28,8	—	5030	4460	3588,9	3,4	35,4		
3	5080	4399	3629,1	5120	4423	3665,3	36,2	5070	4399	3687,7	22,4	—	5080	4399	3690,4	2,7	39,2		
4	4690	4278	3469,6	4750	4301	3563,2	93,6	4730	4255	3574,6	11,4	—	4730	4255	3583,3	8,7	—		
5	5050	4413	3499,0	5070	4489	3538,2	39,2	5080	4463	3559,9	21,7	—	5050	4438	3564,1	4,2	—		
6	5100	4438	3524,0	5080	4514	3567,1	43,1	5080	4463	3590,2	23,1	—	5050	4413	3595,3	5,1	—		
7	4980	4365	3520,3	5100	4365	3585,9	65,6	5060	4370	3605,9	20,0	—	5080	4370	3608,9	3,0	—		
8	5080	4567	3607,5	5190	4540	3642,1	34,6	5010	4540	3660,1	18,0	—	5130	4540	3662,6	2,5	—		
9	5050	4410	3590,3	5100	4410	3613,3	23,0	5100	4520	3637,4	24,1	—	5080	4520	3641,9	4,5	—		
№ обр.	15 циклов			20 циклов			25 циклов			30 циклов									
	V <sub>3</sub> , м/с		m <sub>3</sub> , г	V <sub>4</sub> , м/с		m <sub>4</sub> , г	V <sub>5</sub> , м/с		m <sub>5</sub> , г	Δm, г	f c, МПа	V <sub>6</sub> , м/с		m <sub>6</sub> , г	Δm, г	f c, МПа			
	УК-1401	УК-14П		УК-1401	УК-14П		УК-1401	УК-14П				УК-1401	УК-14П						
4	4690	4360	3594,0	10,7	36,0														
5	5000	4470	3572,9	8,8	37,3														
6	4950	4425	3604,6	9,3	34,4														
7	5011	4210	3617,4	8,5	—	4880	3940	3620,4	3,0	33,3									
8	5100	4311	3672,6	10,0	—	4940	3980	3676,6	4,0	30,9									
9	4940	4385	3650,9	9,0	—	4890	4075	3654,9	4,0	32,1									

Эксперимент прекращен

## Б. Результаты испытаний образцов-кубов (разрезанные)

В табл. 4.9 приведены данные об испытаниях образцов-кубов бетона, полученных из разрезанных плит, на морозостойкость, при контроле изменений скорости ультразвука (сквозное прозвучивание, прибор УК-14П), изменений массы и прочности бетона после 10 и 20 циклов. Начальная прочность бетона образцов-кубов в насыщенном растворе соли состоянии равнялась  $\sim 36$  МПа (с учетом поправочных коэффициентов).

Из полученных данных следует, что процесс деструкции бетона образцов, изготовленных распиловкой и имеющих грани с «вскрытой» структурой бетона развивается быстрее, чем исходных изделий (в данном случае целых плит). При этом, чем больше разрезов поверхности плит было при изготовлении образцов-кубов, тем значительнее растет количество поглощаемой ими воды в начальный период испытаний и тем резче снижается прочность бетона в процессе испытаний на морозостойкость.

Так прочность бетона образцов, разрезанных по 3 граням через 10 циклов замораживания-оттаивания снизилась от начальной (около 36 МПа) до 23,6 МПа (т.е. 34 %); разрезанных по 2 граням – до 30 МПа (16,7 %) через 10 циклов и до 23,6 МПа (т. е. 34 %) через 15 циклов.

В целом влияние разрезки изделий из вибропрессованного бетона на снижение показателя его морозостойкости выражается следующими изменениями прочности бетона в процессе испытаний.

При разрезке плит пополам (1 грань с разрезом) снижение прочности бетона составило через 10 циклов  $\sim 3,6$  % (34,7 МПа); через 15 циклов  $\sim 12,6$  % (31,4 МПа) и через 20 циклов  $\sim 30$  % (25,3 МПа) от начальной прочности 36 МПа. В сравнении с данными об изменении прочности бетона целых плит при разрезке их на 2 части соотношение прочности (при примерно равной начальной – 36 МПа) следующее:

- 10 циклов: плита – 37,5 МПа; кубы – 34,7 МПа ( $-7,5$  %);
- 15 циклов: плита – 35,9 МПа; кубы – 31,4 МПа ( $-12,5$  %);
- 20 циклов: плита – 32,1 МПа; кубы – 25,3 МПа ( $-21$  %).

Таблица 4.9  
Морозостойкость бетона контрольных образцов-кубов, полученных разрезкой плит

№	Ест. влажн.		Насыщ.		5 циклов			10 циклов			15 циклов						
	V <sub>0</sub> , м/с	m <sub>0</sub> , г	V <sub>нр</sub> , м/с	m <sub>нр</sub> , г	Δm, г	V <sub>1</sub> , м/с	m <sub>1</sub> , г	Δm, г	V <sub>2</sub> , м/с	m <sub>2</sub> , г	Δm, г	f <sub>c</sub> , МПа	V <sub>3</sub> , м/с	m <sub>3</sub> , г	Δm, г	f <sub>c</sub> , МПа	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
<b>Образцы-кубы (1 грань)</b>																	
1	4566	1711,9	4463	1750,0	38,1	4463	1750,3	0,3	4365	1758,3	8,0	33,6					
2	4489	1720,7	4463	1749,6	28,9	4514	1755,2	5,6	4365	1758,0	-2,8	36,4					
3	4444	1832,3	4494	1839,8	7,5	4494	1848,0	8,2	4571	1850,7	2,7	34,1					
4	4301	1762,7	4372	1808,6	45,9	4396	1805,0	-3,6	4372	1817,4	12,4	-	4260	1816,4	1,0	30,5	
5	4540	1729,0	4540	1748,9	19,9	4540	1755,7	6,8	4540	1757,2	1,5	-	4490	1760,8	3,6	38,0	
6	2992	1699,0	4158	1788,9	89,9	4202	1809,2	20,3	4072	1803,2	6,0	-	4060	1806,0	2,8	31,8	
7	3236	1687,4	4262	1766,9	79,5	4300	1772,9	6,0	4310	1775,9	3,0	-	4280	1777	1,1	-	
8	2807	1640,2	4082	1739,7	99,5	4124	1745,2	5,5	4128	1746,8	1,6	-	4090	1751,3	4,5	-	
9	3217	1649,1	4243	1727,3	78,2	4252	1730,1	2,8	4301	1735,1	5,0	-	4130	1741,1	6,0	-	
<b>Образцы-кубы (2 грани)</b>																	
1	4450	1230,1	4451	1246,5	16,4	4451	1255,7	9,2	4326	1259,4	3,7	29,4					
2	4438	1215,9	4463	1231,1	15,2	4438	1244,5	13,4	4247	1247,3	2,8	31,7					
3	4535	1315,5	4457	1329,6	14,1	4483	1342,6	13,0	4358	1345,3	2,7	28,1					
4	4522	1356,9	4548	1366,0	9,1	4574	1375,3	9,3	4375	1378,0	2,7	-	3180	1383,0	5,0	23,4	
5	4489	1244,3	4489	1259,3	15,0	4514	1272,6	13,3	4293	1274,9	2,3	-	3450	1276,0	1,1	26,0	
6	4520	1397,0	4520	1410,2	13,2	4546	1422,8	12,6	4444	1424,9	2,1	-	3490	1424,1	-0,9	21,5	

Окончание табл. 4.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
7	4497	1559,7	4237	1642,1	82,4	4230	1379,0	10,0	4160	1379,0	0	–	3880	1383	4,0	–
8	4341	1515,3	4247	1578,6	63,3	4228	1401,0	9,0	3900	1399,3	-1,7	–	3170	1300	1,0	–
9	4406	1469,8	4430	1532,9	63,1	4380	1298,0	11,5	4180	1239,0	1	–	3780	1243	4,0	–
<b>Образцы-кубы (3 грани)</b>																
1	4427	1477,2	4477	1494,7	17,5	4452	1511,0	16,3	4330	1512,6	1,6	21,6	Эксперимент прекращен			
2	4270	1481,4	4317	1508,9	27,5	4317	1515,3	6,4	4293	1519,4	4,1	27,4				
3	4297	1479,6	4368	1498,3	18,7	4344	1519,8	21,5	4274	1518,8	-1,0	21,9				
4	4174	1486,4	4241	1514,3	27,9	4196	1537,1	22,8	4130	1540,7	3,6	–				
5	4320	1466,2	4273	1490,1	23,9	4297	1501,0	10,9	4297	1501,5	0,5	–				
6	4321	1594,4	4569	1617,0	22,6	4517	1620,6	3,6	4466	1631,2	10,6	–				
7	4382	1227,2	4382	1285,0	57,8	4300	1305,0	20,0	4080	1304,0	-1,0	–				
8	4309	1233,1	4333	1296,3	63,2	4150	1311,3	15,0	3900	1312,1	0,8	–				
9	4278	1128,6	4010	1194,5	65,9	4008	1203,3	8,8	3950	1204,8	1,5	–				
№	20 циклов						25 циклов						30 циклов			
	V <sub>1</sub> , м/с	m <sub>1</sub> , г	Δm, г	f <sub>c</sub> , МПа	V <sub>2</sub> , м/с	m <sub>2</sub> , г	Δm, г	f <sub>c</sub> , МПа	V <sub>3</sub> , м/с	m <sub>3</sub> , г	Δm, г	f <sub>c</sub> , МПа	V <sub>c</sub> , м/с	m <sub>c</sub> , г	Δm, г	f <sub>c</sub> , МПа
а) образцы-кубы (1 грань)																
7	3362	1766,1	5,8	24,2	Эксперимент прекращен											
8	3391	1765,5	2,8	28,7												
9	4324	1854,1	0,2	22,0												

Сопоставление данных о результатах испытаний образцов-кубов разрезанных по 2 и 3 граням свидетельствуют о резком падении их морозостойкости, в сравнении с целыми плитами. Эксперименты были прекращены, соответственно после 15 и 10 циклов, так как прочность бетона к этому моменту снизилась до 30 % и более от ее начального значения (около 36 МПа).

Адекватно с изменениями прочности изменялась скорость ультразвука: она начала снижаться к 10 циклам испытаний образцов с разрезами по 3 и 2 граням; после 10 циклов – с разрезом 1 грани и после 15 циклов при испытаниях целых плит. Такая же общая зависимость характерна для изменений массы образцов.

Основными причинами являются «вскрытие» более пористой структуры бетона и возникающие микротрещины по разрезаемой поверхности. Если при определении прочности на сжатие последние практически не оказывают влияния, т.к. расположены по нормали или под углом к направлению действия приложенной нагрузки и «закрываются» при сжатии образца, то при циклических испытаниях на морозостойкость в сочетании с солевой коррозией они приобретают решающее значение. Этот вывод обоснован как ранее приведенным анализом важнейших работ в области морозостойкости (солестойкости) бетона, так и всем комплексом выполненных в данной работе исследований. «Вскрытая» пористость бетона и зародившиеся при разрезе бетона микротрещины его поверхности при циклических испытаниях (особенно с глубоким замораживанием в растворе соли) не закрываются, а интенсивно развиваются, приводя к ускоренной деструкции бетона. Фактически процесс разрезки выполняет роль начальной стадии испытаний целых образцов до момента появления микротрещин в бетоне. В разрезанных образцах они присутствуют уже к началу испытаний. Изложенное подтверждается наблюдениями за изменением поверхности образцов бетона в процессе испытаний. Явные признаки размораживания: шелушение, округление ребер, отслоения участков, проявляются именно со стороны разреза.

Сопоставляя данные по морозостойкости целых плит и образцов после разрезки следует отметить влияние на процесс деструкции бетона гидрофобизирующей добавки.

Так, начальное водопоглощение по массе бетона целых плит составило всего около 2 %. Это очень низкое значение водопоглоще-

ния и если бы оно было получено за счет плотности бетона, то соответствовало бы его морозостойкости не менее 500 циклов в солевой среде [23, 60]. Для сравнения - водопоглощение такой горной породы как гранит составляет 0,5–1,5 %.

В данном случае указанное низкое водопоглощение получено за счет применения гидрофобизирующей добавки и не отражает физической сущности (состояния) пористости цементного камня и бетона в целом.

Как это видно из данных таблицы 4.7,б, при первоначальном водонасыщении бетон «набирает» относительно небольшой объем воды (на  $W_m \sim 2\%$ ). Но через 5 циклов замораживания-оттаивания водопоглощение нарастает до реального физического объема пор бетона (выравнивается с водопоглощением на разрезанных образцах (см. табл. 4.7,б и 4.9), т. е. гидрофобизирующее действие добавки по существу исчезает.

Одновременно введение гидрофобизирующей добавки существенно повлияло на прочность бетона, а именно: снизило ее до 36 МПа, от наиболее вероятного значения в 50–60 МПа (и даже более) для бетона примененного состава по качеству и расходу цемента, величине водоцементного отношения, качества заполнителя и степени (качества) уплотнения. В результате этого существенно снизилась способность структуры бетона воспринимать действие знакопеременных деформаций и других разрушающих факторов, сопутствующих процессу испытаний (эксплуатации) и подробно рассмотренных в главе 1, что, как следствие, понижает морозостойкость и долговечность бетона.

### **4.3. Снижение морозостойкости бетона под влиянием статической и динамической нагрузок**

Для оценки влияния механических нагрузок на изменение морозостойкости бетона в процессе эксплуатации покрытий из элементов мощения накопление экспериментальных данных осуществляли поэтапно [114]. Вначале образцы бетона (мелкозернистого и с крупным заполнителем) подвергали испытаниям на морозостойкость (без и с приложением механических нагрузок) в водной среде; а затем на второй стадии испытаний – с использованием 5%-го раствора NaCl. В обоих случаях в процессе испытаний на морозостой-



кость отслеживали изменения массы, прочности бетона и соответствующие изменения скорости ультразвука, отражающие структурные изменения в испытываемых образцах бетона.

*Общая методика исследований.* В исследованиях использовали материалы для бетона по п. 2.2. Образцы для испытаний готовили из цементно-песчаного бетона (цемента – 500 кг; песка – 1600 кг) и бетона со щебнем гранитным (цемента – 450 кг; щебня – 600 кг; песка – 1150 кг) при водоцементном отношении В/Ц  $\sim 0,33$ – $0,36$  и  $0,36$ – $0,40$ , соответственно, при показателе жесткости  $\mathcal{J} \sim 15$ – $25$  с. Образцы бетона уплотняли на виброплощадке со стандартными параметрами ( $A = 0,5$  мм;  $f \approx 50$  Гц) в течение времени и под пригрузом, обеспечивающим получение расчетного качества (степени) уплотнения свежесформованного бетона, которое оценивали по средней плотности, принятой не ниже  $2250 \text{ кг/м}^3$  для цементно-песчаного бетона и для бетона со щебнем  $\geq 2350 \text{ кг/м}^3$ .

Данные по определенным в исследованиях характеристикам бетона получены как средние значения с соблюдением правил обработки результатов испытаний, установленных в соответствующих стандартах; прочность на сжатие приведена к образцам «базового» размера  $150 \times 150 \times 150$  мм. Во всех случаях образцы испытывали по достижении проектного возраста (28 сут) после изготовления.

Учитывая существенное влияние на эксплуатационные свойства бетона условий его твердения и практикуемые варианты твердения изделий серии образцов хранили: в условиях гидроизоляции (в полиэтиленовой пленке); на воздухе (со средней температурой около  $18$ – $23$  °С и относительной влажностью  $60$ – $70$  %) и пропаривали (по режиму: предварительная выдержка – 2 ч; подъем температуры в ямной камере до  $50$  °С – 2 ч; изотермическая выдержка – 6,5 ч; остывание – 6–10 ч) с последующим «дозреванием» в помещении лаборатории.

Исследования осуществили на трех партиях образцов. Для первой партии циклическое замораживание-оттаивание вели по 3-му методу ГОСТ 10060–95 как для дорожного бетона с охлаждением образцов ( $70 \times 70 \times 70$  мм) до  $-(50\dots55)$  °С и оттаивание при  $18 \pm 2$  °С в жидкости, но вместо 5%-го водного раствора NaCl в емкостях использовали водопроводную воду. На этом этапе исследований исключили влияние солевого воздействия на бетон.

Вторую партию образцов циклически насыщали в 5%-м растворе NaCl (температура около 15–18 °С) в течение 16 ч с последующим высушиванием в сушильном шкафу при температуре 60 °С в течение 7–8 ч. Условия эксперимента были ужесточены тем, что разогретые при высушивании образцы бетона помещали в раствор соли без предварительного охлаждения на воздухе. Этот вариант испытаний бетона приведен с целью подтверждения того факта, что агрессивное действие солей-антиобледенителей не прекращается в теплый период года, вызывая дополнительное деструктивное воздействие на бетон, в частности, при колебаниях его влажности и температуры в весенне-осенний период.

Третью партию образцов бетона подвергали стандартным испытаниям замораживанием-оттаиванием по 3-му методу ГОСТ 10060-95 при температуре – (50–55) °С в 5%-м растворе NaCl.

Статическую механическую нагрузку на образцы бетона имитировали однократным нагружением их после оттаивания (через каждые 5 циклов замораживания-оттаивания) под прессом с усилием, примерно до 20, 30, 50 и 70 % от прочности бетона в проектном возрасте (28 сут), а при испытаниях на солестойкость – с такой же периодичностью и усилиями, но после насыщения в растворе соли. Уровень нагрузки в МПа для образцов мелкозернистого бетона соответствовал ( $f_{cm,28} \sim 44$  МПа) 10; 20; 25; 30 МПа; для образцов бетона со щебнем ( $f_{cm,28} \sim 53$  МПа) соответственно: 15; 25; 30; 35 МПа.

Динамическую (ударную, сосредоточенную) механическую нагрузку на оттаявшие (насыщенные в растворе соли) образцы бетона имитировали 10 ударами копра – плотномера динамического (СТБ 1242–2000; масса груза – около 2,5 кг; высота падения – 300 мм; точка касания – острие конуса с углом при вершине 60° по одной из их поверхностей (верхняя грань при последующем определении прочности на сжатие) через каждые 5 циклов замораживания-оттаивания (насыщения-высушивания).

Периодичность испытаний бетона по различным показателям: изменению массы, прочности, скорости ультразвука, истираемости, приведена в тексте, так же как и особенности методик отдельных экспериментов.

Для получения сравнительных характеристик в каждой партии образцов бетона имелись контрольные, которые подвергали цикли-

ческому замораживанию-оттаиванию (насыщению-высушиванию) без дополнительного воздействия механических нагрузок.

#### ***4.3.1. Изменение массы образцов бетона при испытании в водной среде и солевом растворе***

##### **А. Влияние условий твердения и испытаний**

Образцы бетона взвешивали на лабораторных электронных весах с точностью до 0,1 г, предварительно убрав с поверхности влажных образцов избыток жидкости влажной тканью до «матового» состояния их поверхности. Влага, в отдельных случаях появлявшаяся на поверхности площадки весов, засчитывалась в вес образца.

Исследования выполнены с учетом необходимости сравнительного анализа закономерностей изменения массы образцов бетона, подвергнутых раздельному воздействию замораживания-оттаивания в воде, насыщения в растворе соли-высушивания и данных о замораживании-оттаивании в растворе соли, что позволяет оценить уровень влияния каждого из этих факторов на процесс деструкции бетона как в сравнении между ними, так и при их совместном действии на бетон.

Тенденция изменения массы контрольных образцов бетона при циклических испытаниях на морозостойкость в водной среде и растворе соли представлена на рис. 4.1. Анализ результатов исследований свидетельствует о следующем.

Очевидна общая тенденция «поведения» образцов бетона (как цементно-песчаного, так и со щебнем) при циклических испытаниях как на морозостойкость (в воде и растворе соли), так и при испытаниях на солестойкость, заключающаяся в поглощении его порами «дополнительного» (к водонасыщению в течение 96 ч) количества воды или раствора соли. Это связано с рядом причин: проникновением жидкости в поры, не заполненные ей в процессе водонасыщения, с накоплением в них вещества соли, а также со своеобразным «ускоряющим» воздействием переменного замораживание-оттаивание бетона в водных условиях на течение и развитие процесса гидратации цемента и «дополнительного» связывания им воды. Явно выражена общая закономерность перехода от положительной к отрицательной динамике в изменениях массы образцов после

определенного количества циклов испытаний. Так, при испытаниях на морозостойкость в растворе соли и воде снижение массы образцов зафиксировано к 15 циклам для мелкозернистого бетона и к 20 циклам - для бетона со щебнем. В дальнейшем наблюдается существенный рост темпа деструкции бетона в солевой среде, выраженный ускоренным снижением массы образцов.

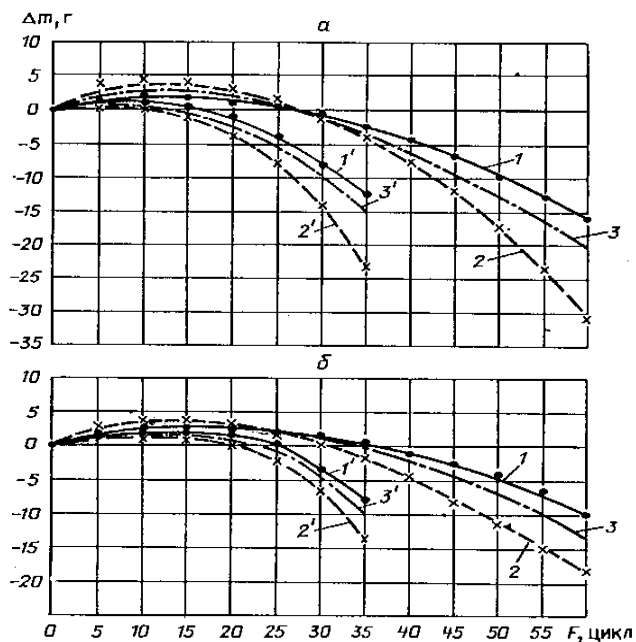


Рис. 4.1. Тенденция изменения массы основных образцов бетона под воздействием циклического замораживания-оттаивания при  $t = -(50...55)^\circ\text{C}$ :

*a* – мелкозернистый бетон; *б* – бетон со щебнем.

Графики № 1, 2 и 3 для образцов, твердевших, соответственно, «под пленкой», в воздушно-сухих условиях, пропаренных с дозреванием и испытанных в «среде-воде», со штрихом – испытанных в растворе соли

Сравнение результатов испытаний на морозостойкость и солеустойкость бетона (насыщение в растворе NaCl → высушивание при  $t \sim 60^\circ\text{C}$  → помещение образцов в раствор ( $t \sim 10-15^\circ\text{C}$ ) без охлаждения) показывает, что «насыщение-высушивание» в таком

варианте приводит к деструкции бетона быстрее, чем замораживание-оттаивание даже в солевом растворе. С одной стороны, это проявление жестких условий «работы» бетона при испытаниях на солестойкость в сочетании с резким жидкостным охлаждением. А с другой – это свидетельство того, что применение в зимний период хлоридных антиобледенителей неизбежно сопровождается их разрушающим воздействием на бетон и в летний период. Периодическое увлажнение-высушивание бетона (накопившего в порах соль зимой) с весны по осень хотя и с меньшей интенсивностью, чем в эксперименте, но продолжает разрушающее воздействие на структуру материала.

Во всех вариантах испытаний видно отрицательное влияние воздушно-сухих условий твердения бетона, проявляющееся в ускоренном снижении массы образцов.

Изменения массы образцов пропаренного по «мягкому» режиму бетона с последующим хранением в воздушно-сухих условиях занимают промежуточное положение, но при этом они значительнее по этому показателю, чем у образцов, твердевших 28 сут под пленкой (в условиях гидроизоляции).

Следует отметить, что все испытанные на морозостойкость в растворе соли серии контрольных образцов бетона по показателю снижения массы не превысили допустимого значения ее потерь в 3 %. Например, для образцов мелкозернистого бетона воздушно-сухих условий твердения к 35 циклам (~ F 300) потери массы составили около 2,6 %; для остальных – меньше.

#### Б. Влияние механических нагрузок на изменения массы образцов

На рис. 4.2 приведены данные об изменениях массы основных образцов мелкозернистого бетона и бетона со щебнем, которые через каждые 5 циклов замораживания-оттаивания (насыщения-высушивания) подвергали воздействию статической нагрузки на сжатие под прессом. Результаты испытаний приведены для образцов бетона, твердевших в условиях гидроизоляции, т. е. под полиэтиленовой пленкой.

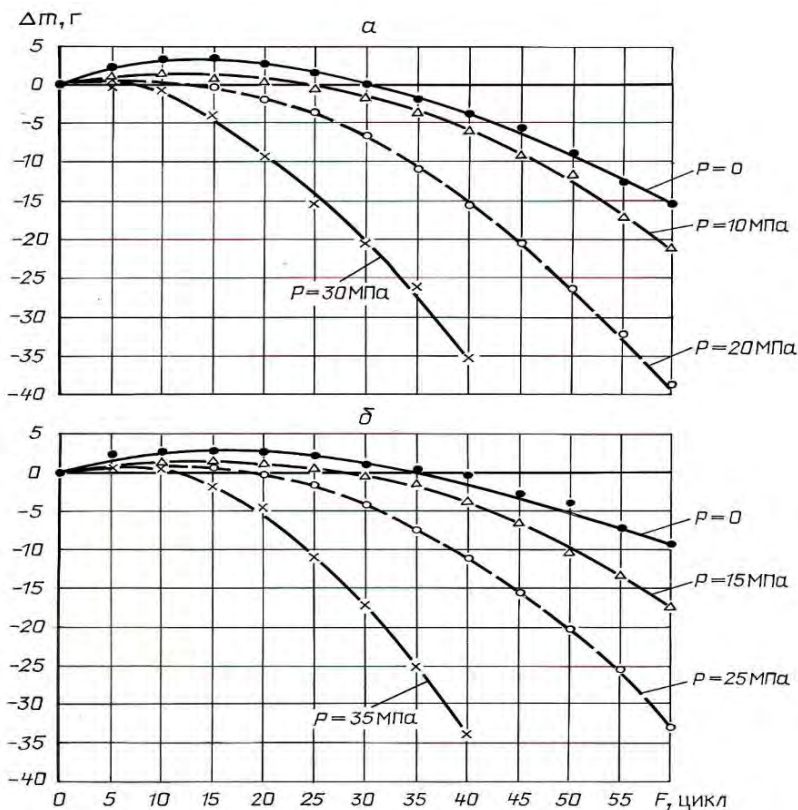


Рис. 4.2. Тенденция изменения массы основных образцов бетона под воздействием циклического замораживания-оттаивания в водной среде при  $t = -(50 \dots 55)^\circ\text{C}$  и механической нагрузки: а – мелкозернистый бетон; б – бетон со щебнем.

Графики № 1,2 и 3 для образцов, твердевших, соответственно, «под пленкой», в воздушно-сухих условиях, пропаренных с дозреванием и испытанных в водной среде, со штрихом – испытанных в растворе соли

Из полученных данных следует, что статическая механическая нагрузка в пределах до 30–40 % от прочности на сжатие бетона проектного возраста (для цементно-песчаного – в 15 МПа; с крупным заполнителем – в 20 МПа) не вызывает заметных изменений в кинетике снижения массы бетона в процессе испытаний. Следует

учесть, что сам по себе метод с глубоким замораживанием оказывает значительное деструктивное воздействие на бетон.

С увеличением нагрузки примерно до 50 % от прочности проектного возраста, т. е. до 20 МПа (мелкозернистый бетон) и до 25 МПа (бетон со щебнем) потери массы в процессе испытаний начинают нарастать.

С ростом нагрузки до 25–30 МПа для мелкозернистого бетона и 30–35 МПа для бетона со щебнем, т. е. на уровне 60–70 % от прочности на сжатие бетона проектного возраста, деструктивные процессы интенсифицируются, что отражается в ускорении процесса потерь массы образцами за одинаковое количество циклов замораживания-оттаивания. Тенденция этих изменений отражена графическими зависимостями на рис. 4.2.

Сопоставление данных об изменении массы образцов бетона (мелкозернистого и со щебнем) по видам испытаний: на морозостойкость в растворе соли или в воде и на солестойкость, свидетельствует, что наиболее агрессивным воздействием на бетон были последние. Очевидно, это связано с дополнительным влиянием на структуру бетона «термического удара», возникающего при резком (жидкостном) охлаждении образцов, помещаемых после сушки ( $t \sim 60^\circ\text{C}$ ) в растворе соли ( $t \sim 10\text{--}15^\circ\text{C}$ ). При этом в наружных слоях бетона возникали касательные растягивающие напряжения (от «термического» сжатия их), приводящие к образованию микротрещин поверхности образцов. Такое воздействие, приложенное многократно в циклических испытаниях, дополняет и интенсифицирует разрушающее действие соли, что и подтверждено в экспериментах.

При испытаниях на морозостойкость термическое воздействие при оттаивании образцов тоже имеет место. Однако в этом случае (при оттаивании в жидкости) наружные слои бетона медленно нагреваются и механизм температурных деформаций иной, так как эти слои расширяются. Растягивающие напряжения наружные слои бетона испытывают при замерзании образцов, но и в этом случае резкого «термического удара» не наблюдается. В целом данные исследований свидетельствуют, что испытания на морозостойкость (даже в растворе соли) оказывают менее разрушающее влияние на бетон, чем испытания на солестойкость, выполненные по использованной методике.

Сравнение данных об изменении массы образцов бетона при испытаниях на морозостойкость в растворе соли и в воде позволяет сделать вывод о том, что солевая среда резко интенсифицирует процесс деструкции бетона, в сравнении с замораживанием-оттаиванием в воде. Интенсивность снижения массы (около 3–4 г за 5 циклов) контрольных образцов бетона к 30–35 циклам испытаний в солевой среде соответствует таковой к 60 и более циклам испытаний в «воде-среде». Если при этом бетон подвержен одновременно воздействию статической механической нагрузки, превышающей уровень 50 % проектной прочности бетона, и «солевому» замораживанию, процесс деструкции идет ускоренным темпом и уже к 15–20 циклам установлены равные потери массы образцов. То есть, в условиях выполненных экспериментов темп снижения массы образцов бетона, циклически замораживаемых-оттаиваемых в растворе соли, примерно в 2 раза выше, чем в водной среде. А с ростом при этом периодически прикладываемой нагрузки до 50 % и более от проектной он повышается в 3–4 раза в сравнении с испытаниями в водной среде.

Как будет показано далее, отмеченные закономерности характерны и для изменений других характеристик бетона, включая его прочность.

#### ***4.3.2. Прочность бетона в зависимости от условий твердения и действия статической нагрузки***

Исследования выполнены на образцах бетона, твердевших 28 сут. в естественных (под пленкой), воздушно-сухих условиях и в этих же условиях после пропаривания. Оттаявшие образцы основных серий через каждые 5 циклов однократно подвергали сжатию под прессом, передавая усилие на бетон, соответствовавшие давлению в 10; 20; 25 и 30 МПа для образцов мелкозернистого бетона и в 15, 25, 30 и 35 МПа – бетона со щебнем. Контрольные образцы всех серий замораживали и оттаивали одновременно с основными, но не подвергали механическому воздействию.

На рис. 4.3 и 4.4 приведены графические зависимости, отражающие выявленную тенденцию изменений прочности бетона.



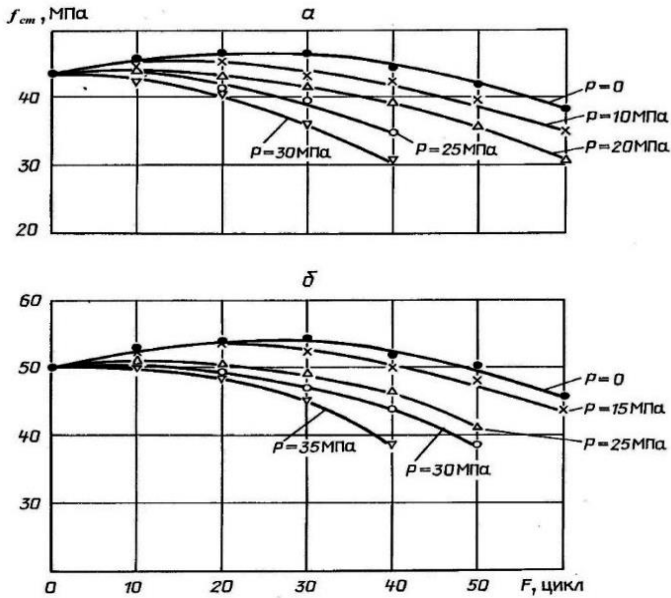


Рис. 4.3. Тенденция изменения прочности контрольных ( $P = 0$ ) и основных образцов бетона под воздействием циклического замораживания-оттаивания в среде-воде при  $t = -(50-55)^\circ\text{C}$  и механической нагрузки  
 $a$  – мелкозернистый бетон;  $b$  – бетон со щебнем

Следует отметить непосредственную взаимосвязь изменений прочности бетона как контрольных, так и основных образцов от условий их твердения и состояния структуры (пористости) материала. Во всех вариантах испытаний наименьшей прочностью характеризуется бетон, твердевший в воздушно-сухих условиях. Но даже и в этом случае после первых 10–20 циклов замораживания-оттаивания в растворе соли или в воде и до 10 циклов испытаний на солестойкость прочность образцов бетона (до уровня статической нагрузки в 10–20 МПа для мелкозернистого бетона и в 15–25 МПа для бетона со щебнем) несколько возрастает. Этот эффект значительно сильнее для образцов, твердевших «под пленкой» и пропаренных после изготовления.

Явление роста прочности бетона под знакопеременным температурным воздействием есть отражение специфического влияния по-

следнего на процесс гидратации цемента [18–23]. Необходимо подчеркнуть, что это явление имеет место (особенно при глубоком охлаждении) только в бетонах с достаточно высокой плотностью структуры. При циклическом замораживании-оттаивании бетона (например, достигшего проектной прочности и характеризующегося степенью гидратации цемента в 60–70 % при водопоглощении по массе в 3–4 %, как в нашем случае) все же продолжают развиваться (хотя и медленно) реакции гидратации цемента. Это их развитие сопровождается уплотнением и упрочнением структуры цементного камня и бетона по рассмотренному в п.1.2 «механизму» на основе данных исследований [23, 60].

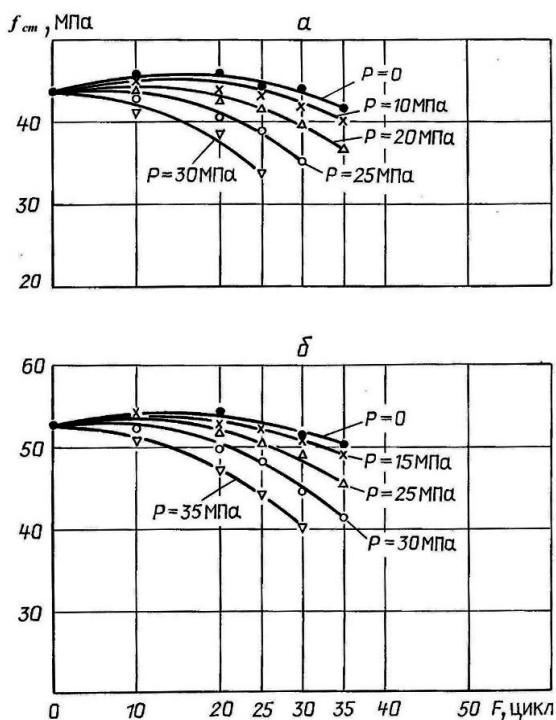


Рис. 4.4. Тенденция изменения прочности контрольных ( $P = 0$ ) и основных образцов бетона под воздействием циклического замораживания-оттаивания в растворе соли при  $t = -(50-55)$  °С и механической нагрузки:  
а – мелкозернистый бетон; б – бетон со щебнем

Одновременно с этим явлением знакопеременные температурные воздействия вызывают деструктивные процессы, подробно рассмотренные в 1-й главе. В результате на начальном этапе испытаний превалирует эффект побуждения гидратационного процесса, выражающийся в росте прочности бетона. С течением времени начинают преобладать деструктивные явления, которые в наших экспериментах усилены за счет механического воздействия периодически прикладываемой к образцам нагрузки. Под ее воздействием возникают напряжения в объеме цементного камня (особенно в зонах контакта его с заполнителями), приводящие к микротрещинообразованию и снижению прочности бетона.

В случае использования при замораживании-оттаивании раствора соли эффект начального роста прочности бетона в процессе испытаний имеет место, но менее значителен и кратковременен, так как на более раннем этапе проявляется деструктивное влияние соли.

При испытаниях на солестойкость в отличие от данных, полученных при переменном замораживании-оттаивании, более значителен кратковременный относительный прирост прочности для образцов воздушно-сухих условий твердения, то есть для более пористого бетона. Очевидно, что это связано с общей тенденцией роста прочности бетона при испытаниях на солестойкость в начальной стадии эксперимента, который обеспечивается за счет коагуляции открытых пор веществом соли (ее кристаллами). В результате на начальном этапе повышается однородность структуры цементного камня и бетона в целом, за счет частичной «ликвидации» (заполнения твердым веществом) ее дефектов. Как следствие, уменьшается количество зон с нарушениями сплошности структуры материала, которые под нагрузкой создают в нем напряженное состояние, являются концентраторами напряжений и вызывают зарождение трещин как под действием внешних нагрузок, так и резких перепадов температуры. В дальнейшем, с увеличением количества циклов испытаний, прочность более пористого бетона образцов воздушно-сухих условий твердения снижается в более высоком темпе, чем твердевших под пленкой и пропаривании, что, очевидно, связано с большим количеством «поглощаемой» его порами соли и меньшей прочностью бетона, а значит, способностью сопротивляться разрушающим структуре воздействиям.

Анализ данных испытаний бетона на морозостойкость в водной среде и в растворе соли свидетельствует, что для контрольных образцов (отсутствует механическая нагрузка) сохраняется общая закономерность некоторого роста прочности бетона на начальном этапе испытаний до 30–35 циклов в воде и до 10–20 циклов в растворе соли. Затем прочность бетона закономерно снижается при более высоком темпе для испытаний в солевом растворе. Если оценить эти изменения по количеству циклов, то получается, что влияние солевого раствора проявляется, примерно, в 2–3-кратном ускорении процесса деструкции (по началу снижения прочности) бетона.

Анализ комплексного воздействия на бетон эффектов «размораживания», солевого воздействия в сочетании с механическими нагрузками показывает следующее.

Если статически приложенная нагрузка не превышает 40 % от проектной прочности на сжатие кубов тяжелого бетона (соответствует уровню нижней границы трещинообразования, по О.Я. Бергу [117–119] до 30 % призмной прочности бетона-аналога), то при циклических испытаниях на морозостойкость (как в водной среде, так и в растворе соли) изменения в прочности бетона практически одинаковы для контрольных и нагружаемых образцов.

С ростом нагрузки до 50–60 % от проектной, т.е. превышающей нижнюю границу трещинообразования бетона (в условиях выполненных экспериментов составляющей до 20–25 МПа для мелкозернистого и до 25–30 МПа для бетона со щебнем), процесс его деструкции при циклических испытаниях на морозостойкость активизируется. Как уже обосновывалось в предыдущих разделах, происходит это потому, что возникающие под механической нагрузкой микротрещины в объеме бетона получают развитие под воздействием знакопеременных деформаций, миграции и проникновения в образующиеся нарушения структуры воды и других явлений, возникающих при переменном замораживании-оттаивании образцов в жидкой среде. Наличие в ней соли NaCl ускоряет процесс развития трещин от микрокапиллярного (сечением до 0,1 мкм) до макрокапиллярного (0,1–10 мкм) уровня, что в процессе испытаний делает бетон во все большей степени проницаемым. В результате в его объеме в процессе испытаний постоянно возрастает количество свободной воды, что приводит к росту градиента температурных деформаций бетона и ускоренно «расшатывает» его структуру.

На эти явления при среде – «солевой раствор», накладываются отрицательные эффекты воздействия соли и процесс деструкции бетона ускоряется.

В случае, когда механические нагрузки достигают уровня 65–75 % от проектной прочности на сжатие кубов бетона, т. е. соответствующего или превышающего (по О.Я. Бергу) верхнюю границу его трещинообразования (в экспериментах соответствовала 30 МПа для мелкозернистого и 35 МПа для бетона со щебнем), процесс деструкции и снижения прочности бетона прогрессирует уже после 10–20 циклов замораживания-оттаивания (при ускоренном развитии процесса в растворе соли). Это связано с тем, что означенный уровень нагрузки приводит к образованию в объеме бетона «необратимо» раскрытых трещин, не исчезающих после снятия нагрузки. Они проницаемы для воды и растворенной в ней соли, что (в сочетании со знакопеременными деформациями при циклическом замораживании-оттаивании) приводит к ускоренной деструкции бетона и резкому снижению его прочности.

Отмеченные закономерности изменения прочности бетона в процессе испытаний на морозостойкость в водной и солевой среде (при наличии воздействия на образцы статической механической нагрузки и без нее) как установлено в экспериментах, отражаются соответствующими закономерными изменениями скорости ультразвука.

#### ***4.3.3. Изменение скорости ультразвука при действии статической нагрузки***

Параллельно с испытаниями бетона на прочность оценивали изменения скорости ультразвука с целью накопления данных о взаимосвязи этих характеристик со структурными изменениями в бетоне. Тенденция этих изменений отражена графически на рис. 4.5 и 4.6.

Для образцов каждой серии устанавливали скорость ультразвука после водонасыщения за 96 ч (значения  $V_{yz}$  при количестве циклов «0») и затем определяли ее изменения по ходу испытаний через каждые 5 циклов. Замеры прекращали в связи с испытанием образцов конкретной серии на прочность или при остановке эксперимента в связи ее резким снижением и нецелесообразностью дальнейших испытаний.

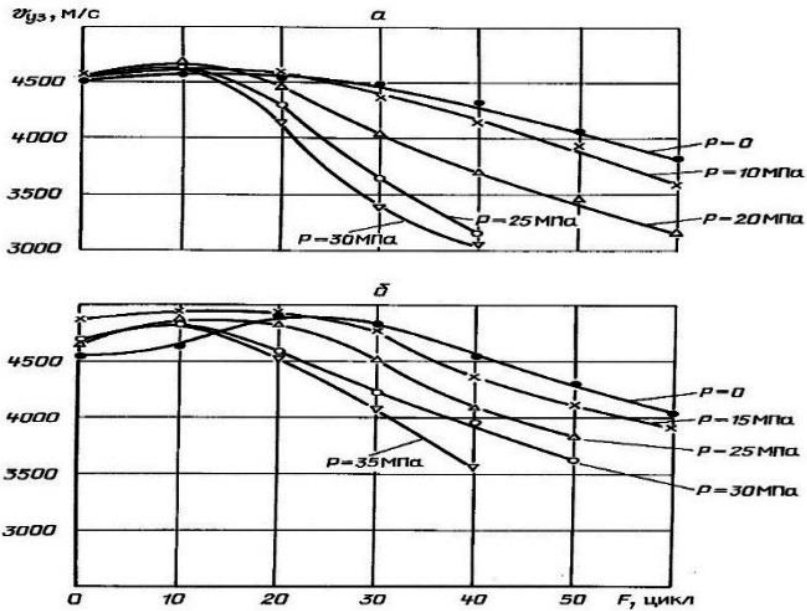


Рис. 4.5. Тенденция изменений скорости ультразвука контрольных ( $P = 0$ ) и основных образцов бетона под воздействием циклического замораживания-оттаивания при  $t = -(50-55)^\circ\text{C}$  и механической нагрузки при испытаниях в водной среде: а – мелкозернистый бетон; б – бетон со щебнем

Из экспериментальных данных очевидна непосредственная взаимосвязь изменений скорости ультразвука с ранее приведенными результатами экспериментов по определению потерь массы и изменений прочности бетона. Снижение указанных характеристик бетона в процессе испытаний его образцов выражается и в уменьшении значений скорости ультразвука. Эта тенденция, отраженная графически на рис. 4.5 и 4.6, усиливается с ростом нагрузки на бетон (до 50 % и более от его прочности в начале испытаний) и с увеличением количества циклов глубокого замораживания и оттаивания: сверх 20–30 циклов в водной среде и после 10–15 циклов в растворе соли.

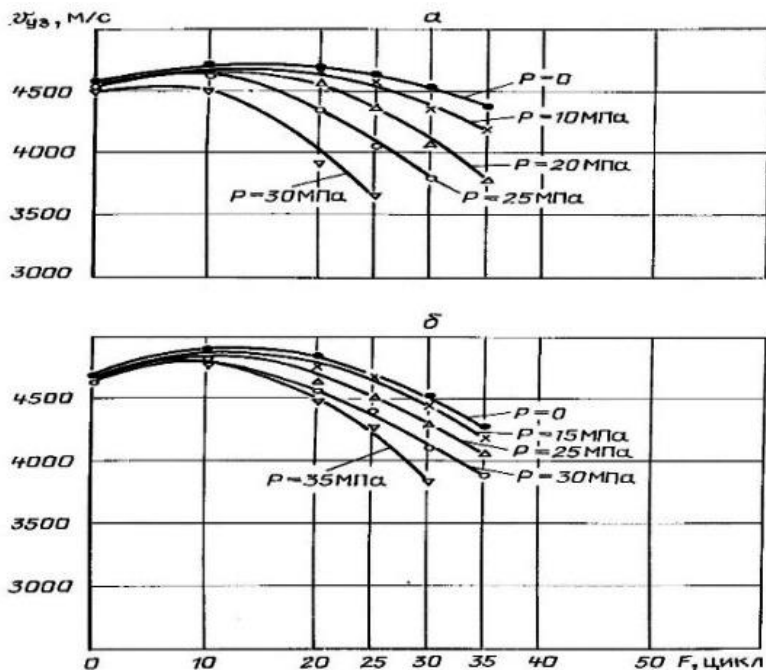


Рис. 4.6. Тенденция изменений скорости ультразвука контрольных ( $P = 0$ ) и основных образцов бетона под воздействием циклического замораживания-оттаивания в растворе соли при  $t = -(50-55)^\circ\text{C}$  и механической нагрузки  
 а – мелкозернистый бетон; б – бетон со щебнем

Сравнение графических зависимостей рис. 4.5 и 4.6 (скорость ультразвука) и рис. 4.3 и 4.4 (прочность бетона в водонасыщенном состоянии) показывает в целом одинаковый общий вид закономерностей графического отражения роста и снижения этих показателей во время испытаний. Вместе с тем видно, что графики скорости ультразвука, образно говоря, «резче реагируют» на внутренние изменения состояния структуры бетона под комплексным воздействием знакопеременной температуры, соли и механической нагрузки.

Вызываемые этим воздействием изменения структуры в виде микротрещин и их развитие в процессе испытаний образцов бетона отражаются в изменениях скорости ультразвука раньше, чем это сказывается на прочности бетона. Например, для контрольных об-

разцов ( $P = 0$ ) мелкозернистого бетона скорость ультразвука стабилизируется к 20 циклам (примерно на уровне исходной), а затем начинает медленно снижаться. Прочность же бетона в этом примере (см. рис. 4.3) возрастает до 30 циклов, а затем начинает снижаться. То есть показания скорости распространения ультразвукового импульса на более ранней стадии реагируют на начало превалирования деструктивных явлений в бетоне над его упрочнением и предвещают появление необратимых нарушений в структуре цементного камня и бетона.

Сравнительный анализ данных рис. 4.3 и 4.4 (тенденции изменения прочности бетона при испытаниях в воде и растворе соли), а также рис. 4.5 и 4.6 о соответствующих изменениях при этом в величинах скорости ультразвука подтверждает этот вывод.

Это значит, например, что установив факт снижения скорости ультразвука в бетоне контролируемых участков покрытия, можно прогнозировать вероятность снижения качества бетона его элементов и определять возможность дальнейшей эксплуатации покрытия.

На следующем этапе исследований изучали влияние на свойства бетона циклического замораживания-оттаивания в растворе соли в сочетании с воздействием динамической ударной нагрузки. Такого вида нагрузка возникает при уходе за покрытиями (сбивание наледей, снега и т.п.), а также при разных вариантах воздействия с «точечным» приложением механической нагрузки от технических (транспортных и иных) средств при эксплуатации покрытий.

#### ***4.3.4. Влияние динамической нагрузки и циклических воздействий на свойства бетона***

Методика исследований включала изучение изменений массы образцов бетона, его прочности на сжатие, скорости распространения ультразвукового импульса, истираемости бетона под воздействием циклического замораживания и оттаивания в растворе соли в сочетании с периодическим динамическим (ударным) воздействием на бетон, с использованием копра - плотномера динамического (по СТБ 1242–2000).

Место нанесения ударов на поверхности образцов ограничивалось одной боковой гранью, удары (в серии 10 ударов) наносили в разные места вблизи ее геометрического центра, на удалении в



15–20 мм от краев грани. При испытании образцов грань, по которой наносились удары, была верхней, т. е. соприкасалась с плитой пресса. Таким образом, обеспечивалось совпадение направлений действия ударной нагрузки и разрушающей в процессе испытаний образцов, что соответствует условиям эксплуатации элементов тротуарных покрытий и сопровождается более интенсивным разрушающим эффектом.

Методика осуществления экспериментов при контроле за массой, прочностью бетона и скоростью ультразвука, а также условия твердения и замораживания-оттаивания образцов соответствовали ранее изложенным.

Отдельные особенности методики конкретных испытаний приведены в соответствующих разделах.

#### А. Изменение массы образцов

Методика испытаний полностью соответствовала приведенной в п. 4.3.1 с тем отличием, что образцы бетона основных серий подвергали через каждые 5 циклов замораживания-оттаивания не сжатию, а воздействию динамической ударной нагрузки. Эксперимент прекращали, если потери массы образцов бетона достигали более 3 % от начальной (табл. 4.10 и 4.11).

Результаты экспериментов, представленные в табл. 4.10 (мелкозернистый бетон) и табл. 4.11 (бетон со щебнем), свидетельствуют о том, что динамическое ударное воздействие на бетон представляет собой серьезную угрозу его долговечности, если оно сочетается с одновременным циклическим замораживанием-оттаиванием (либо насыщением-высушиванием). При этом процесс деструкции резко интенсифицирует испытания в растворе соли.

Так, если для водной среды оценивать состояние бетона в процессе испытаний по потерям массы в 3 %, то для мелкозернистого бетона этот уровень «достигается» примерно после 45, 40 и 35 циклов.

Таблица 4.10  
Изменения массы основных образцов мелкозернистого бетона в процессе испытаний при комплексном воздействии циклических испытаний и ударной нагрузки

Условия твердения бетона	П <sub>сст</sub> , г	П <sub>нас</sub> , г	V <sub>полг</sub> , г	Изменения массы образцов, г, после количества циклов замораживания-оттаивания (насыщения в растворе соли – высушивания), цикл:											
				5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Исследования морозостойкости в воде</b>															
Естественные (под пленкой)	812,9	823,0	10,1	0,5	-1,9	-1,7	-2,5*	–	–	–	–	–	–	–	–
	788,3	796,9	8,6	1,2	-1,1	-1,9	-2,8	-2,9	-3,1*	–	–	–	–	–	–
	803,0	811,8	8,8	1,2	-2,0	-0,9	-1,5	-2,4	-3,6	-3,8	-3,5*	–	–	–	–
	792,1	801,6	9,5	0,7	-0,9	-1,8	-2,9	-3,8	-3,0	-4,1	-4,6	-5,9	-6,5*	Эксперимент прекращен	–
780,5	790,1	9,6	0,8	-1,5	-1,4	-1,9	-2,5	-2,8	-4,4	-3,1	-5,0	-5,1	–	–	
Воздушно-сухие	786,3	803,7	17,4	1,8	-3,0	-3,1	-4,9*	–	–	–	–	–	–	–	–
	785,4	803,1	17,7	2,0	-2,8	-3,8	-3,8	-6,4	-7,8*	–	–	–	–	–	–
	802,6	821,2	18,6	1,5	-2,2	-1,5	-4,3	-6,2	-6,5	-8,3	-8,0*	–	–	–	–
	775,3	790,8	15,5	2,7	-2,0	-1,7	-4,6	-5,0	-6,9	-8,1	-9,6	-8,4	–	–	–
	770,8	785,0	14,2	2,2	-3,1	-2,4	-5,7	-7,10	-6,8	-7,2	-8,4	–	–	–	–
Пропаренные с дозреванием	795,0	805,8	10,7	1,2	-1,8	-2,1	-2,8*	–	–	–	–	–	–	–	–
	800,4	811,5	11,1	1,5	-2,0	-2,0	-3,1	-3,1	-3,8*	–	–	–	–	–	–
	783,2	794,1	10,9	1,4	-1,6	-1,9	-3,3	-4,0	-4,2	-5,6	-6,6*	–	–	–	–
	776,6	788,6	12,0	1,8	-1,9	-2,2	-2,7	-3,5	-4,0	-4,9	-5,5	-6,8	–	–	–
	787,0	798,0	11,0	1,5	-1,5	-2,1	-2,4	-2,8	-3,4	-5,6	-6,2	-7,5	–	–	–

Продолжение табл. 4.10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Исследования солестойкости</b>															
Естественные (под пленкой)	790,5	801,3	9,8	12,8	-4,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	772,0	782,6	10,6	11,6	-6,8	-9,6	-11,8	-	-	-	-	-	-	-	-
	784,3	785,3	11,0	10,9	-5,0	-9,8	-12,9	-18,2*	-	-	-	-	-	-	-
	779,1	789,6	10,5	11,9	-4,9	-7,5	-11,4	-14,2	-20,1*	-	-	-	-	-	-
	788,0	797,9	9,9	12,0	-6,3	-8,9	-13,0	-16,1	-	-	-	-	-	-	-
	770,0	781,5	11,5	13,4	-6,9*	-10,2	-14,5*	-	-	-	-	-	-	-	-
	775,5	786,5	11,0	12,1	-5,8	-9,3	-16,0	-19,5*	-	-	-	-	-	-	-
	780,1	800,0	10,9	14,0	-7,0	-10,1	-17,3	-21,0	-	-	-	-	-	-	-
Воздушно-сухие	774,0	784,5	10,5	12,9	-6,8	-8,8	-14,5	-24,0	-	-	-	-	-	-	-
	768,5	780,3	11,8	11,5	-7,5	-10,5	-12,8	-20,8	-	-	-	-	-	-	-
	784,0	794,4	10,4	11,9	-3,8*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	765,0	774,9	9,9	11,3	-5,6	-10,9	-13,0*	-	-	-	-	-	-	-	-
с дозреванием	785,1	796,1	11,0	12,4	-4,4	-10,0	-12,0	-16,8*	-	-	-	-	-	-	-
	790,2	801,1	10,9	10,9	-6,2	-8,6	-13,9	-17,5	-	-	-	-	-	-	-
	771,5	782,2	10,7	12,5	-5,8	-9,5	-12,2	-18,4	-	-	-	-	-	-	-
<b>Исследования морозостойкости в 5 % растворе соли (NaCl)</b>															
Естественные (под пленкой)	801,0	811,5	10,5	1,5	-1,8*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	785,5	794,3	8,8	1,9	-1,1	-2,1	-6,9*	-	-	-	-	-	-	-	-
	796,3	806,3	10,0	1,2	-1,2	-3,3	-5,1	-6,2*	-	-	-	-	-	-	-
	800,5	809,9	9,4	1,4	-1,9	-2,8	-5,0	-7,4	-10,8*	-	-	-	-	-	-
	784,5	793,5	8,9	1,4	-1,0	-4,0	-5,2	-8,9	-12,3	-	-	-	-	-	-
Эксперимент прекращен															

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Воздушные	768,0	781,8	13,8	1,2	-2,1*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	770,5	784,9	14,4	2,1	-1,9	-3,8	-8,0	-	-	-	-	-	-	-	-
	755,0	768,9	13,9	1,9	-1,7	-3,6	-7,5	-	-	-	-	-	-	-	-
	780,5	793,1	12,6	2,0	-2,0	-4,8	-7,4	-11,6*	-	-	-	-	-	-	-
Пропаренные с дозреванием	772,2	783,0	11,8	1,3	-1,4	-2,2	-9,3	-12,5	Эксперимент прекращен						
	784,0	796,0	12,0	1,4	-1,4*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	795,0	783,8	9,8	1,4	-2,3	-1,8	-6,1*	-	-	-	-	-	-	-	-
	776,5	786,9	10,4	1,9	-2,1	-3,4	-5,0	-9,8*	-	-	-	-	-	-	-
	801,5	811,4	9,9	1,8	-1,6	-2,1	-6,9	-9,0	-11,1*	-	-	-	-	-	-
	784,5	786,0	11,5	2,1	-1,8	-2,3	-6,2	-7,4	-13,0	Эксперимент прекращен					

\*После означенного количества циклов серия образцов испытана на сжатие

Таблица 4.11  
**Изменения массы основных образцов бетона со щебнем в процессе исследований при комплексном воздействии циклических испытаний и ударной нагрузки**

Условия твердения бетона	М <sub>ист</sub> , г	М <sub>нас</sub> , г	V <sub>полн</sub> , г	Изменения массы образцов, г, после количества циклов замораживания-оттаивания (насыщения в растворе соли – высушивания), цикл:												
				5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
<b>Исследования морозостойкости в воде</b>																
Естественные (под пленкой)	860,1	866,7	6,6	1,2	-0,4	-0,9	-1,7*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	825,5	833,3	7,8	1,4	-0,8	-0,8	-2,0	-2,0	-2,2*	–	–	–	–	–	–	–
	834,8	840,7	5,9	0,9	-0,8	1,0	-2,4	-1,6	-2,1	3,2	2,9*	–	–	–	–	–
	870,0	877,2	7,2	1,5	-0,6	-0,6	-1,9	-2,1	-2,0	2,4	3,1	3,4	3,8*	–	–	–
	855,6	862,4	6,8	1,6	-0,9	-0,8	-1,9	-2,0	-2,9	-3,0	-2,8	-3,9	-3,9	-4,1	-4,4*	–
Воздушно-сухие	848,5	859,9	11,4	2,2	-2,2	-1,6	-2,6*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	850,0	860,5	10,5	2,6	-1,1	-1,5	-2,9	–	*	–	–	–	–	–	–	–
	836,8	846,4	9,6	2,6	-0,9	-1,8	-3,0	-3,5	-4,8	-5,9	-5,0*	–	–	–	–	–
	810,1	821,9	11,8	1,9	-1,2	-1,3	-3,2	-4,0	-4,2	-4,8	-5,1	-6,0	Эксперимент прекращен			
	832,5	842,6	10,1	2,5	-0,8	-1,2	-2,8	-3,1	-4,0	-4,5	-4,4	-4,8	–	–	–	–
Пропоренные с дозреванием	846,0	854,0	8,0	1,1	-0,5	-1,0	-2,1*	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	855,4	863,3	7,9	1,5	-0,8	-1,4	-1,6	-2,2	-3,2*	–	–	–	–	–	–	–
	860,0	866,6	8,6	1,4	-0,7	-0,9	-2,5	-3,1	-3,0	-2,9	-3,1*	–	–	–	–	–
	838,5	847,5	9,0	1,8	-0,8	-1,0	-2,4	-2,4	-3,1	-3,5	-4,2	-4,4	-5,1*	–	–	–
	842,4	850,9	8,5	1,5	-0,9	-0,8	-2,4	-2,8	-2,5	-3,9	-3,3	-4,5	-4,9	Эксперимент прекращен		

Продолжение табл. 4.11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Исследования солестойкости</b>															
Естественные (под пленкой)	833,0	841,8	8,8	7,9	0,3*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	842,0	850,4	7,9	6,8	0,6	-4,0	-9,9*	—	—	—	—	—	—	—	—
	829,0	838,3	9,3	8,1	-0,2	-6,5	-9,2	-12,0	-14,5*	—	—	—	—	—	—
	841,6	850,8	9,2	8,5	0,4	-3,9	-7,6	-10,0	-12,4	-16,0*	Эксперимент прекращен				
	830,5	837,4	7,4	7,9	0,5	-4,5	-8,1	-9,9	-10,8	-14,2					
	829,7	838,2	9,2	10,2	0*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
834,8	845,7	10,9	10,0	-0,3	-7,3	-12,0*	—	—	—	—	—	—	—	—	
831,9	842,4	9,5	8,9	-0,1	-6,9	-11,0	-14,1	-20,1*	Эксперимент прекращен						
826,5	837,1	9,6	11,0	-0,1	-8,1	-12,5	-15,8	-19,1							
833,3	842,6	9,3	10,5	0,2	-7,5	-13,4	-16,5	-21,6							
830,5	838,4	7,9	8,3	0,5*	—	—	—	—							
839,4	848,4	9,0	7,9	0,3	-5,5	-10,1*	-13,4	—	—	—	—	—	—	—	
823,6	834,4	9,8	9,5	-0,2	-7,0	-9,8	-11,9	-15,5*	—	—	—	—	—	—	
840,1	850,1	10,0	9,5	-0,1	-4,9	-10,4	-12,8	-15,0	-16,6*	Эксперимент прекращен					
832,6	841,5	8,9	8,9	0,1	-5,3	-8,3	-10,5	-13,1	-18,2						
<b>Исследования морозостойкости в 5 % растворе соли (NaCl)</b>															
Естественные (под пленкой)	860,0	868,4	8,8	0,9	-0,9*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	838,4	848,6	10,2	1,3	-0,8	-1,8	-3,6*	—	—	—	—	—	—	—	—
	859,6	868,9	9,3	0,8	-1,0	-2,5	-3,3	-4,9*	—	—	—	—	—	—	—
	843,5	852,4	8,9	1,1	-0,8	-2,0	-4,1	-6,3	-7,4*	Эксперимент прекращен					
	855,0	865,5	10,5	0,7	-0,9	-2,1	-3,0	-4,6	-6,6*						

Окончание табл. 4.11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Воздушно-сухие	844,0	856,4	12,4	1,7	-1,8*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	835,5	848,7	13,2	2,1	-1,4	-2,4	-4,5*	-	-	-	-	-	-	-	-
	858,8	870,7	11,9	2,9	-0,9	-3,1	-3,8	-8,4*	-	-	-	-	-	-	-
	844,5	857,8	13,3	1,5	-0,9	-1,9	-4,6	-7,0*	-	-	-	-	-	-	-
	839,2	851,8	12,6	1,8	-2,0	-3,9	-5,0	-9,4	-	-	-	-	-	-	-
Пропаренные с дозреванием	854,0	865,4	11,4	1,3	-0,6*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	852,5	863,0	10,5	1,0	-1,1	-2,1	-4,0*	-	-	-	-	-	-	-	-
	842,2	852,6	10,6	1,6	-1,3	0	-3,8	-5,9*	-	-	-	-	-	-	-
	851,0	863,0	12,0	1,8	-0,9	-2,8	-3,7	-7,0	-11,0*	-	-	-	-	-	-
	842,2	852,0	9,8	1,4	-1,4	-1,4	-4,4	-5,3	-9,1	-	-	-	-	-	-
	Эксперимент прекращен														
	Эксперимент прекращен														

\*После означенного количества циклов серия образцов испытана на сжатие.

Особенно при глубоком замораживании в сочетании с ударным воздействием на бетон образцов твердевших «под пленкой», после пропаривания на воздухе и в воздушно-сухих условиях соответственно. Для более плотного бетона со щебнем в этих условиях испытаний означенная граница отодвигается примерно к 60, 50 и 40 циклам соответственно.

А в случае испытаний в солевом растворе примерно равные потери массы образцов, приходящиеся на 5 циклов, наблюдались к 20–25 циклам для мелкозернистого бетона и к 30 циклам для бетона со щебнем.

Если сравнивать отрицательный эффект от динамических нагрузок с таковым от воздействия на бетон сжимающей статической нагрузки, то (для условий выполненных экспериментов) динамическая нагрузка по воздействию на бетон соответствует уровню статической нагрузки более 60 %-ов от прочности бетона в проектном возрасте. Это показывает сравнительный анализ потерь массы образцами бетона по данным для мелкозернистого бетона и данными для бетона со щебнем.

Очевидно, что под действием сосредоточенной ударной нагрузки в бетоне, как в хрупком материале, возникают локальные очаги достаточно высоких напряжений, которые приводят к трещинообразованию в зоне удара. Многократное повторение такого воздействия приводит к зарождению микротрещин в цементном камне (бетоне) и последующему их развитию. Этот эффект усиливается под воздействием знакопеременных деформаций как следствие от действия знакопеременной температуры, особенно при глубоком замораживании. Следует ожидать, что возникающие нарушения структуры будут ухудшать и другие эксплуатационные характеристики бетона.

Обобщая результаты исследований следует признать, что наиболее опасно с позиций морозостойкости бетона, эксплуатационной надежности и долговечности вибропрессованных изделий является сочетание динамических ударных нагрузок (которые приводят к трещинообразованию в бетоне), а также статических механических нагрузок, которые достигают или превышают верхний предел трещиностойкости бетона. В обоих случаях циклическое воздействие замораживания-оттаивания сопровождается ускорением процессов деструкции бетона.



## Б. Прочность бетона

Образцы основных серий, подвергаемые ударному воздействию через 5 циклов замораживания-оттаивания или насыщения-высушивания и контрольные (без механической нагрузки), испытывались на сжатие через каждые 10 (5) циклов. Результаты испытаний приведены в табл. 4.12 и их анализ свидетельствует о следующем.

Солевая испытательная (соответственно для тротуарных покрытий – эксплуатационная) среда в сочетании с воздействием ударной (динамической) нагрузки создают особо жесткие условия «работы» бетона. Об этом свидетельствует тот факт, что (в отличие от испытаний в водной среде (раздел А) или при воздействии статической нагрузкой (см. ранее) прочность бетона снижается практически сразу с началом испытаний (после 10 циклов). В этом случае по существу отсутствует отмечаемый в других условиях экспериментов эффект повышения прочности бетона при циклических испытаниях на морозостойкость.

Сопоставление данных о влиянии на изменения прочности бетона статически приложенной нагрузки и ударной свидетельствует, что отрицательное воздействие динамической ударной нагрузки примерно соответствует (по фактическим данным снижения прочности бетона) уровню статической нагрузки более 60 % (т. е. ее уровню, соответствующему верхней границе трещинообразования бетона). На наш взгляд, это связано с тем, что и в первом, и во втором варианте воздействия на бетон механическими нагрузками появляются микротрещины в структуре бетона, развитие которых усугубляется действием знакопеременных температур и деформаций, а также других ранее упоминавшихся факторов при замораживании-оттаивании бетона. При этом «точечно» приложенные динамические нагрузки даже более опасны (с позиций обеспечения долговечности бетона), чем статические.

Полученные данные об изменении прочности бетона в процессе испытаний корреспондируются с данными об изменении при этом скорости ультразвука.

Таблица 4.12

## Изменение прочности контрольных и основных образцов бетона

Условия твердения бетона	Вид бетона	Значения прочности бетона на сжатие, МПа, после количества циклов замораживания-оттаивания (насыщения в растворе соли-высушивания), цикл:								
		0	10	20	25	30	35	40	50	60
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Исследования морозостойкости в воде										
Естественные (под пленкой)	Мелкозернистый	43	44	43	–	41	–	38	35*	–
	Со щебнем	50	52	50	–	48	–	45	41	38
Воздушно-сухие	Мелкозернистый	36	37	34	–	31	–	27	–	–
	Со щебнем	42	43	42	–	40	–	37	34	–
Пропаривание с дозреванием	Мелкозернистый	40	41	39	–	35	–	32	–	–
	Со щебнем	48	49	49	–	45	–	42	38	–
Исследования солестойкости										
Естественные (под пленкой)	Мелкозернистый	40	40,5	36,5	–	32,5	28*	–	–	–
	Со щебнем	48	48,5	43,5	–	40	38	36*	–	–
Воздушно-сухие	Мелкозернистый	36	35	32	–	25*	–	–	–	–
	Со щебнем	44	44	40	–	37	34*	–	–	–

Окончание табл. 4.12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Пропа- ривание с дозре- ванием	Мелко- зерни- стый	39	39	36	–	29*	–	–	–	–
	Со щеб- нем	46	45,5	41,5	–	38	36*	–	–	–
Исследования морозостойкости в 5%-м растворе соли (NaCl)										
Есте- ствен- ные (под пленкой)	Мелко- зерни- стый	43	43	40	38*	–	–	–	–	–
	Со щеб- нем	53	52	51	47*	–	–	–	–	–
Воздуш- но-сухие	Мелко- зерни- стый	41	40	36*	–	–	–	–	–	–
	Со щеб- нем	49	48	46	42*	–	–	–	–	–
Пропа- ривание с дозре- ванием	Мелко- зерни- стый	42	41	40	35*	–	–	–	–	–
	Со щеб- нем	52	52	49	45*	–	–	–	–	–

\* Эксперимент прекращен.

### В. Скорость ультразвука

Скорость ультразвука (табл. 4.13) в процессе исследований определяли перед испытанием образцов бетона на прочность на сжатие.

Результаты экспериментов, свидетельствуют об общей тенденции изменения скорости ультразвука в бетоне, подвергаемом ударным механическим нагрузкам, уровень которых достаточен для образования микротрещин в объеме бетона. При этом очевидна (рис. 4.5 и 4.6) непосредственная взаимосвязь изменений (рост–снижение) скорости ультразвука с соответствующими изменениями

прочности бетона. Отличие между данными, относящимися к воздействию статической сжимающей нагрузки от динамической, заключаются только в их абсолютной величине при сохранении общей тенденции изменений.

Таблица 4.13

Изменение скорости ультразвука контрольных и основных образцов бетона

Условия твердения бетона	Вид бетона	Значения скорости ультразвука в бетоне, м/с, после количества циклов замораживания-оттаивания (насыщения в растворе соли-высушивания), цикл								
		0	10	20	25	30	35	40	50	60
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Исследования морозостойкости в воде										
Естественные (под пленкой)	Мелкозернистый	4550	4620	4438	–	4310	–	3978	3290*	–
	Со щебнем	4790	4931	4730	–	4640	–	4430	4112	3709
Воздушно-сухие	Мелкозернистый	4590	4667	4524	–	4440	–	3390	–	–
	Со щебнем	4750	4860	4760	–	4498	–	3905	3580	–
Естественные (под пленкой)	Мелкозернистый	4560	4510	4230	–	3450*	–	–	–	–
	Со щебнем	4740	4680	4360	–	4090	3890*	–	–	–
Воздушно-сухие	Мелкозернистый	4580	4490	4030	–	2950*	–	–	–	–

Окончание табл. 4.13

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Со щеп-нем	4760	4700	4250	–	3940*	3340*	–	–	–
Про-пари-вание с до-зрева-нием	Мел-козер-ни-стый	4570	4670	4390	–	4066	–	3510	–	–
	Со щеп-нем	4710	4850	4720	–	4538	–	4240	3660	–
<b>Исследования солестойкости</b>										
Про-пари-вание с до-зрева-нием	Мел-козер-ни-стый	4540	4580	4090	–	3300*	–	–	–	–
	Со щеп-нем	4750	4710	4300	–	3990*	3600*	–	–	–
<b>Исследования морозостойкости в 5-м растворе соли (NaCl)</b>										
Есте-ствен-ные (под плен-кой)	Мел-козер-ни-стый	4560	4560	3990	3570*	–	–	–	–	–
	Со щеп-нем	4710	4620	4450	4010	–	–	–	–	–
Воз-душ-но-сухие	Мел-козер-ни-стый	4600	4430	3330*	–	–	–	–	–	–
	Со щеп-нем	4780	4330	4140	3815	–	–	–	–	–
Про-пари-вание с до-зрева-нием	Мел-козер-ни-стый	4550	4500	4120	3380*	–	–	–	–	–
	Со щеп-нем	4730	4660	4245	3930	–	–	–	–	–

\* Эксперимент прекращен.

Это свидетельствует о том, что, независимо от характера воздействия, вызывающего трещинообразование в бетоне, механизм его последующей деструкции един и базируется на дальнейшем «развитии» трещин под влиянием агрессивных факторов, сопровождающих циклическое замораживание-оттаивание и которое существенно усиливается при дополнительном воздействии соли (разделы Б и В табл. 4.13). В последнем случае скорость ультразвука снижается сразу с началом экспериментов (после 5 циклов), что подтверждает данные предыдущего раздела об изменениях прочности бетона и является непосредственным отражением этого процесса.

Следует отметить, что под действием динамической (ударной) нагрузки на образцы бетона сохраняется выявленная в экспериментах с изменениями его прочности под влиянием статической нагрузки (см. п. 4.3.2 и 4.3.3) закономерность: скорость ультразвука начинает снижаться ранее, чем структурные изменения в бетоне сказываются (отражаются) в снижении его прочности. Так (см. табл. 4.12 и 4.13) скорость ультразвука в обеих разновидностях бетона (разделы Б и В) начинает снижаться после 5 циклов, прочность же примерно после 10, фиксируя таким образом начало структурных изменений в бетоне на более раннем этапе исследований, чем прямые испытания на сжатие.

#### Г. Истираемость бетона

Истираемость образцов бетона (70 x 70 x 70 мм) определяли во всех случаях в водонасыщенном состоянии. Контрольные образцы вместе с основными подвергали циклическому замораживанию-оттаиванию и испытывали на истираемость через 10 циклов после оттаивания в воде.

Испытания осуществляли по методике ГОСТ 13087–81 «Методы определения истираемости» на круге истирания ЛКИ–3 (по два образца одновременно). Серия состояла из 4 образцов. Данные испытаний приведены в табл. 4.14, в которой образцы колонки «0\*», – это образцы контрольной серии, испытанные после водонасыщения в течение 96 ч по ГОСТ 10060–95, т. е. после достижения возраста 28 сут (проектного).

Динамическая ударная нагрузка на оттаявшие контрольные образцы (10 ударов через каждые 5 циклов) приложена к грани истирания (боковой при изготовлении образцов).

Таблица 4.14

Значения показателя истираемости бетона

Условия твердения бетона	Вид бетона	Серия образцов	Истираемость бетона, г/см <sup>2</sup> , после количества циклов замораживания-оттаивания (насыщения в растворе соли-высушивания), цикл:						
			0*	20	30	40	50	60	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
<b>Исследования морозостойкости в воде</b>									
Естественные (под пленкой)	Мелкозернистый	Контр.	0,22	0,23	0,29	0,50	0,75	–	–
		Осн.	0,22	0,24	0,42	0,76	–	–	–
	Со щебнем	Контр.	0,18	0,21	0,25	0,30	0,37	0,52	–
		Осн.	0,18	0,25	0,29	0,36	0,48	0,64	–
Воздушно-сухие	Мелкозернистый	Контр.	0,36	0,39	0,48	0,62	0,96	–	–
		Осн.	0,36	0,42	0,55	0,97	–	–	–
	Со щебнем	Контр.	0,29	0,30	0,39	0,43	0,51	0,65	–
		Осн.	0,29	0,33	0,45	0,53	0,64	–	–
Пропаривание с дозреванием	Мелкозернистый	Контр.	0,33	0,35	0,42	0,55	0,79	–	–
		Осн.	0,33	0,39	0,51	0,84	–	–	–
	Со щебнем	Контр.	0,26	0,26	0,36	0,40	0,48	0,60	–
		Осн.	0,26	0,31	0,44	0,48	0,58	–	–
<b>Исследования солестойкости</b>									
Естественные (под пленкой)	Мелкозернистый	Контр.	0,25	0,43	0,79	–	–	–	–
		Осн.	0,25	0,64	1,42	–	–	–	–
	Со щебнем	Контр.	0,20	0,30	0,45	0,80	–	–	–
		Осн.	0,25	0,40	0,89	1,10	–	–	–
Воздушно-сухие	Мелкозернистый	Контр.	0,36	0,59	0,88	–	–	–	–
		Осн.	0,36	0,72	1,55	–	–	–	–
	Со щебнем	Контр.	0,32	0,35	0,51	0,96	–	–	–
		Осн.	0,32	0,50	0,99	1,39	–	–	–
Пропаривание с дозреванием	Мелкозернистый	Контр.	0,37	0,45	0,86	–	–	–	–
		Осн.	0,40	0,69	1,28	–	–	–	–
	Со щебнем	Контр.	0,26	0,31	0,50	0,90	–	–	–
		Осн.	0,27	0,44	0,91	1,28	–	–	–
<b>исследования морозостойкости в 5%-м растворе соли (NaCl)</b>									
Естественные (под пленкой)	Мелкозернистый	Контр.	0,4	0,45	0,63	–	–	–	–
		Осн.	0,4	0,66	0,90	–	–	–	–
	Со щебнем	Контр.	0,35	0,40	0,52	–	–	–	–
		Осн.	0,35	0,49	0,70	–	–	–	–

Окончание табл. 4.14

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Воздушно-сухие	Мелкозернистый	Контр.	0,49	0,60	0,80	–	–	–
		Осн.	0,49	0,75	1,1	–	–	–
	Со щебнем	Контр.	0,41	0,49	0,65	–	–	–
		Осн.	0,41	0,56	0,88	–	–	–
Пропаривание с дозреванием	Мелкозернистый	Контр.	0,44	0,58	0,66	–	–	–
		Осн.	0,44	0,68	0,94	–	–	–
	Со щебнем	Контр.	0,37	0,44	0,55	–	–	–
		Осн.	0,37	0,61	0,83	–	–	–

\*В насыщенном водой состоянии.

Анализ данных табл. 4.14 для образцов, замораживаемых-оттаиваемых в воде (раздел А) свидетельствует о достаточно медленном росте истираемости контрольных образцов до 35–40 циклов испытаний, несмотря на воздействие знакопеременной температуры с глубоким охлаждением. Это отражение процесса одновременного упрочнения бетона в данный период испытаний.

При этом основные образцы снижают «износоустойчивость» примерно с 25–30 циклов и с увеличением их количества для образцов мелкозернистого бетона процесс деструкции усиливается и ускоряется. Образцы со щебнем характеризуются большей износоустойчивостью и темп ее снижения под действием циклического замораживания-оттаивания и динамической нагрузки значительно ниже, чем у мелкозернистого бетона. Влияние условий твердения бетона на его истираемость однозначно – воздушно-сухие условия твердения приводят к ускоренному снижению этого показателя, в сравнении с более благоприятными – пропариванием с дозреванием на воздухе и твердением под пленкой (в условиях гидроизоляции).

Результаты испытаний на истираемость образцов бетона, подвергнувшегося воздействию соли как при «замораживании-оттаивании», так и при «насыщении-высушивании», существенно отличаются от полученных для водной среды: бетон интенсивно теряет износоустойчивость. Очевидно, это связано с ускоренным проявлением нарушений микроструктуры цементного камня и со снижением его прочности и твердости поверхностного слоя под воздействием соли, что приводит к росту истираемости при после-



дующем действии абразивного материала и, особенно, в сочетании с ударной механической нагрузкой по грани истирания.

Из приведенных данных следует, что ударная динамическая нагрузка на бетон однозначно сопровождается ростом его истираемости на каждом из отрезков или периодов испытаний, а значит – и в процессе эксплуатации покрытий из элементов благоустройства.

#### ***4.3.5. Натурные испытания бетона тротуарных плит на комплексное воздействие среды и механических нагрузок***

*Испытания с многократной статической нагрузкой.* Испытания осуществили на образцах-плитах и образцах-кубах после распиловки плит пополам. Задачей исследований являлась проверка ранее полученных закономерностей изменения морозостойкости (прочности) бетона при комплексном воздействии попеременного замораживания-оттаивания в солевой среде и сжимающей нагрузки. Как было установлено (см. п. 4.2) «поведение» бетона практически не изменяется, если статическая нагрузка не превышает 40 % его «кубиковой» прочности. С повышением нагрузки до 50 % процесс деструкции и снижения прочности бетона при циклическом замораживании-оттаивании ускоряется, а с превышением уровня 60 % резко нарастает, вплоть до полной потери прочности бетона. С учетом этого обстоятельства образцы плит и кубов перед началом замораживания-оттаивания и затем через каждые 5 циклов (после оттаивания) загружали статически под прессом нагрузкой в 50 и 70 % от прочности бетона в водонасыщенном состоянии, т.е. при  $f_{с.нач.} \sim 38$  МПа, нагрузка соответствовала приблизительно 19 и 27 МПа. При периодических испытаниях на прочность (через 10 и 5 циклов) образцы-плиты испытывали через пластины по одному краю, к которому прикладывали и статическую нагрузку (табл. 4.15 и 4.16).

Данные натурных испытаний целых плит, приведенные в табл. 4.15 и 4.16, подтверждают закономерности изменений прочности бетона, установленные на изготавливаемых образцах 70 x 70 x 70 мм (см. п. 4.2) при комплексном воздействии циклических испытаний бетона на морозостойкость и статической (сжимающей) нагрузки. По данным табл. 4.15, при нагрузке в 50 % от проектной прочность бетона уже через 15 циклов снизилась на 6 %.

С ростом нагрузки до 70 % уже к 10 циклам испытаний прочность бетона снизилась примерно на 17 %.

Таблица 4.15

## Морозостойкость бетона контрольных образцов-плит

№ обр	Ест. влажн.			После насыщения			5 циклов			10 циклов							
	V <sub>0</sub> , м/с		m <sub>0</sub> , г	V <sub>нас</sub> , м/с		m <sub>н</sub> , г	V <sub>1</sub> , м/с		m <sub>1</sub> , г	V <sub>2</sub> , м/с		m <sub>2</sub> , г	f см, МПа				
	УК- 1401	УК- 14П		УК- 1401	УК- 14П		УК- 1401	УК- 14П		УК- 1401	УК- 14П		Δm, г				
1	4790	3992,9	4510	4830	4112	4650	140	4890	4121	4600	10	—	4880	4121	4660	0	39
2	4720	4079,4	4550	4900	4124	4680	130	4980	4201	4680	0	—	4980	4201	4680	0	36
3	4730	4058	4550	5020	4117	4650	100	5030	4232	4655	5	—	5100	4232	4660	5	40
4	4810	4050,2	4540	4890	4129	4660	140	4840	4124	4670	10	—	4850	4154	4690	0	—
5	4810	4050,2	4500	4850	4110	4630	130	4840	4139	4640	10	—	4850	4239	4640	0	—
6	4820	4154,4	4540	4920	4124	4655	115	4890	4216	4660	5	—	4890	4280	4660	0	—
7	4640	4109,1	4460	4640	4124	4600	140	4700	4177	4600	0	—	4920	4201	4608	8	—
8	4850	4050,2	4530	4870	4050	4665	135	4890	4154	4620	5	—	4850	4165	4680	0	—
9	4720	4087,6	4530	4950	4090	4650	120	5000	4164	4650	0	—	4930	4216	4655	5	—
	4766	4070			4874	4120		4896	4170				4916	4201			38,3

№ образцов	15 циклов					20 циклов					25 циклов					30 циклов				
	V <sub>3</sub> , м/с		m <sub>3</sub> , г	Δm, г	f <sub>cm</sub> , МПа	V <sub>4</sub> , м/с		m <sub>4</sub> , г	Δm, г	f <sub>cm</sub> , МПа	V <sub>5</sub> , м/с		m <sub>5</sub> , г	Δm, г	f <sub>cm</sub> , МПа	V <sub>6</sub> , м/с		m <sub>6</sub> , г	Δm, г	f <sub>cm</sub> , МПа
	УК-1401	УК-141П				УК-1401	УК-141П				УК-1401	УК-141П				УК-1401	УК-141П			
4	4880	4216	4680	0	–	4830	4212	4685	5	38										
5	5000	4264	4670	10	–	4980	4264	4670	0	37										
6	4890	4185	4600	0	–	4880	4170	4610	10	36										
7	4890	4201	4660	0	–	4890	4150	4670	10	–	4890	4121	4670	0	–	4770	4000	4670	0	34
8	4950	4109	4670	0	–	4940	4124	4680	10	–	4850	4050	4680	0	–	4800	3992	4680	0	32
9	4960	4232	4650	0	–	4900	4280	4660	10	–	4810	4255	4660	0	–	4780	4200	4660	0	36
	4928	4201				4903	4200			37						4783	4064			34

Таблица 4.16

Изменение свойств бетона при воздействии статической нагрузки

№ п/п	После насыщения										5 циклов					10 циклов				
	V <sub>наес</sub> , м/с		m <sub>и</sub> , г	Δm, г	V <sub>1</sub> , м/с		m <sub>1</sub> , г	Δm, г	f <sub>cm</sub> , МПа	V <sub>2</sub> , м/с		m <sub>2</sub> , г	Δm, г	f <sub>cm</sub> , МПа						
	УК-1401	УК-141П			УК-1401	УК-141П				УК-1401	УК-141П				УК-1401	УК-141П				
Целая плита, нагрузка 50 %																				
1	4850	4185	4620	100	4850	4021	4630	10	–	4640	3456	4630	0	36,5						
2	4850	4014	4660	120	4730	3979	4670	10	–	4510	3629	4680	10	37,8						
3	4900	4109	4650	110	4760	3477	4670	20	–	4690	3544	4680	10	–						
4	4930	3958	4700	110	4920	3742	4710	10	–	4440	3846	4730	20	–						

Продолжение табл. 4.16

5	4980	4197	4660	90	4810	3780	4680	20	–	4650	3294	4680	0	–
6	5030	4185	4680	120	4900	3853	4690	10	–	4385	3587	4690	0	–
	4923	4108			4828	3807				4552	3559			37,72
<b>Целая плита, нагрузка 70 %</b>														
1	4850	4154	4620	130	4260	3181	4620	0	36,7	–	–	–	–	–
2	4780	4058	4630	110	4460	3225	4640	10	35,8	–	–	–	–	–
3	4820	4197	4675	125	4250	3693	4680	5	–	3880	3063	4680	0	31,5
4	5050	4264	4660	100	4170	3205	4660	0	–	3610	2820	4670	10	32,5
	4825	4184			4285	3326			36,3	3745	2991			31,5
<b>Образцы–половинки плиты, нагрузка 50 %</b>														
1	–	4186	2305	65	–	4095	2305	0	–	–	3346	2306	–0,7	28,0
2	–	4058	2262	74	–	3866	2262	0	–	–	3363	2276	13,9	31,0
3	–	4106	2259	70	–	3693	2259	0	–	–	3524	2262	3	–
4	–	4058	2262	74	–	3866	2262	0	–	–	3363	2276	13,9	–
		4117				3884					3410			29,5
<b>Образцы–половинки плиты, нагрузка 70 %</b>														
1	–	4201	2280	45	–	2866	2256	–2,4	24,7	–	–	–	–	–
2	–	4164	2239	27	–	2789	2222	–17	26,0	–	–	–	–	–
3	–	4086	2264	33,8	–	2521	2255	–8,3	–	–	2031	2148	–107	17,6
2	–	4154	2229	27	–	2789	2212	–17	–	–	2140	2172	–40	18,4
		4147				2725			254		2085			18,0

## Окончание таблицы 4. 16

№ п/п	15 циклов					20 циклов				
	$V_1$ , м/с		$m_1$ , г	$\Delta m$ , г	$f_{cm}$ , МПа	$V_2$ , м/с		$m_2$ , г	$\Delta m$ , г	$f_{cm}$ , МПа
	УК-1401	УК-14П				УК-1401	УК-14П			
Целая плита, нагрузка 50 %										
3	4400	3210	4670	-10	35,2	–	–	–	–	–
4	4320	3505	4730	0	36,1	–	–	–	–	–
5	4380	3670	4680	10	–	4090	3257	4680	0	318
6	4510	3330	4685	5	–	4170	3090	4675	-10	28,5
	4402	3429			35,7	4130	3174			30,15
Образцы-половинки плиты, нагрузка 50 %										
3	–	2275	2247	-15	18,8	–	–	–	–	–
4	–	2310	2265	-11	21,7	–	–	–	–	–
		2292			20,5					

Результаты испытаний образцов-кубов, полученных разрезкой плит (см. табл. 4.16), подтверждают ранее приведенные данные (см. п. 4.2.2) о резком ускорении деструкции бетона при сочетании механической нагрузки и циклического воздействия из-за нарушений структуры бетона по плоскости разреза и вскрытия внутренних (более пористых) объемов бетона вибропрессованных изделий (плит).

Испытания с воздействием динамической (ударной) нагрузки (табл. 4.17). Испытания осуществили на образцах-плитах по методике динамического (ударного) воздействия копра, подробно описанной в предыдущих разделах.

Таблица 4.17

Изменение свойств бетона при динамической (ударной) нагрузке на образцы-плиты (без разрезки)

Образцы – целая плита				
$V_{нас}$ , м/с		$m_1$ , г	$\Delta m$ , г	$f_{cm}$ , МПа
УК-1401	УК-14П			
1	2	3	4	5
4830	4160	4640	100	–
4850	4114	4650	120	–
4600	4109	4620	110	–
4930	4158	4710	110	–

Окончание табл. 4.17

1	2	3	4	5
4780	4197	4660	100	–
4630	4180	4630	120	–
<i>4770</i>	<i>4153</i>			
4650	3721	4645	5	37,0
4730	3679	4660	10	38,0
4560	3677	4640	20	–
4620	3742	4710	0	–
4710	3780	4680	20	–
4690	3830	4640	10	–
<i>4660</i>	<i>3772</i>			<i>37,5</i>
4390	3544	4640	0	35,5
4440	3446	4715	5	34,8
4550	3294	4680	0	–
4385	3387	4610	0	–
<i>4441</i>	<i>3418</i>			<i>35,2</i>
1	2	3	4	5
4280	3270	4670	–10	31,8
4110	3230	4585	–25	30,1
<i>4195</i>	<i>3250</i>			<i>31</i>

Отличие состояло в том, что удары наносились (по верхней грани изделия) по одной из половин плит, которую затем загрузжали через пластины, контролируя изменение прочности бетона на сжатие. Удары (серия – 30 ударов копра) наносили до циклических испытаний и через каждые 5 циклов, по оттаившим образцам.

Из данных табл. 4.17 следует, что ударная сосредоточенная нагрузка по уровню отрицательного воздействия на бетон (по причинам, рассмотренным в предыдущих разделах исследований) соотносится с влиянием статической нагрузки более 60–70 % от проектной прочности бетона (см. данные табл. 4.16). Так, уже после 10 циклов замораживания-оттаивания в растворе соли и трех серий ударов прочность бетона снизилась с 38 МПа до уровня в 35,25 МПа, т. е. на 7,2 %, а через 15 циклов и четырех серий ударов – до 31 МПа, т. е. на 18,4 %.

Изложенное согласуется с ранее полученными данными (см. раздел 4.3.4) для бетона изготовленных образцов-кубов и подтверждает обоснованность вывода о чрезвычайной опасности для долговечности тротуарных покрытий ударной механической нагрузки.

#### 4.4. Обобщение результатов экспериментов

Результатами испытаний подтверждено, что солевое воздействие при циклическом замораживании-оттаивании на бетон способствует многократному ускорению процесса его деструкции, в сравнении с циклическими испытаниями в водной среде (в экспериментах с «глубоким» замораживанием до трех раз); при этом агрессивное воздействие солей не прекращается в период эксплуатации изделий покрытий при положительной температуре среды, что подтверждают результаты испытаний с переменным насыщением бетона раствором NaCl и высушиванием.

Установлены закономерности изменений прочности, массы образцов, скорости распространения в них ультразвука, истираемости мелкозернистого бетона и бетона со щебнем в зависимости от продолжительности циклических испытаний и дополнительного воздействия статической и динамической (ударной) нагрузкой на бетон. При этом выявлено:

– что статическая нагрузка значениями до 40 % от прочности на сжатие бетона проектного возраста не оказывает определяющего влияния на кинетику изменений его физико-технических свойств в процессе циклического замораживания-оттаивания; рост статической нагрузки до 50 % от прочности проектного возраста ускоряет процесс деструкции бетона в этих условиях, а повышение ее до 60–70 % при циклическом замораживании-оттаивании приводит к ускоренному разрушению бетона;

– что при воздействии знакопеременной температуры на бетон и динамических (ударных, сосредоточенно приложенных) нагрузок процесс разрушения его структуры и снижения прочности ускоряется и, примерно, соответствует по уровню воздействия статических «нагрузок» более 60 % от его прочности в проектном (28 сут) возрасте; то есть, (ударные, сосредоточенно приложенные) динамические нагрузки на бетон наиболее опасны, если их оценивать с позиций обеспечения его долговечности;

– что износостойчивость бетона снижается при совместном воздействии циклического замораживания-оттаивания и статической нагрузки сверх 60–70 % от проектной прочности и, особенно интенсивно, в случае комплексного циклического воздействия сре-

ды и ударных сосредоточенных нагрузок, способствующих трещинообразованию в бетоне.

Выявлена непосредственная взаимосвязь и взаимозависимость между изменениями скорости распространения ультразвукового импульса и изменениями структуры бетона в процессе испытаний на морозостойкость (в водной среде и солевом растворе), которые отражают изменяющиеся факторы – водосодержание (влажность) бетона и его прочность, как для случая испытаний без дополнительных воздействий, так и под дополнительным влиянием механических нагрузок.

Установлены закономерности изменений скорости ультразвука, необходимые для разработки методики ускоренной (оперативной) оценки морозостойкости бетона до эксплуатации изделий [114, 116], а также определения фактического состояния бетона эксплуатируемых покрытий на момент его оценки и прогнозирования величины «остаточной» морозостойкости бетона, а на этой основе – эксплуатационной долговечности покрытия [114, 115].

Определено, что по значениям скорости ультразвука, изменяющимся в процессе испытаний образцов бетона на морозостойкость (как в водной среде, так и солевом растворе (указанные далее периоды в последнем случае короче по времени)), возможно выделить три стадии структурно-прочностных изменений в вибропрессованном бетоне испытываемых образцов или эксплуатируемых покрытий. Первая стадия – это период уплотнения его структуры, отражающийся в росте прочности и скорости ультразвука; вторая – стабилизация структуры при примерном постоянстве прочности и скорости ультразвука и третья – начало и развитие деструкции бетона, отражаемой снижением скорости ультразвука и прочности. При этом изменение (снижение) скорости ультразвука, предшествует началу снижения прочности бетона.

Установлено, что морозостойкость образцов вибропрессованного бетона, полученных резкой плит, резко снижается относительно как специально изготовленных в формах образцов-кубов, так и натуральных образцов-плит. Разница в показателях морозостойкости бетона настолько значительна, что, на наш взгляд, требует внесения дополнений в СТБ 1152-99 в части недопустимости изготовления образцов для этих испытаний резкой готовых изделий, либо введе-



ния соответствующих поправочных коэффициентов после дополнительных исследований.

Экспериментально выявлено, что качественно отформованный мелкозернистый бетон и, тем более, бетон с крупным заполнителем характеризующиеся, соответственно, средней плотностью:  $\rho_{м.б} \geq 2300$  кг/м<sup>3</sup> и  $\rho_b \geq 2400$  кг/м<sup>3</sup>, при водопоглощении по массе  $W_m^{м.б} \leq 5\%$  для мелкозернистого бетона при  $W_m^b \leq 4,0\%$ , прочностью на сжатие в проектном возрасте:  $f_{см28}^{м.б} \geq 45$  МПа;  $f_{см28}^b \geq 55$  МПа, обеспечивает марку по морозостойкости в солевой среде «F250» и более. При этом даже после «300» и «400» циклов испытаний образцов мелкозернистого бетона и бетона со щебнем их прочность на сжатие составила ~ 30 МПа и ~ 35 МПа, соответственно, при потерях массы не более 3,0% и вполне качественном внешнем виде образцов, т.е. без явно выраженных признаков морозной деструкции.

Подтверждено, что выявленные на контрольных образцах при сквозном прозвучивании закономерности изменений скорости ультразвука соответствуют таковым при прозвучивании бетона в процессе испытаний «с поверхности» и тем самым обеспечивает возможность контроля за состоянием бетона тротуарных покрытий в процессе его эксплуатации путем оценки без изъятия его элементов. В результате расширяются возможности неразрушающего контроля за состоянием покрытий, их планового мониторинга, ремонта и замены (при необходимости) [114, 115].

## 5. ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА НА СЖАТИЕ ОТ ТИПОРАЗМЕРОВ ОБРАЗЦОВ

### 5.1. О методике стандартных испытаний бетона мелкоштучных изделий на прочность и общая методика исследований

*Методика стандартизированных испытаний* при определении прочности бетона на сжатие и изгиб применительно к мелкоштучным вибропрессованным изделиям (тротуарным плитам, бортовому камню) предложена в 1999 году и введена в действие СТБ 1152–99. Прошедшие годы пользования стандартом показали, что, с одной стороны, появилось однообразие в оценке прочности бетона вибропрессованных изделий на основе единой для всех методики, а с другой – выявилось ее несовершенство в части определения переходного коэффициента от испытаний специально изготовленных образцов-кубов (по ГОСТ 10180 или ГОСТ 28570) или базовых образцов и «небазовых» образцов в виде изделий или их фрагментов (для бортового камня, например).

Настоящие исследования преследуют цель – уточнить границы применимости действующего метода испытаний и, при необходимости, предложить соответствующие коррективы в СТБ 1152–99.

Следует отметить, что отраженная в СТБ 1152–99 возможность определения не только прочности на сжатие бетона, но и его прочности на растяжение при изгибе фактически не применяется на практике. Оценка прочности на соответствие классу бетона осуществляют по СТБ 1544–2005, согласно которому нормируется только прочность бетона на сжатие. Поэтому исследования, результаты которых приведены в настоящей главе, были ориентированы на контроль прочности бетона на сжатие.

*Сущность стандартизированного метода.* Определение прочности бетона плит тротуарных и камней бортовых бетонных состоит в измерении минимальных усилий, разрушающих изделия или специально изготовленные образцы бетона при их статическом нагружении с постоянной скоростью роста нагрузки, и последующем вычислении напряжений при этих условиях в предположении упругой

работы материала и дальнейшей обработки полученных результатов испытаний.

*Изготовление и порядок отбора образцов.* Контрольными образцами для испытаний могут быть изделия из вибропрессованного бетона, стандартные образцы, выпиленные (выбуренные) из этих изделий по ГОСТ 28570, а также образцы по ГОСТ 10180, изготовленные из бетонной смеси, состав которой, жесткость и технология изготовления соответствуют фактическим параметрам бетонной смеси, используемой для изготовления изделий. В последнем случае бетонную смесь уплотняют на стандартной лабораторной виброплощадке с жестко закрепленной формой и с пригрузом, обеспечивающим получение бетона со средней плотностью, отличающейся от средней плотности бетона в изделиях, согласно первой редакции СТБ 1152–99, не более чем на  $50 \text{ кг/м}^3$  и согласно изменению № 2 к нему – не более чем на  $25 \text{ кг/м}^3$ .

Методы определения прочности выпиленных (выбуренных) образцов принимают по ГОСТ 28570, изготовленных на виброплощадке с пригрузом – по ГОСТ 10180.

Размеры изделий и (или) их фрагментов для определения прочности бетона на сжатие и стальных пластин для проведения испытаний должны соответствовать указанным в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Размеры образцов и стальных пластин

Размеры изделий, мм			Размеры стальных пластин, мм		
Длина	Ширина	Высота	Длина	Ширина	Толщина
70-150	70-100	50-70	70	70	20
100-200	101-150	71-100	100	100	20
150-300	151-200	101-150	150	150	20

Следует обратить внимание, что допускаемое по ГОСТ 10180, а на этом основании и СТБ 1152–99 отклонение средней плотности бетона на величину до  $50 \text{ кг/м}^3$  для вибропрессованных изделий чрезмерно велико. По отношению к структуре тяжелого бетона с примерной средней плотностью в  $2400 \text{ кг/м}^3$  это соответствует ~ 2%-му росту водопоглощения, а для мелкозернистого вибропрессованного бетона (с примерной средней плотностью  $2250 \text{ кг/м}^3$ ) со-

ставит:  $50 : 2250 \times 100 \sim 2,22 \%$ , что (при снижении средней плотности) будет сопровождаться недопустимым снижением морозостойкости бетона. Поэтому на основании исследований авторов, внесено изменение данного положения стандарта на запись в виде:  $\pm 25 \text{ кг/м}^3$  от средней плотности бетона в изделиях, что снижает ее допускаемое отклонение, примерно, до  $1 \%$ , одновременно существенно снижается влияние изменений в структуре бетона на показатели его прочности, проницаемости и морозостойкости.

*Твердение и хранение образцов.* После формования изделия и образцы (далее по тексту – образцы), предназначенные для твердения в нормальных условиях, должны быть помещены в камеру, обеспечивающую у поверхности образцов нормально-влажностные условия, т.е. температуру  $(20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$  и относительную влажность воздуха  $(95 \pm 5) \%$ . Образцы укладывают на подкладки так, чтобы расстояние между образцами, а также между образцами и стенками камеры было не менее  $5 \text{ мм}$ . Площадь контакта образца с подкладками, на которых он установлен, не должна составлять более  $30 \%$  площади опорной грани образца. Образцы в камере нормально-влажностного твердения не должны непосредственно орошаться водой. Допускается хранение образцов под слоем влажного песка, опилок или других систематически увлажняемых гигроскопичных материалов.

Образцы, предназначенные для твердения в условиях тепловой обработки, должны быть помещены в тепловой агрегат и твердеть там вместе с изделиями по принятому на производстве режиму.

После окончания тепловой обработки образцы испытывают или хранят в камере нормально-влажностного твердения.

Допускаются другие условия твердения образцов, если соответствующей нормативно-технической документацией.

Отклонения между собой значений средней плотности бетона отдельных серий и средней плотности отдельных образцов в каждой серии к моменту их испытания *не должны превышать  $50 \text{ кг/м}^3$* .

Последнее требование применительно к вибропрессованным изделиям вносит существенные колебания в показатели прочности и морозостойкости бетона. Требуется пересмотр данного положения стандарта с ограничением:  $\Delta \rho_{\sigma}^0 \leq (\pm 25) \text{ кг/м}^3$  бетона, что обеспечит снижение разброса значений прочности при ее контроле и величин

показателя морозостойкости бетона при серийном производстве изделий и в процессе контрольных испытаний.

Подготовка образцов к испытаниям и условия их проведения соответствуют ГОСТ 10180 и ГОСТ 26433.1, а проведение испытаний при определении прочности бетона соответствует ГОСТ 10180.

Схема испытания образцов с использованием стальных пластин по прочности бетона на сжатие по СТБ 1152–99.

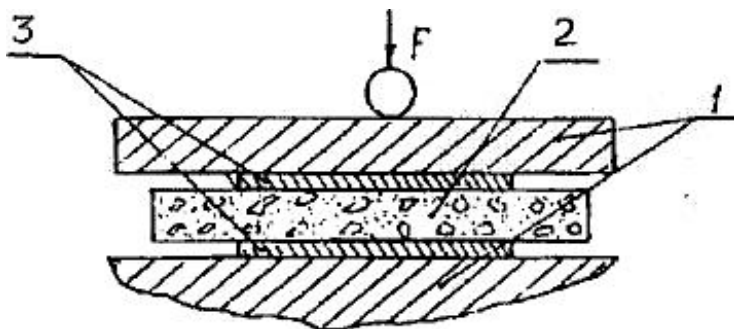


Рис. 5.1. Схема испытания плит: 1 – нагрузочная плита испытательной машины; 2 – испытуемая плита; 3 – стальные пластины

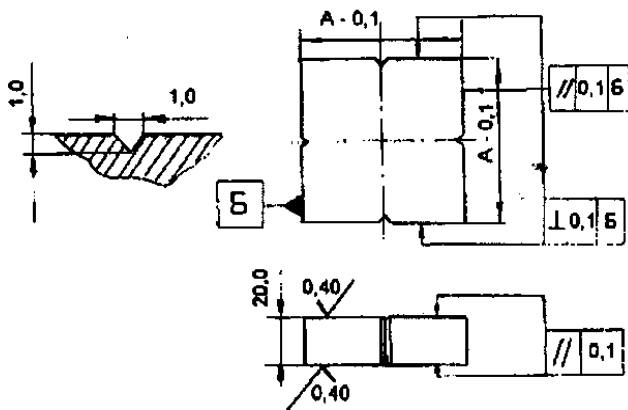


Рис. 5.2. Стальные пластины. Материал: сталь по ГОСТ 4543–71 [72], HRC<sub>3</sub> – не менее 56

*Об основных положениях методики определения переходного коэффициента при определении прочности бетона на сжатие по СТБ 1152–99*

1. Переходный коэффициент определяют для бетонов классов по прочности на сжатие от С 18/22.5 (В 22,5) и выше путем проведения сравнительных испытаний образцов базового и небазового размеров.

2. При определении прочности на сжатие за базовые образцы принимают образцы-кубы, размеры и технология изготовления которых должны соответствовать требованиям ГОСТ 10180.

*Базовые образцы* изготавливают из бетонной смеси, состав и жесткость которой соответствуют фактическим параметрам смеси, используемой для изготовления изделий. Бетонную смесь уплотняют на стандартной лабораторной виброплощадке с жестко закрепленной формой и с пригрузом, обеспечивающим давление для получения бетона средней плотности в соответствии с п. 5 данного приложения.

*За небазовые образцы* принимают непосредственно изделия, подготовленные к проведению испытаний в соответствии с требованиями настоящего стандарта.

Образцы базового и небазового размеров твердеют, хранятся до испытания в одинаковых условиях.

3. Для установления значений переходных коэффициентов испытывают не менее 5 серий образцов базового и небазового размеров.

Данное положение СТБ 1152–99 *следует дополнить указанием*, что в серии должно быть не менее 2 образцов.

4. Испытания на сжатие базовых образцов проводятся в соответствии с требованиями ГОСТ 10180.

Испытания небазовых образцов на сжатие проводятся в соответствии с требованиями настоящего стандарта.

5. Для соблюдения требований 2.2.6 ГОСТ 10180 необходимо проконтролировать среднюю плотность бетона образцов. Плотность определяется до проведения испытаний на прочность методом *гидростатического взвешивания по ГОСТ 12730.1*.

*Данное положение СТБ 1152–99 требует корректировки*. В случае определения средней плотности бетона образцов для испытаний

на прочность (сжатие) через гидростатическое взвешивание они будут в водонасыщенном состоянии, что изменит показатель прочности бетона.

При контроле прочности бетона на образцах неправильной формы среднюю плотность бетона необходимо определять с помощью гидростатического взвешивания, но делать это надо на образцах-аналогах, не подвергая основные образцы водонасыщению.

На образцах правильной геометрической формы среднюю плотность бетона естественной влажности допускается определять без гидростатического взвешивания, либо с гидростатическим взвешиванием на образцах-аналогах.

6. Переходной коэффициент ( $K_i$ ) определяется с точностью до 0,01 как отношение средних прочностей серий бетона базовых и небазовых образцов по формуле

$$K_i = \frac{f_{с.баз.}}{f_{с.небаз.}}, \quad (5.1)$$

где  $f_{с.баз.}$  — прочность серии базовых образцов, МПа;

$f_{с.небаз.}$  — прочность серии небазовых образцов, МПа.

Результаты сравнительных испытаний оформляют в виде табл. 5.2, а среднее значение переходного коэффициента  $\bar{K}$  определяют по формуле

$$\bar{K} = \sum_{i=1}^n K_i / n. \quad (5.2)$$

Таблица 5.2

### Форма записей

№ серии	Образцы базового размера		Образцы небазового размера		Разность плотностей $\Delta \rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Переходной коэффициент $K_i$
	Средняя прочность серии на сжатие $f_{с.баз.}$ , МПа	Средняя плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Средняя прочность серии на сжатие $f_{с.небаз.}$ , МПа	Средняя плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>		

7. Для исключения результатов, содержащих грубые ошибки, и определения достоверности полученного переходного коэффициента необходимо провести обработку данных, полученных в ходе испытаний.

Среднее арифметическое полученных переходных коэффициентов  $\bar{K}$  вычисляется по формуле

$$\bar{K} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i, \quad (5.3)$$

где  $K_i$  — переходной коэффициент, рассчитываемый по результатам  $i$ -й серии испытаний базовых и небазовых образцов;

$n$  — число серий испытаний.

8. Далее по методике СТБ 1152–99 осуществляют проверку полученного значения переходного коэффициента  $K$  на достоверность и возможность применения в соответствии с классическими закономерностями математической статистики.

8.1. Вначале определяют наличие грубоошибочных результатов испытаний.

Для этого определяют среднее квадратическое отклонение  $S_K$  по установленным величинам переходных коэффициентов  $K_i$  при числе результатов испытаний  $n$  (должно быть  $n \geq 5$ ) по формуле

$$S_K = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2 \rho_{ц}^o}, \quad (5.4)$$

а затем производят отбраковку грубоошибочных результатов.

Отбраковку результатов осуществляют пользуясь распределением величины  $V_{расч}$ , которую вычисляют по формулам

$$V_{расч} = \frac{K_{max} - \bar{K}}{S_K} \quad (5.5)$$



или

$$V_{расч} = \frac{\bar{K} - K_{\min}}{S_K}, \quad (5.6)$$

где  $K_{\min}$ ,  $K_{\max}$  – минимальное и максимальное значение переходных коэффициентов.

Результат отбраковывается, если выполняется следующее условие:

$$V_{расч} > V_{табл}. \quad (5.7)$$

Значения  $V_{табл}$  для различных чисел серий измерений  $n$  и вероятностей  $\alpha$  приведены в табл. 4.11. Для вычисления переходных коэффициентов рекомендуется принимать значение вероятности ( $\alpha$ ), равной 0,95.

В СТБ 1152–99 *отсутствует уточнение*, что в таком случае следует принимать табличное значение  $V_{табл}$ , соответствующее колонке:  $q = 0,05$ , т.е. 5 % - му квантилю или «обеспеченности» (вероятности) 0,95.

**Недостатками изложения СТБ 1152–99** являются отсутствие четкости определений по использованию полученных значений переходного коэффициента  $\bar{K}$ .

Это следует осуществлять после первичного расчета  $\bar{K}$  и оценки его значения по среднему квадратическому отклонению  $S_K$  на основании определения величин грубоошибочных результатов испытаний  $V_{расч}$  (max и min).

Так, если все значения  $K_i$  меньше  $V_{расч}^{\max}$  и больше  $V_{расч}^{\min}$ , т. е. соблюдается условие, что

$$V_{расч}^{\min} < K_i < V_{расч}^{\max}, \quad (5.8)$$

то величина  $\bar{K}$  и будет определяемым переходным коэффициентом. Дополнительной математической обработки и оценки его достоверности не требуется.

Она нужна в случае нарушения приведенного условия и отбраковки части результатов.

Кроме того, не указано, что остаточное количество результатов испытаний по критерию Стьюдента должно быть не менее 4-х, т.е. при 5 образцах базового и не базового размера допускается не более одного грубоошибочного результата. Иначе определение надо производить на новой серии образцов.

8.2. После отбраковки результатов среднеарифметическое и среднее квадратическое отклонение результатов измерений определяют заново.

Оценку среднего квадратического отклонения среднего арифметического  $S_k$  вычисляют по формуле

$$S_k = \sqrt{\frac{1}{(n^x - 1)n} \cdot \sum_{i=1}^n (K_i - \bar{K})^2}. \quad (5.9)$$

Доверительные границы погрешности определения переходного коэффициента  $\varepsilon$  вычисляют по формуле

$$\varepsilon = t_s \cdot S_k, \quad (5.10)$$

где  $t_s$  – коэффициент Стьюдента, приведенный в табл. 5.3. Коэффициент Стьюдента рекомендуется принимать при значении вероятности Р, равном 0,95.

Значение переходного коэффициента допускается для дальнейшего применения при выполнении следующего условия:

$$\varepsilon \leq 0,1 K. \quad (5.11)$$

### **Табличные значения расчетных величин**

Таблица 5.3

Значения  $V_{\text{табл}}$  при различных числах  $n$

$n$	$q = 1 - \alpha$				$n$	$q = 1 - \alpha$			
	0,10	0,05	0,025	0,01		0,10	0,05	0,025	0,01
5	1,731	1,869	1,917	1,955	15	2,326	2,493	2,638	2,808

Окончание табл. 5.3

$n$	$q = 1 - \alpha$				$n$	$q = 1 - \alpha$			
	0,10	0,05	0,025	0,01		0,10	0,05	0,025	0,01
6	1,894	1,996	2,067	2,130	16	2,354	2,523	2,670	2,837
7	1,974	2,093	2,182	2,265	17	2,380	2,551	2,701	2,871
8	2,041	2,172	2,273	2,374	18	2,404	2,557	2,728	2,903
9	2,097	2,237	2,349	2,464	19	2,426	2,600	2,754	2,932
10	2,146	2,294	2,414	2,540	20	2,447	2,623	2,778	2,959
11	2,190	2,383	2,470	2,606	21	2,467	2,644	2,801	2,984
12	2,229	2,387	2,519	2,663	22	2,486	2,664	2,823	3,008
13	2,264	2,426	2,562	2,714	23	2,504	2,683	2,843	3,030
14	2,297	2,461	2,602	2,759	24	2,520	2,701	2,862	3,051

Таблица 5.4

Значения коэффициента Стьюдента  $t_s$  для различных степеней свободы и вероятностей  $P$

$k^*$	$P$				$k^*$	$P$			
	0,90	0,95	0,98	0,99		0,90	0,95	0,98	0,99
4	2,132	2,776	3,747	4,604	15	1,753	2,131	2,602	2,947
5	2,015	2,571	3,365	4,032	16	1,746	2,120	2,583	2,921
6	1,943	2,447	3,143	3,707	17	1,740	2,110	2,567	2,898
7	1,895	2,365	2,998	3,499	18	1,734	2,101	2,552	2,878
8	1,860	2,306	2,896	3,355	19	1,729	2,093	2,539	2,861
9	1,833	2,262	2,821	3,250	20	1,725	2,086	2,528	2,845
10	1,812	2,228	2,764	3,169	21	1,721	2,080	2,518	2,831
11	1,796	2,201	2,718	3,106	22	1,717	2,074	2,508	2,819
12	1,782	2,179	2,681	3,055	23	1,714	2,069	2,500	2,807
13	1,771	2,160	2,650	3,012	24	1,711	2,064	2,492	2,707
14	1,761	2,145	2,624	2,977	25	1,708	2,060	2,485	2,787

$k^* = n - 1$ ,  $n$  – число серий испытаний.

*Общая методика и образцы бетона для испытаний.* В настоящих исследованиях использовали цементно-песчаный бетон и бетон со щебнем гранитным при водоцементном отношении В/Ц  $\sim 0,33-0,36$  и  $0,36-0,40$  соответственно при показателе жесткости  $J \sim 15-25$  с. Образцы бетона уплотняли на виброплощадке со стандартными параметрами ( $A = 0,5$  мм;  $f \approx 50$  Гц) в течение времени и под пригрузом, обеспечивающим получение расчетного качества или степени его уплотнения. Последнюю оценивали по сред-

ней плотности свежеотформованного бетона, принятую не ниже для цементно-песчаного бетона –  $2250 \text{ кг/м}^3$ , а для бетона со щебнем –  $2350 \text{ кг/м}^3$ .

Во всех случаях для мелкозернистого бетона использован базовый состав цементно-песчаного бетона: расход цемента Ц = 500 кг, расход сухого песка П = 1600 кг, расход воды В  $\approx 160\text{--}170$  л, примерно соответствующий производственным составам предприятий-производителей элементов благоустройства и для изготовления образцов бетона со щебнем использовали состав, характеризующийся расходом цемента 450 кг, щебня гранитного 600 кг, песка 1150 кг на  $1 \text{ м}^3$  бетона и воды 160–180 л.

*Целью настоящих исследований* является выявление закономерностей влияния типоразмера испытываемых образцов бетона или изделий из него и площади (размеров) стальных пластин для испытаний на значение прочности на сжатие и разработка рекомендаций для осуществления таких испытаний. В частности, проверка положений действующего СТБ 1152–99 в части определения прочности на сжатие плит тротуарных и камней бортовых, изготовленных вибропрессованием.

В соответствии с этой целью подвергли испытаниям на сжатие серии образцов, специально изготовленных с различной высотой слоя формируемого бетона (30–150 мм), а также натуральные серийно изготавливаемые предприятиями (на базе ОАО «Минскжелезобетон», завода железобетонных изделий «УДМ-Сиб Мингорисполкома» и других предприятий) тротуарные плиты и бортовой камень различных типоразмеров и конфигурации.

Особенности методик испытаний по выявлению влияния различных факторов: высоты образца, размеров в плане, размеров пластин для испытаний, прямых испытаний на сжатие изделий геометрически «правильной» формы и других, приведены в соответствующих разделах настоящей главы.

## 5.2. Влияние высоты образцов на показатель прочности бетона

Из многолетней практики определения прочности на сжатие бетонных образцов различной высоты следует общепризнанный постулат ее влияния на результат испытания, согласно которому предел прочности на сжатие снижается до соотношения высоты к наименьшему размеру основания как 4 : 1. Далее увеличение высоты не оказывает существенного влияния, но приобретает значение «гибкость» испытываемой системы и чувствительность к эксцентриситету при приложении нагрузки.

Этот постулат нашел свое отражение в общепринятом определении конструктивных расчетных значений прочности бетона на сжатие как призменной прочности, а в действующем СНБ 5.03.01–2002 и общеевропейских нормативах – в виде прочности образцов-цилиндров: диаметр – 150 мм, высота – 300 мм, при площади поперечного сечения, соответствующей 80 % площади сечения образцов-кубов с ребром 150 мм ( $f_{ск}$  – нормативное сопротивление бетона осевому сжатию).

При уменьшении соотношения « $h : a$ » от «4:1» прочность на сжатие образцов-призм и образцов-кубов сближается.

В случае определения прочности бетона по образцам-кубам стандартных размеров с размерами грани: 300; 200; 150 (базовый); 100 и 70 мм, в расчет прочности, приведенной к базовому размеру, вводят направленный масштабный коэффициент. Его величина по ГОСТ 10180 составляет для 150 мм – 1,0, а для: 70 – 0,85; 100 – 0,95; 200 – 1,05 и 300 – 1,10 долей единицы.

Физический смысл различий масштабного коэффициента отражает закономерность увеличения показателя предела прочности бетона с уменьшением типоразмеров образца (при прочих равных условиях) за счет возрастающего воздействия сил трения-сцепления поверхностей контакта образца с плитами пресса в процессе испытаний.

С уменьшением сечения и высоты образца относительное значение сил трения-сцепления возрастает и проявляется в росте ограничения поперечных деформаций бетона образца при нагружении. В результате для одинаковых нагрузок при меньших типоразмерах образцов-кубов их деформации в поперечном направлении ниже,

чем в больших по размерам. Для равных деформаций требуется увеличение нагрузки.

Вместе с тем известно, что прочность бетона на сжатие зависит от его способности воспринимать растягивающие усилия, возникающие в поперечном направлении при осевом сжатии. Таким образом, снижение типоразмера стандартизированных образцов-кубов относительно базового (150x150x150 мм) сопровождается «завышением», а повышение наоборот, – снижением определяемого предела прочности бетона при сжатии при прочих равных условиях.

Изложенные положения, относящиеся к масштабному коэффициенту и масштабному фактору при испытании бетона в целом, не вызывают сомнений и полностью соответствуют ситуации, когда образцы для испытаний подготовлены по стандартным размерам. Однако в практике вибропрессованного бетона не всегда возможно изготовить образцы в полном соответствии с условиями формирования изделий. Кроме того, зачастую (особенно в спорных вопросах) необходимо определять прочность бетона в изделиях. Причем эти изделия могут характеризоваться нестандартной конфигурацией и типоразмерами (в плане и по высоте). Учитывая эти обстоятельства, а также недостаточность конкретной информации о влиянии масштабного фактора при нестандартных ситуациях испытаний бетона на прочность была выполнена серия разнообразных экспериментов, результаты которых представлены в настоящей главе.

В табл. 5.5 представлены результаты испытаний бетона на прочность на сжатие в зависимости от высоты образцов (в таблице размеры указаны:  $a \times b \times h$  (высота)). Их изготавливали (серии I-VI) из цементно-песчаного бетона состава и по методике, приведенных в п. 2.1, и пропаривали ( $t \sim 80$  °C) по режиму: 2 + 3 + 6 + 9 ч. (остывание в пропарочной камере). Через 24 ч после распалубки образцы испытывали на сжатие, с целью получения сравнительных данных по прочности на сжатие при прочих равных условиях. В сериях образцов VI-IX использовали изделия (тротуарные плиты) и фрагменты (бортовой камень) серийного производства заводов ОАО «Минскжелезобетон», «УДМСиб Мингорисполкома» и других предприятий.

Таблица 5.5

## Влияние высоты на показатель прочности бетона

№ серии и образцов	Вид образцов (маркировка; конфигурация; размеры)	Размеры поперечного сечения/площадь, см/см <sup>2</sup>	Высота образцов, см	Разрушающая нагрузка, кН	Прочность бетона	
					МПа	%
1	2	3	4	5	6	7
а) Специально изготовленные образцы бетона						
I	10 x 10 x 15	10 x 10/100	15	–	27,7*	100
1				269	26,9	
2				291	29,1	
3				280	28,0	
4				275	27,5	
5				260	26,0	
6				288	28,8	
II	10 x 10 x 10	10 x 10/100	10	–	28,4	102,5
				288	28,8	
2				269	26,9	
3				305	30,5	
4				273	27,3	
5				280	28,0	
6				290	29,0	
III	10 x 10x 8	10 x 10/100	8	–	31,6	114
1				318	31,8	
2				325	32,5	
3				330	33,0	
4				298	29,8	
5				333	33,3	
6				295	29,5	
IV	10 x 10 x 6	10 x 10/100	6	–	38,0	119
1				324	32,4	
2				348	34,8	
3				301	30,1	
4				325	32,5	

\* Здесь и далее в таблице среднее значение прочности по шести образцам.

Продолжение табл. 5.5

1	2	3	4	5	6	7
5				348	34,8	
6				320	32,0	
V	10 x 10 x 5	10 x 10/100	5	–	38,1	138
1				385	38,5	
2				368	36,8	
3				343	34,3	
4				395	39,5	
5				390	39,0	
6				406	40,6	
VI	10 x 10 x 3	10 x 10/100	3	–	48,0	173
1				460	46,0	
2				490	49,0	
3				445	44,5	
4				470	47,0	
5				481	48,1	
6				455	45,5	
<b>б) Образцы-изделия (пластина 10x10 см)</b>						
VII	<b>Бр100.30.15 (бортовой камень)</b>	10 x 10/100	15	–	34,0	100
1				356	35,6	
2				338	33,8	
3				344	34,4	
4				328	32,8	
5				350	35,0	
6				320	32,0	
VIII	<b>БРГ100.20.8 (бортовой камень тротуара)</b>	10 x 10/100	8	–	43,5	128
1				420	42,0	
2				460	46,0	
3				408	40,8	
4				484	48,4	
5				408	40,8	
6				430	43,0	



Окончание табл. 5.5

1	2	3	4	5	6	7
IX	П20.10.8МА (плита тротуара)	10 x 10/100	8	–	40,1	118
1				374	37,4	
2				381	38,1	
3				409	40,9	
4				442	44,2	
5				420	42,0	
6				381	38,1	
X	П20.10.6МА (плита тротуара)	10 x 10/100	6	–	45,0	132
1				479	47,9	
2				498	49,8	
3				393	39,3	
4				440	44,0	
5				455	45,5	
6				434	43,4	

Из полученных данных по специально изготовленным образцам следует однозначно выраженная зависимость прочности бетона на сжатие от их высоты при равенстве во всех случаях площади поперечного сечения, равной в анализируемых сериях образцов:  $F = 100 \text{ см}^2$ .

Так, если принять за 100 % относительную прочность образцов высотой базового стандартного размера, равной 15 см, то относительная прочность бетона при иной высоте образца составит: для  $h = 10 \text{ см} \sim 102,5 \%$ ; для  $h = 8 \text{ см} \sim 114 \%$ ; для  $h = 6 \text{ см} \sim 119 \%$ ; для  $h = 5 \text{ см} \sim 138 \%$  и для  $h = 3 \text{ см} \sim 173 \%$ .

Эти данные соответствуют изложенному ранее теоретическому обоснованию закономерности снижения прочности бетона на сжатие с увеличением высоты испытываемых образцов и наоборот.

Общая тенденция зависимости показателя прочности бетона от высоты образца соблюдается и при испытании образцов в виде изделий, что отражается данными раздела б) серий V/II-X табл. 5.5. Испытания осуществлены на фрагментах бортовых камней (Бр 100.30.15, высота слоя бетона при испытании – 15 см; БРТ 100.20.8, высота – 8 см) и тротуарных плитах: П20.10.8МА (высота 8 см) и П20.10.6МА (высота 6 см). Очевидно соответствие

общей тенденции, заключающейся в росте значений прочности, определенной во всех случаях при сжатии по равной площади (пластины размерами 10 x 10 см), с уменьшением высоты слоя «сжимаемого» бетона. Отметим, что при испытании изделий пластины располагали по углу образца (заподлицо кромок пластин и граней образцов, образующих прямой угол).

Обобщая полученные результаты можно сделать вывод о необходимости обязательного определения переходных коэффициентов для оценки прочности бетона элементов благоустройства при испытании в изделиях, различающихся по высоте слоя испытываемого бетона.

Принципиально возможна оценка закономерности изменения прочности бетона на сжатие в зависимости от высоты образца (изделий) на базе установления коэффициентов изменения относительной прочности бетона. В исследованном диапазоне высоты образцов от 15 до 3 см целесообразно ориентироваться на базовый стандартный размер (15 см), приняв его за единицу, устанавливая производные коэффициенты в зависимости от фактической высоты слоя бетона в изделиях. Возможно за основной образец принимать типоразмер по высоте наиболее массового изготавливаемого изделия.

Анализ значений «прироста» относительной прочности бетона с уменьшением высоты испытываемого слоя бетона позволяет сделать вывод о том, что испытание образцов высотой 5 см и менее не отражают реальной прочности бетона, чрезвычайно завышают ее значение.

Например, относительный прирост прочности бетона по сравнению с прочностью при высоте 15 см составил при снижении последней до 10; 8; 6; 5 и 3 см соответственно: 2,5; 14; 19; 38 и 73 %, то есть резко увеличился (в 2 раза) при переходе к высоте образца в 5 см и в четыре раза при  $h = 3$  см.

Отсюда возникает проблема достоверной оценки прочности бетона при высоте испытываемого образца менее 6 см. Наиболее целесообразным решением было бы принятие испытаний по изготовленным образцам стандартных типоразмеров не менее куба с ребром в 70 мм.

На следующем этапе исследований выполнили эксперименты по определению зависимости показателя прочности бетона на сжатие от типоразмера (площади) испытательных пластин.

### 5.3. Влияние типоразмера пластин на показатель прочности бетона

В соответствии с СТБ 1152–99 для испытаний бетона на прочность на сжатие в вибропрессованных изделиях используются стальные пластины трех типоразмеров с площадью сечения, по которому передается усилие на бетон, соответствующей 225 см<sup>2</sup> (15 x 15 см); 100 см<sup>2</sup> (10 x 10 см) и 49 см<sup>2</sup> (7 x 7 см).

При этом, в соответствии с положениями стандарта, размеры принимаемых для испытаний пластин взаимосвязаны с типоразмерами изделий согласно данным табл. 5.1.

Отметим, что подобный подход отражает объективную необходимость дифференцированного учета специфики испытаний на прочность бетона в различных по размерам изделиях и, особенно, по высоте слоя бетона (влияние последнего на показатель прочности бетона показано на предыдущем этапе исследований).

В международной практике подобных испытаний учет влияния высоты, например, заложен в соответствующем стандарте Чехии (ČSN 73 6131–1). Согласно его требованиям испытания ведут с помощью стальных прямоугольных пластин (7 (семи) типоразмеров) с размерами в плане: а x в ~ (60–120 мм) x (120–240 мм), которые соответственно применяют при высоте изделий (слоя испытываемого бетона) от 55 мм до 115 мм.

Общеввропейские стандарты на плиты бетонные и камни бордюрные бетонные (соответственно: EN 1339: 2003, IDT; EN 1360: 2003, IDT), по которым разработаны СТБ EN 1339–2007 [120] и СТБ FN 1340–2007 [121], определение прочности бетона этих изделий устанавливают по определению прочности на растяжение при изгибе. Соответственно классифицируется качество бетона, т. е. по величине прочности на растяжение при изгибе.

СТБ 1152–99 также допускает определение прочности бетона на растяжение при изгибе с целью оценки его качества. Однако практика применения данного определения незначительна и реализуется только в отдельных случаях, что связано с достаточно значительной сложностью такого испытания в условиях, когда стандартом не предусмотрены и нет в наличии специальных испытательных машин для их осуществления.

В этой связи в настоящих исследованиях сосредоточились на испытаниях, связанных с проблемами определения прочности бетона на сжатие с помощью испытательных пластин.

Результаты сравнительных испытаний бетона в изделиях по СТБ1152–99 при различных типоразмерах пластин и прочих равных условиях приведены в табл. 5.6. В соответствии с требованиями стандартов на тротуарные плиты (СТБ 1071–87\*) и бортовой камень (СТБ 1097–98) прочность бетона в изделиях должна быть не ниже классов С18/22,5 и С25/30 (или более 29 и 39 МПа при коэффициенте вариации 13,5 %) соответственно.

Таблица 5.6

Влияние типоразмера пластины на показатель прочности бетона

№ серии и образцов изделий	Вид образцов (маркировка, конфигурация, размерность)	Размер пластин/площадь, см/см <sup>2</sup>	Размеры образцов, <i>a x b x h</i> , см	Разрушающая нагрузка, кН	Прочность бетона, МПа			
					В образцах	Среднее значение		
1	2	3	4	5	6	7		
Предприятие № 1								
1	П20.10.8 МА	7 x 7/49	9,8 x 19,6 x 7,9	190	38,8	43,9		
					235		48,0	
				9,9 x 19,7 x 8,0	218		44,5	
					218		44,5	
		10 x 10/100	9,8 x 19,9 x 8,1	374	37,4	40,2		
					381		38,1	
				9,8 x 19,6 x 8,0	409		40,9	
					442		44,2	
2	К10.10.8 МА	7 x 7/49	9,8 x 10,0 x 8,1	156	31,8	30,0		
				9,8 x 9,9 x 8,1	137		28,0	
			10 x 10/100	9,9 x 9,9 x 8,1	322		32,2	31,1
					9,8 x 9,9 x 8,2		300	30,0
3	П20.10.6 МЦкр А	7 x 7/49	9,8 x 19,8 x 6,1	212,5	43,4	38,6		
					206	42,0		
				9,8 x 19,9 x 6,0	182,5	37,2		
				156	31,8			

Продолжение табл. 5.6

1	2	3	4	5	6	7
		10 x 10/100	9,9 x 19,8 x 6,1	460	46,0	46,6
				512	51,2	
			9,8 x 19,8 x 6,0	447,5	44,8	
				442,5	44,3	
	П16.11.8 МА	7 x 7/49	11,7 x 15,7 x 8,2	150	30,6	31,0
				164	33,5	
			11,8 x 15,7 x 8,1	158	32,2	
				135	27,6	
			9,8 x 9,9 x 8,2	300	30,0	
3	П20.10.6 МЦкр А	7 x 7/49	9,8 x 19,8 x 6,1	212,5	43,4	38,6
				206	42,0	
			9,8 x 19,9 x 6,0	182,5	37,2	
				156	31,8	
		10 x 10/100	9,9 x 19,8 x 6,1	460	46,0	46,6
				512	51,2	
			9,8 x 19,8 x 6,0	447,5	44,8	
				442,5	44,3	
4	П16.11.8 МА	7 x 7/49	11,7 x 15,7 x 8,2	150	30,6	31,0
				164	33,5	
			11,8 x 15,7 x 8,1	158	32,2	
				135	27,6	
		10 x 10/100	11,7 x 15,8 x 8,1	341	34,1	36,0
			11,6 x 15,7 x 8,2	380	38,0	
5	К20.8 без 1/4	7 x 7/49	19,7 x 19,8 x 7,5	120	24,5	30,7
			19,8 x 19,7 x 7,5	120	24,5	
				213	43,5	
		10 x 10/100	19,7 x 19,7 x 7,4	343,5	34,4	37,2
			19,7 x 19,7 x 7,6	400	40,0	
6	Ф24.22.8	7 x 7/49	21,5 x 23,4 x 8,2	150	30,6	29,1
				135	27,6	
		10 x 10/100	21,6 x 23,3 x 8,2	315	31,5	
<b>Предприятие № 2</b>						
7	П20.10.6 МА	7 x 7/49	19,8 x 9,8 x 6,0	197	40,2	41,3
				201	41,2	
			19,8 x 9,8 x 6,1	235	48,0	
				181	36,9	

Окончание табл. 5.6

1	2	3	4	5	6	7
		10 x 10/100	19,9 x 9,8 x 5,9	354	35,4	43,1
				479	47,9	
			19,9 x 9,8 x 6,0	498	49,8	
				393	39,3	
8	Ф20.16.8 МА	7 x 7/49	19,9 x 16,4 x 8,0	153	31,2	34,8
			11,5 x 7,9 x 8,0	188	38,4	
		10 x 10/100	19,9 x 16,4 x 8,0	362	36,2	36,2
			11,4 x 7,9 x 8,0	380	38,0	
			20,0 x 16,4 x 8,0	393	39,3	
				312	31,2	
9	Треуг. с прямо- уг. основ.	7 x 7/49	23,8/9,9 x 28,1 x 8,1	158	32,2	30,8
				144	29,4	
		10 x 10/100	23,7/10,0 x 28,1 x 8,0	336	33,6	32,1
			23,7/9,9 x 28,1 x 8,0	325	32,5	
				300	30,0	
				325	32,5	
10	К20.8 МА	7x7/49	19,8 x 19,8 x 8,0	180	36,7	35,2
				155	31,6	
			19,8 x 19,8 x 8,1	230	46,9	
				125	25,5	
		10x10/100	19,8 x 19,9 x 8,0	360	36,0	36,1
				350	35,0	
			19,9 x 19,8 x 8,0	372	37,2	
				365	36,5	
11	БРТ100.20.8	7x7/49	19,9 x 12,0 x 8,0	200	40,8	39,4
				200	40,8	
			19,9 x 11,9 x 8,0	180	36,7	
				194	39,4	
		10x10/100	19,9 x 12,2 x 8,0	408	40,8	41,6
				424	42,4	

Обобщая данные табл. 5.6, в целом следует сделать вывод, что все результаты испытаний по прочности бетона на сжатие удовлетворяют основному требованию действующих стандартов на плиты

тротуарные и бортовой камень и по фактическим данным оказались не менее 29 и 39 МПа (для плит и камней) соответственно.

Среднее значение прочности бетона разнообразных по типоразмерам плит по экспериментальным данным табл. 5.6 в целом составило для пластин  $7 \times 7$  ( $49 \text{ см}^2$ ) величину  $\sim 34$  МПа и для пластин  $10 \times 10$  ( $100 \text{ см}^2$ )  $\sim 37,1$  МПа по предприятию № 1 и значения 35,5 и 36,9 МПа по предприятию № 2.

Анализ полученных данных по группам изделий равной толщины (в частности, для разнообразных плит номинальной толщины слоя (высотой) бетона 8 см и 6 см) показывает следующее.

Для плит тротуарных высотой в 8 см среднее значение прочности составило для пластин  $7 \times 7$  ( $49 \text{ см}^2$ ) – 33,2 МПа и для пластин  $10 \times 10$  ( $100 \text{ см}^2$ ) – 34,8 МПа.

Для плит тротуарных высотой в 6 см среднее значение прочности составило для пластин  $7 \times 7$  ( $49 \text{ см}^2$ ) – 39,9 МПа и для  $10 \times 10$  ( $100 \text{ см}^2$ ) – 44,8 МПа.

Для бетона бортового камня (высота слоя испытываемого бетона 8 см) при пластинах  $7 \times 7$  ( $49 \text{ см}^2$ ) – среднее значение прочности равнялось 39,4 МПа и для пластин  $10 \times 10$  ( $100 \text{ см}^2$ ) – 41,6 МПа.

Необходимо отметить общую тенденцию некоторого снижения показателя прочности бетона при использовании пластин меньшего типоразмера, в сравнении с данными для пластин  $10 \times 10$  см, при равенстве высоты слоя бетона в испытываемых изделиях.

Очевидно, с уменьшением площади приложения нагрузки (при уменьшении типоразмера пластин) одновременно уменьшается длина их периметра. В результате снижается объем бетона, вовлеченного в совместную «работу» с пластинами по их кромке и подверженный «смятию-срезу», что отражается в снижении показателя прочности бетона при сжатии через пластины меньшего типоразмера. Кроме этого, с уменьшением размера пластин изменяется соотношение между площадью приложения нагрузки и высотой слоя испытываемого бетона. Так, с уменьшением площади пластины со  $100 \text{ см}^2$  ( $10 \times 10$  см) до  $49 \text{ см}^2$  ( $7 \times 7$  см) при равной высоте испытываемого изделия относительное соотношение «высота образца / размер (площадь) поперечного сечения зоны сжатия» возрастает. То есть косвенно проявляется фактор роста высоты образца.

Таким образом, на основании изложенного следует признать целесообразной градацию размеров испытательных пластин в зависимости от типоразмеров и, особенно, высоты испытываемых изде-

лий. В данном отношении подход, отраженный в СТБ 1152–99 (см. табл. 5.1 настоящего раздела), имеет физическое обоснование и целесообразен с позиций достоверного определения прочности бетона на сжатие в изделиях или по их фрагментам.

#### **5.4. Влияние размеров образцов в плане (ширина, длина, конфигурация) на показатель прочности бетона**

При оценке прочности бетона в образцах-изделиях вынужденно приходится иметь дело с образцами разнообразной конфигурации. При этом форма образцов-изделий может быть как близкой к стандартизированным типоразмерам, так и существенно отличаться от них.

В этой связи наиболее универсальными вариантами контроля прочностных характеристик бетона являются растяжение при изгибе и растяжение при раскалывании. При этом последний вариант наиболее просто реализуем, если применять способ определения с помощью одноосного растяжения при раскалывании путем сжатия испытываемого образца между двумя «ножами» (или прутками диаметром 5 мм) с закруглениями рабочей части в виде диаметра 5 мм [122].

При расположении «ножей» (прутков) в одной плоскости, соосной оси направления приложения сжимающей нагрузки, по сечению образца возникают напряжения растяжения в перпендикулярном направлению сжимающей нагрузки направлении и бетон разрушается от растяжения по линии (и в плоскости) приложения усилия сжатия.

Прочность бетона на одноосное растяжение, определяемая способом раскалывания, практически не зависит от масштабного фактора, т.е. от типоразмера образца. При этом испытание путем раскалывания значительно проще, чем испытание на растяжение при изгибе. В обоих случаях последующий расчет показателя прочности базируется на величинах усилия (нагрузки) при разрушении образца и размерах его поперечного сечения.

Следует отметить, что при раскалывании не представляет трудности и определение площади раскола, так как при любой конфигурации испытываемого изделия в плане площадь его раскола, есть прямоугольник с четко определяемой высотой и шириной сечения.

Теоретическое обоснование расчетных зависимостей для установления прочности бетона на одноосное растяжение при раскалывании образцов различной формы выполнено в 50–60-х годах XX века и требует



уточнения. Однако опыт использования данного метода контроля прочностных характеристик бетона свидетельствует о его применимости и, после выполнения дополнительных исследований с целью уточнения некоторых аспектов применения, мог бы быть рекомендован для оценки прочности бетона мелкоштучных изделий как наиболее рациональный.

В настоящих исследованиях были выполнены испытания образцов-изделий основных типов конфигурации в плане, выпускаемых предприятиями г. Минска, с определением прочности бетона на сжатие в соответствии с СТБ 1152-99 при 3 типоразмерах испытательных пластин  $7 \times 7$  ( $49 \text{ см}^2$ ),  $10 \times 10 \text{ см}$  ( $100 \text{ см}^2$ ) и  $15 \times 15 \text{ см}$  ( $225 \text{ см}^2$ ). Различные типоразмеры пластин использовали с целью максимального пополнения данных об их влиянии на прочность бетона на сжатие в дополнение к приведенным в табл. 5.6.

Конфигурация образцов-плит в плане соответствовала прямоугольной, квадратной, треугольной, волнообразной; образцы бортового камня представлены фрагментами с размерами в плане около  $20 \times 100 \text{ см}$  (при  $h = 8 \text{ см}$ ) и  $50 \times 30 \text{ см}$  (при  $h = 15 \text{ см}$ ). Все образцы-изделия были испытаны в проектном (или превышающем проектный) возраст, кроме позиций предприятия № 3 (бортовой камень с  $h = 15 \text{ см}$ ) и № 4 (тротуарная плита с  $h = 5,8 \text{ см}$ ). Эти изделия испытаны после тепловой обработки на 2-е сутки.

Результаты испытаний сведены в табл. 5.7. Их анализ свидетельствует о том, что явно выраженной зависимости показателя прочности бетона на сжатие (определенной с помощью испытательных пластин) от изменения как конфигурации образцов, так и их типоразмеров в плане не выявлено.

Разброс значений прочности при ее определении с помощью пластин разной площади (типоразмера) на одинаковых образцах-изделиях подтверждает ранее установленную и приведенную в предыдущем разделе закономерность: при меньшем типоразмере пластин и равенстве других условий (включая высоту слоя испытываемого бетона) показатель прочности ниже, чем при испытании с помощью пластин большего типоразмера.

Одновременно данные табл. 5.7 подтверждают закономерное снижение показателя прочности бетона, определенной при прочих равных условиях, с ростом высоты испытываемых образцов-изделий (или высоты слоя испытываемого (сжимаемого) бетона).

Таблица 5.7

## Влияние размеров образцов в плане на прочность бетона

№ серии и образцов-изделий	Вид образцов (конфигурация)	Размер образцов в плане х в, см/см <sup>2</sup>	Высота образцов с, м	Размер пластин / площадь, см/см <sup>2</sup>	Разрушающая нагрузка, кН	Прочность бетона, МПа	
						изделия	среднее значение
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Предприятие № 1</b>							
1	П20.10.8 МА	9,8x19,6	8	7 x 7 / 49	216	44,0	43,85
			8	7 x 7 / 49	214	43,7	
		9,8x19,7	8	10 x 10 / 100	490	49,0	47,5
			8	10 x 10 / 100	460	46,0	
	П20.10.6 МЦкр А	9,8x19,8	6,1	7 x 7 / 49	195,5	39,9	39,9
			6,1	10 x 10 / 100	425	42,5	42,5
	П16.11.8 МА	11,7x15,7	8,1	7 x 7 / 49	197,5	40,3	40,3
			8,1	10 x 10 / 100	419	41,9	41,9
2	К20.8 без 1/4	19,7x19,7	7,5	7 x 7 / 49	192,5	39,3	39,3
		19,8x19,7	7,5	10 x 10 / 100	437	43,7	45,1
		21,5x23,4	8,2	10 x 10 / 100	475	47,5	
	К15.8 МА	15,6x15,6	8,1	7 x 7 / 49	187,5	38,3	38,3
		15,6x15,6		10 x 10 / 100	505	50,5	50,5
	К10.10.8 МА	9,8x9,9	8,1	7 x 7 / 49	156	31,8	35,5
		9,8x9,8	8,1	7 x 7 / 49	192,5	39,3	
			8,1	10 x 10 / 100	425	42,5	42,9
			8,1	10 x 10 / 100	433	43,3	
3	Ф24.22.8	21,6x23,4	8,2	7 x 7 / 49	205	41,9	41,9
			8,2	10 x 10 / 100	440	44,0	44,0
<b>Предприятие № 2</b>							
4	П20.10.6 МА	19,8x9,8	6,0	7 x 7 / 49	209	42,6	42,6
				10 x 10 / 100	457	45,7	45,7
5	Ф20.16.8 МА	19,9x16,4/ 11,4	7,9	10 x 10 / 100	475	47,5	47,5
		19,9x16,4/ 11,4	7,9	7 x 7 / 49	197	40,0	40,0

Продолжение табл. 5.7

1	2	3	4	5	6	7	8
6	К20.8 МА	19,9x19,8	8,0	15 x 15 / 225	1060	47,1	47,1
		19,8x19,8	8,0	10 x 10 / 100	425	42,5	42,5
7	Треуг. с прямоуг. основ.	23,8/9,9x28,1	8,1	10 x 10 / 100	392	39,2	39,2
		23,7/10,0x28,1	8,1	15 x 15 / 225	1070	47,6	47,6
		23,7/9,9x28,1	8,1	7 x 7 / 49	181	36,9	36,9
8	БРТ100.2 0.8	19,9x12,0	8,0	7 x 7 / 49	212	43,4	43,4
		19,9x11,9	8,0	10 x 10 / 100	481	48,1	48,1
		19,9x12,2	8,0	15 x 15 / 225	588	58,8	58,8
<b>Предприятие № 3</b>							
9	Бр 100.30.15	50,0x30,0	15,0	15x15/225	855	38,0	36,4
		50,0x30,0	15,0	15x15/225	812	36,1	
		50,0x30,0	15,0	15x15/225	800	35,6	
		50,0x30,0	15,0	10x10/100	330	33,0	32,0
		50,0x30,0	15,0	10x10/100	330	33,0	
		50,0x30,0	15,0	10x10/100	300	30,0	
<b>Предприятие № 4</b>							
10	П20.10.6	19,8x9,8	5,8	7 x 7 / 49	139	28,4	25,8
		19,8x9,8	5,8	7 x 7 / 49	127	25,9	

Окончание табл. 5.7

1	2	3	4	5	6	7	8
		19,8x9,8	5,8	7 x 7 / 49	132	29,0	
		19,8x9,8	5,8	7 x 7 / 49	113	23,1	
		19,8x9,8	5,8	7 x 7 / 49	152	31,0	
		19,8x9,8	5,8	7 x 7 / 49	134	27,3	
		19,8x9,8	5,8	7 x 7 / 49	135	27,6	
		19,8x9,8	5,8	7 x 7 / 49	120	24,5	
11	Ф20.16.8	19,9x16,4/11,4	8,0	7 x 7 / 49	119	24,3	25,1
		19,9x16,4/11,4	8,0	7 x 7 / 49	127	25,9	
		19,9x16,4/11,4	8,0	10x10/100	290	29,0	28,2
		19,9x16,4/11,4	8,0	10x10/100	274	27,4	
<b>Предприятие № 5 (пластичные смеси*)</b>							
12	Ф22.14.6	22,5x13,6	6,0	7 x 7 / 49	225	45,9	42,8
		22,5x13,6	6,0	7 x 7 / 49	190	38,8	
		22,5x13,6	6,0	7 x 7 / 49	225	45,9	
		22,5x13,6	6,0	7 x 7 / 49	200	40,8	
13	К40.5	40,0x40,0	5,0	7 x 7 / 49	260	53,1	56,0
		40,0x40,0	5,0	7 x 7 / 49	300	61,2	
		40,0x40,0	5,0	7 x 7 / 49	260	53,1	
		40,0x40,0	5,0	10x10/100	750	75,0	71,0
		40,0x40,0	5,0	10x10/100	675	67,5	

\* Приведены для сравнения.

Оценка средних значений прочности бетона всех изделий, характеризующихся высотой слоя бетона (изделий), равной 15; 8 и 6 см, и испытанных в соответствии с СТБ 1152–99 соответственно с помощью пластин типоразмерами 15 x 15 см (225 см<sup>2</sup>); 10 x 10 см (100 см<sup>2</sup>) и 7 x 7 см (49 см<sup>2</sup>), показывает следующее.

Например, для бетона возраста не менее проектного (кроме «предприятий № 3, и 4 и 5) образцов-плит толщиной около 8 см ( $h = 7,5\text{--}8,2$  см) при размере плиты 10 x 10 см (100 см<sup>2</sup>) прочность составила: 44,6 МПа, а при толщине 6 см и размере плиты 7 x 7 см (49 см<sup>2</sup>) – 41,3 МПа, т. е. один порядок цифр и принадлежность к одному классу по прочности, несмотря на сохранение в целом ранее отмеченной тенденции занижения показателя прочности при использовании пластин меньшего типоразмера.

Для образцов (фрагментов) бортового камня (предприятие № 2) при высоте слоя испытываемого бетона в 15 см прочность составила 47,6 МПа и при высоте 8 см (испытание с помощью пластин 10 x 10 (100 см<sup>2</sup>)) прочность соответствовала 48,1 МПа, т. е. также данные одного порядка.

Для образцов-изделий (плит тротуарных и бортового камня) через 24 ч после пропаривания (предприятие № 3 и 4) прочность составила для плит при высоте слоя бетона около 6 см ( $h = 5,8$  см) и испытательной плиты 7 x 7 см (49 см<sup>2</sup>) величину: 25,8 МПа; в случае  $h = 8$  см (плита 10 x 10 см (100 см<sup>2</sup>)) прочность равна 28,2 МПа. Для бортового камня при  $h = 15$  см и испытательной пластине 15 x 15 см (225 см<sup>2</sup>) прочность равнялась 36,4 МПа. Т. е. для плит в среднем  $(25,8 + 28,2)/2 \sim 27,0$  МПа, или:  $27/29 \times 100 \sim 90$  %, что соответствует отпускной прочности при классе С18/22,5.

Для бортового камня соотношение с прочностью требуемого класса С25/30 составило:  $36,4/39 \times 100 \sim 93$  %, что удовлетворяет требованиям к отпускной прочности бетона.

Данные, относящиеся к позициям № 12 и 13 табл. 5.7, взяты для сравнения. Они показывают, что прочностные характеристики бетона, полученного из пластичной смеси (с низким начальным водоцементным отношением бетона за счет применения высокоэффективных пластифицирующих добавок; прим. авторов), превышают характеристики вибропрессованного бетона. Это имеет место потому, что при практикуемых режимах вибропрессования (харак-

теризующихся зачастую недостаточным временем вибрирования и интенсивностью) чрезвычайно сложно получить однородную, качественную (слитную) по всему объему (сечению) изделий структуру цементного камня и бетона в целом. Зато этот способ существенно выигрывает в производительности, что и обеспечивает ему широкое применение.

Кроме отмеченного позиции № 12 и 13 подтверждают общую тенденцию повышения показателя прочности бетона на сжатие при снижении высоты слоя испытываемого бетона, а также с увеличением площади (периметра) испытательных пластин при прочих равных условиях.

Таким образом, основной вывод по данным табл. 5.7 может быть сформулирован следующим образом: при прочих равных условиях показатель прочности бетона практически не зависит от конфигурации или типоразмера изделия в плане, а связан в основном с толщиной испытываемого слоя бетона (высотой изделия) и типоразмером испытательных пластин. Кроме этого, может быть существенным влияние места расположения испытательных пластин: у края или по центру изделия. В последнем случае, при размере пластин меньшем размера изделий в плане, на «сжатие-срез» работает весь периметр пластин и показатель прочности будет выше.

### **5.5. Испытания бетона в изделиях на сжатие**

Прямые испытания изделий в виде тротуарных плит различных типоразмеров (в основном – правильной геометрической формы в виде прямоугольного параллелепипеда) и фрагментов бортового камня выполнили в возрасте бетона не менее проектного (от 28 сут) и непосредственно после испытаний образцов-аналогов по данным предыдущего раздела, приведенным в табл. 5.7.

В табл. 5.8 приведены данные, полученные в результате прямого определения прочности бетона на сжатие образцов-изделий, из которых следует, что показатель прочности бетона образцов-плит и плитообразных образцов бортового камня (испытаны «плашмя» при  $h = 8$  см) прямо зависит (при прочих равных условиях) от площади поперечного сечения и возрастает при снижении высоты слоя испытываемого бетона.

Разброс значений прочности бетона по образцам-плитам, изготовленным из бетона сопоставимых составов и номинальной прочности, для изделий предприятия № 1 достиг

$$(64,6 - 35,7)/35,7 \cdot 100 \sim 80 \%,$$

и для таких же изделий предприятия № 2, примерно:

$$(64,4 - 41,3)/41,3 \cdot 100 \sim 55 \%.$$

Показатель прочности бетона бортового камня, определенной сжатием фрагментов размерами 19,9 x 12 см в плане при высоте 8 см, составил 71,2 МПа, что на:  $(71,2 - 39) : 39 \times 100 \sim 83 \%$ , превышает номинальную контролируемую прочность класса С25/30.

Таким образом, очевидно, что прямое определение прочности бетона путем испытания образцов-изделий (даже правильной геометрической формы, соответствующей прямоугольному параллелепипеду) практически невозможно, т.к. не обеспечивает достоверной оценки фактической прочности бетона в изделии.

Таблица 5.8

Результаты испытаний изделий на прочность бетона  
(среднее значение по 2-м образцам)

№ серии и образцов	Вид образцов (конфигурация)	Размеры образцов $a \times b \times h$ , см	Площадь поперечного сечения, см <sup>2</sup>	Разрушающая нагрузка, кН	Прочность бетона, МПа
1	2	3	4	5	6
Предприятие № 1					
1	П20.10.8 МА	9,8*19,6*7,9	192	950	49,5
2	К10.10.8 МА	9,8*10,0*8,1	98	350	35,7
3	П16.11.8 МА	11,7*15,7*8,2	184	800	43,5
4	К15.8 МА	15,6*15,6*8,1	243	1250	51,4
5	К20.8 без 1/4	19,7*19,8*7,5	390	2350	60,2

Окончание табл. 5.8

1	2	3	4	5	6
6	Ф24.22.8	21,5*23,4*8,2	503	3250	64,6
7	П20.10.6 МЦкр А	9,8*19,8*6,1	194	1250	64,4
Предприятие № 2					
8	Ф20.16.8 МА	19,9*16,4/7,9	326	1550	47,5
9	П20.10.6 МА	19,8*9,8*6,0	194	1250	64,4
10	Треуг. с прямоуг. основ.	23,8/9,9* 28,1*8,1	476	3050	64,1
11	К20.8 МА	19,8*19,8*8,0	392	1620	41,3
12	БРТ100.2 0.8	19,9*12,0*8,0	239	1700	71,1

В этой связи подход определения прочности бетона на сжатие в изделия посредством использования испытательных пластин, через которые нагрузка передается на определенный участок бетона конструкции по некоторой установленной площади, является оправданным с позиций получения более достоверной информации о прочностных характеристиках бетона.

Следует отметить логичность градации типоразмеров испытательных пластин в привязке к стандартным типоразмерам образцов-кубов по ГОСТ 10180 для определения прочности бетона на сжатие по контрольным образцам, что делает «привычными» для пользователя проведение испытаний.

Вместе с этими положительными факторами следует отметить, что точность определения прочности бетона на сжатие посредством пластин в изделиях непосредственно зависит от соотношения: размер пластины - высота испытываемого изделия (слоя бетона), от размера пластин при постоянстве высоты сжимаемого слоя бетона и от постоянства места приложения нагрузки, т. е. расположения пластин на изделии, размеры которого в плане больше размеров пластин.

Наибольшая точность и соответствие стандартному определению прочности на сжатие по образцам-кубам достигаются при равенстве размера стороны пластины и высоты слоя бетона (изделия). Во всех остальных случаях имеют место отклонения в определении прочности, с завышением ее величины при снижении высоты сжа-



того слоя бетона (изделия) относительно размера пластины и наоборот. Именно в этой связи, например, чешский стандарт-аналог (ČSN 736131-1) содержит требование «увеличения-снижения» размеров испытательных пластин (в плане) «в привязке» к изменению высоты слоя испытываемого бетона (изделия) на каждые 10 мм.

Необходимо подчеркнуть, что влияние масштабного фактора при определении прочностных характеристик бетона по образцам или изделиям полностью исчезает в случае, если прочность бетона определяется на одноосное растяжение путем раскалывания образцов по методике, основные положения которой приведены ранее (см. п. 5.4).

### **5.6. Обобщение результатов испытаний**

Основываясь на результатах исследований можно сформулировать следующие общие выводы.

Прямые испытания вибропрессованных изделий или их фрагментов, включая такие, которые характеризуются правильной геометрической формой (прямоугольные параллелепипеды различных типоразмеров), дают искаженные результаты по прочности бетона на сжатие. В этой связи обоснован подход СТБ 1152–99 с определением прочности бетона на сжатие с помощью специальных испытательных пластин.

Установлено, что показатель прочности бетона при испытаниях на сжатие с помощью пластин непосредственно зависит от их типоразмера и, при прочих равных условиях, величина показателя определяемой прочности будет возрастать с увеличением размера пластин.

Выявлено, что для одного и того же типоразмера пластин показатель прочности бетона на сжатие непосредственно зависит от высоты сжимаемого слоя бетона (изделия), снижаясь с ее ростом и наоборот, возрастая с уменьшением высоты слоя бетона (изделия). Установить четкое корреляционное отражение этой закономерности в рамках данной работы не представляется возможным - необходимы соответствующие исследования.

Определено, что величина прочности, оцениваемой путем сжатия с помощью пластин некоторых объемов бетона образцов-изделий, мало зависит от конфигурации последних в плане. Эта зависимость проявляется в связи с расположением пластин на по-

верхности изделий и показатель прочности может различаться, если пластины располагают, например, в углах образца-изделия (фрагмента) или по его центру. В последнем случае показатель прочности возрастает, т.к. играет роль «работа» кромки пластины: по ее периметру бетон сминается, фактически сопротивляясь в этих объемах срезу, дополняя сопротивление сжатию.

Определяющим фактором зависимости показателя прочности бетона на сжатие от конфигурации и типоразмера образцов-изделий является их высота или высота сжимаемого слоя бетона.

В этой связи, чтобы полностью исключить влияние конфигурации изделий в плане на показатель прочности бетона, определяемой с помощью пластин, следует однозначно устанавливать место их расположения (всегда одно и то же) при определении поправочного коэффициента по СТБ 1152–99.

Обобщение экспериментальных данных табл. 5.5, 5.7 и 5.8 показывает, что точность определения прочности бетона на сжатие в изделиях с помощью испытательных пластин наиболее высока при совпадении типоразмера пластин и высоты слоя испытываемого бетона (изделия), т. е. для высоты 7; 10 и 15 см. При отклонениях от этих типоразмеров по высоте слоя бетона проявляется эффект «снижения-роста» показателя прочности, связанный как с изменением высоты сжимаемого слоя бетона (изделия), так и с влиянием типоразмера используемых при этом пластин, о чем изложено ранее в данном разделе.

Выходом из этого положения (если не изменять СТБ 1152–99 и не вводить дополнительные типоразмеры испытательных пластин) является скрупулезное определение переходного коэффициента по диапазону выпускаемых предприятием изделий, отличающихся классом бетона, а также высотой (толщиной) изделий и их конфигурацией в «привязке» к типоразмеру испытательных пластин. При этом необходимо соблюдать условия постоянства их месторасположения на испытуемых изделиях, как при установлении коэффициента перехода, так и в процессе дальнейших испытаний.

## **6. МЕТОДИКИ ПОДБОРА СОСТАВА ВИБРОПРЕССОВАННОГО БЕТОНА И УСКОРЕННОЙ ОЦЕНКИ МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНА**

Цель подбора состава бетона заключается в расчете такого соотношения компонентов (вяжущего, заполнителей и воды), которое обеспечит условия качественного формирования изделий и требуемые физико-технические характеристики (свойства) бетона при минимально необходимом расходе вяжущего.

Этой цели в наибольшей мере соответствует метод расчета состава тяжелого бетона с учетом его структурных и технологических особенностей, разработанный проф. Ахвердовым И.Н. [49, 59] и составивший базис предлагаемой методики расчета состава вибропрессованного бетона.

Основное правило предлагаемой методики заключается в обеспечиваемом ей и лежащем в ее основе критерии минимальной пустотности смеси твердофазных компонентов: мелкого и крупного (при наличии) заполнителей и цемента на 1 м<sup>3</sup> бетона.

Рассчитав состав бетона по предлагаемой методике и установив его характеристики по формуемости бетонной смеси, средней плотности свежееотформованного бетона (следует определять на мерном цилиндре, а не в формах для изготовления образцов бетона), а также по прочности (на сжатие), водопоглощению и морозостойкости (т.е. по характеристикам, нормируемым действующими стандартами) на специально изготовленных образцах и, подтвердив соответствие полученных данных требуемым по нормативной (или проектной) документации на изделия, приступают к их изготовлению.

Рекомендуется осуществить тщательную контрольную проверку первой (сменной) партии изготавливаемых изделий на соответствие по критерию величины средней плотности свежееотформованного в производственных условиях бетона. Ее величина должна соответствовать или превышать среднюю плотность контрольных образцов свежееотформованного бетона, которые были изготовлены, испытаны и обеспечили требования действующих стандартов по прочности, водопоглощению и морозостойкости.

На основании соответствия плотностей свежееотформованного бетона принимают решение о начале производства при системном непрерывном контроле данного показателя и осуществлении теку-

шего и периодического контроля прочности и других нормируемых свойств (характеристик) бетона.

### 6.1. Методика подбора состава мелкозернистого бетона

1. Принимают начальный расход песка, соответствующим  $1 \text{ м}^3$  используемого песка в виброуплотненном состоянии, т. е.  $\Pi_{нач}$ , кг, соответствует значению  $\rho_n^6$ , установленному с помощью мерного цилиндра при виброуплотнении на стандартной лабораторной площадке до прекращения оседания песка.

2. Определяют пустотность  $1 \text{ м}^3$  песка по зависимости

$$\Pi_n^6 = 1 - \frac{\rho_n^6}{\rho_n^3}, \text{ доли ед.}, \quad (6.1)$$

где  $\rho_n^3$  – плотность зерен песка,  $\text{кг/м}^3$ ; для песка природного (речного) кварцевого (кварцево-полевошпатного) в расчетах допускается принимать:  $\rho_n^3 \sim 2650 \text{ кг/м}^3$ .

3. Определяют минимально необходимый объем цементного теста в уплотненном состоянии, соответствующий объему пустот песка:

$$V_{ц.т.} \sim \Pi_n^6, \text{ м}^3. \quad (6.2)$$

4. Корректируют расход песка с учетом увеличения объема выхода бетонной смеси за счет раздвижки его зерен по формуле:

$$\Pi = \Pi_{нач} / K_p, \text{ кг}, \quad (6.3)$$

где  $K_p = 1,05; 1,1; 1,15$  для смесей жесткостью до 15 с; 16–30 с и более 30 с, соответственно.

5. Определяют водопотребность песка (удельную и фактическую) адсорбционную (учитывается при формировании) и общую (для расчета прочности) с учетом данных таблицы по формулам:

$$B_{ад.уд.} = 0,1 \sum_{i=1}^n P_{ni} \cdot B_{ад.и}, \text{ л (кг)/т}, \quad (6.4)$$

$$B_{ад.общ.уд.} = 0,1 \sum_{i=1}^n P_{ni} \cdot B_{общ.и}, \text{ л(кг)/т}, \quad (6.5)$$

$$B_{n.ad.} = 0,001П B_{ад.i.уд.}, \text{ л(кг)}, \quad (6.6)$$

$$B_{n.общ.} = 0,001П \cdot B_{общ.i.уд.}, \text{ л(кг)}. \quad (6.7)$$

Таблица 6.1

Физические свойства заполнителей (по данным проф. Ахвердова, И.Н. [49; 59])

Размер фракции мм	Водопоглощение, %	
	Адсорбционное $B_{ад.i}$	Общее $B_{общ.i}$
<b>Гранитный щебень</b>		
5–10	0,81	1,21
10–20	0,50	0,92
<b>Песок природный/речной</b>		
До 0,16	10,4/11,7	10,4/12,0
0,16–0,31	5,04/5,65	5,04/6,0
0,35–0,63	2,65/2,86	2,65/3,46
0,63–1,25	1,32/1,48	1,32/2,3
1,25–2,5	0,76/0,81	1,79/2,07
2,5–5,0	0,374/0,374	1,914/1,914

6. Определяют водоцементное отношение, необходимое по критерию обеспечения требуемой прочности бетона на сжатие, по формуле

$$(B / Ц)_{fc} = \frac{\alpha \cdot K_3 \cdot R_u}{f_{cm.cub(28)}} + \beta, \text{ доли ед.}, \quad (6.8)$$

где  $K_3$  – коэффициент, учитывающий качество заполнителей и принимаемый в расчете равным, соответственно, для песка, характеризующегося величиной  $M_k \sim 2,0 - 3,25$ , природного:  $K_3 \sim 0,9 - 1,1$ ; для речного -  $K_3 \sim 0,8 - 1,0$ , при определении промежуточных значений интерполяцией;

$R_u$  – активность цемента (при отсутствии данных – значение марки, включая перевод от класса к марке, если данная характеристика задана классом цемента), МПа;

$f_{cm.cube(28)}$  - требуемая прочность бетона заданного класса в проектном возрасте, МПа;

$\alpha$  и  $\beta$  - поправочные коэффициенты, учитывающие интенсивность уплотнения и ряд других факторов и равные:  $\alpha = 0,248$  и  $\beta = 0,092$ , для вибрированного бетона без добавок ускоряющих (замедляющих) твердение и без дополнительной обработки, вызывающей активацию цемента, доли ед.

7) Определяют расход цемента с учетом требуемого для формирования объема цементного теста по формуле

$$Ц = \frac{1000 \cdot V_{u.m.}}{K_B \left( \frac{1000}{\rho_u} + \left( \frac{B}{Ц} \right)_{fc} \right)}, \text{ кг}, \quad (6.9)$$

где  $K_B$  - коэффициент воздухововлечения (доли ед.), принимаемый в расчете равным:  $K_B = 1,03$ , или устанавливаемый по фактической величине (по СТБ 1545-2005);

$\rho_u$  - плотность цемента, кг/м<sup>3</sup>.

8) Определяют величину водоцементного отношения, оптимальную по критерию уплотнения бетона при вибропрессовании жесткой бетонной смеси, по формуле

$$(B / Ц)_ф = K_{н2} + \frac{B_{n.ad}}{Ц}, \text{ доли ед.} \quad (6.10)$$

9) Сопоставляют величины  $(B/Ц)_{fc}$  и  $(B/Ц)_ф$ . Должно выполняться условие:  $(B/Ц)_{fc} \geq (B/Ц)_ф$ ; допускается, что  $(B/Ц)_{fc} < (B/Ц)_ф$  не более, чем на 5 % и при последующей проверке прочности бетона ее уровень обеспечивает требуемое в проектном возрасте значение. Не выполнение данного условия свидетельствует, что для обеспечения требуемой прочности необходимо использовать цемент или заполнители более высокого качества, либо увеличивать расчетный расход цемента для обеспечения данного условия.

10) Определяют расход воды на 1 м<sup>3</sup> бетона по формуле

$$B = Ц_p \cdot (B / Ц)_{fc}, \text{ кг(л)}. \quad (6.11)$$

11) Определяют расчетную среднюю плотность бетона по формуле

$$\rho_{\bar{o},расч.} = П + Ц + В, \text{ кг/м}^3. \quad (6.12)$$

12) Определяют фактическую среднюю плотность свежееотформованного бетона  $\rho_{\bar{o},факт}$  (кг/м<sup>3</sup>) и устанавливают величину переходного коэффициента по формуле

$$K_{\phi} = \frac{\rho_{\bar{o},факт}}{\rho_{\bar{o},расч}}, \text{ доли ед.} \quad (6.13)$$

13) Определяют фактические расходы материалов для бетона по формулам

$$Ц_{\phi} = K_{\phi} \cdot Ц, \text{ кг;} \quad (6.14)$$

$$П_{\phi} = K_{\phi} \cdot П, \text{ кг;} \quad (6.15)$$

$$В_{\phi} = K_{\phi} \cdot В, \text{ кг.} \quad (6.16)$$

14) Определяют рабочие расходы материалов (при  $Ц_p = Ц_{\phi}$ ) на 1 м<sup>3</sup> с учетом влажности песка ( $W_n$ , %) по формулам

$$П_p = П_{\phi} + \frac{П_{\phi} \cdot W_n}{100}, \text{ кг,} \quad (6.17)$$

$$В_p = В_{\phi} - \frac{П_{\phi} \cdot W_n}{100}, \text{ кг.} \quad (6.18)$$

15) Определяют коэффициент выхода бетона по формуле

$$\beta = \frac{1}{\frac{Ц_p}{\rho_{ц}^0} + \frac{П_p}{\rho_{п.вл.}^0}}, \text{ доли ед.} \quad (6.19)$$

где  $\rho_{ц}^0$  - средняя плотность цемента в рыхлонасыпном состоянии, принимаемая в расчетах равной  $1300 \text{ кг/м}^3$ ;

$\rho_{п.вл.}^0$  - средняя плотность влажного песка в рыхлонасыпном состоянии,  $\text{кг/м}^3$ .

16) Определяют расходы материалов на требуемый по объему ( $V_3, \text{ м}^3$ ) замес бетоносмесителя объемом  $V_{см}$  по формулам

$$V_3, \text{ кг}, \quad (6.20)$$

$$П = П_p \cdot V_3, \text{ кг}, \quad (6.21)$$

$$B = B_p \cdot V_3, \text{ кг}, \quad (6.22)$$

и максимальный объем бетона в замесе для данного смесителя:

$$V_{бет} = \beta \cdot V_{см}, \text{ м}^3. \quad (6.23)$$

## 6.2. Особенности методики подбора состава бетона со щебнем

Одной из особенностей составов вибропрессованного бетона и отличие их от составов бетона, уплотняемого вибрированием (включая и вибрирование с пригрузом), является ограниченное объемное (соответственно и весовое) содержание крупного заполнителя. Причиной, ограничивающей долю крупного заполнителя в их смеси с песком, является необходимость создания «прослоек» из цементно-песчаного компонента между зернами крупного заполнителя такой толщины, которая обеспечит относительно свободное взаимное перемещение зерен щебня в объеме формируемого бетона из жесткой смеси без их взаимного зацепления и предотвратит образование недеформируемого под давлением пуансонов (пригруза) каркаса из зерен щебня, способного ограничить перемещение пуансона и вызвать недоуплотнение бетона.

В следствие изложенного содержание крупного заполнителя в вибропрессованном бетоне, как это показано и в настоящих исследованиях (см. п. 2.2.2), обеспечивающего рост плотности, в сравнении с мелкозернистым бетоном, при формовании, не превышает



800 кг бетона для смесей, с характеристикой жесткости 15–40 с, применение которых в основном практикуется в производстве вибропрессованных изделий.

Оптимальное количество крупного заполнителя в составе бетона для конкретных условий формирования вибропрессованием следует подбирать опытным путем с учетом фактических характеристик интенсивности уплотнения (параметров и времени вибрирования и давления пригруза) по результатам оценки фактически достигаемой средней плотности свежесформованного бетона. Базовым составом (исходным) может служить состав, рассчитанный по предлагаемой методике.

Методика расчета состава вибропрессованного бетона с крупным заполнителем.

1. Принимают весовой расход щебня ( $Ш_{нач}^*$ , кг) в рекомендуемых пределах: 400–800 кг, значений (модуль крупности в смеси с песком рекомендуется в пределах  $M_k \sim 3,5-4,5$ ; см. п. 2.2.2).

2. Определяют абсолютный объем щебня по формуле

$$V_{щ.аб.} = \frac{Ш_{нач}}{\rho_{щ}^3}, \text{ м}^3, \quad (6.24)$$

где  $\rho_{щ}^3$  - средняя плотность щебня (кг/м<sup>3</sup>); для гранитного щебня в расчетах допускается принимать  $\rho_{щ}^3 = 2700$  кг/м<sup>3</sup>.

3. Определяют объем и весовой расход песка в 1 м<sup>3</sup> смеси заполнителей по формулам

$$V_{п} = 1 - V_{щ.аб.}, \text{ м}^3, \quad (6.25)$$

$$П_{нач} = V_{п} \cdot \rho_{п}^6, \text{ кг.} \quad (6.26)$$

4. Определяют пустотность 1 м<sup>3</sup> смеси (сосредоточена в объеме, занимаемом песком) заполнителей ( $П_{см}$ ) по формуле

$$П_{см} = V_{п} \cdot П_{п}^6, \text{ доли ед.} \quad (6.27)$$

---

\* Здесь и далее расшифровываются обозначения, дополнительно вводимые к обозначениям, приведенным в разделе 6.1.

5. Определяют требуемый минимальный объем цементного теста ( $V_{ц.т.}$ ,  $M^3$ ) по формуле

$$V_{ц.т.} = K_v \cdot \Pi_{см}, \text{ м}^3, \quad (6.28)$$

где  $K_v$  - поправочный коэффициент, учитывающий влияние крупного заполнителя на формуемость и принимаемый для расчетов равным  $K_v = 1,15-1,25$  при расходе щебня 400-800 кг и более (промежуточные значения определяют интерполяцией).

6. Определяют водопотребность (удельную\* и фактическую) песка по формулам (6) – (8) и водопотребность (удельную\* и фактическую) щебня по формулам

$$B_{ц.ад.уд.} = 0,1 \sum_{i=1}^n P_{ци} \cdot B_{adi}, \text{ л(кг)/т}; \quad (6.29)$$

$$B_{ц.общ.уд.} = 0,1 \sum_{i=1}^n P_{ци} \cdot B_{общ.и}, \text{ л(кг)/т}; \quad (6.30)$$

$$B_{ц.ад.} = 0,001 \Pi_{ц} \cdot B_{ц.ад.уд.}, \text{ л(кг)}; \quad (6.31)$$

$$B_{ц.общ.} = 0,001 \Pi_{ц} \cdot B_{ц.общ.уд.}, \text{ л(кг)}. \quad (6.32)$$

7. Определяют водоцементное отношение бетона по критерию обеспечения требуемой прочности на сжатие по формуле (6.8), вводя в числитель поправочный коэффициент  $K_{щ} = 1,13$ .

8. Определяют величину водоцементного отношения по критерию формуемости бетонной смеси по формуле

$$(B / Ц)_ф = K_{не} + \frac{B_{н.ад.} + B_{ц.ад.}}{Ц}, \text{ доли ед.}, \quad (6.41)$$

---

\* Удельные водопотребности песка и щебня определяют один раз для данного по качественным характеристикам заполнителя и в дальнейшем используют как постоянную характеристику этого материала.

с учетом допущения по п. 9 расчета состава мелкозернистого бетона.

В остальном расчет состава вибропрессованного бетона с крупным заполнителем идентичен изложенному в п. 6.1 с учетом введения в бетон дополнительного компонента в виде фракций гранитного щебня.

### 6.3. Примеры расчета составов бетона

*Характеристики материалов.*

Вязущее – портландцемент ПЦ500-Д0 ОАО «Кричевцементно-шифер», активностью 47 МПа; водопотребностью –  $K_{\text{вт}} = 0,25$ ; плотностью –  $\rho_{\text{ц}} = 3080 \text{ кг/м}^3$ .

*Мелкий заполнитель* – песок природный (сеяный) Крапужинского карьера с характеристиками по табл. 2.5 раздела 2.2, в частности: модуль крупности –  $M_{\text{к}} = 2,2$ ; средняя плотность в виброуплотненном состоянии  $\rho_{\text{н}}^{\text{с}} = 1770 \text{ кг/м}^3$ ; плотность зерен  $\rho_{\text{н}}^{\text{з}} = 2650 \text{ кг/м}^3$ ; удельная водопотребность песка (по формулам (6.4) и (6.5) соответствует: адсорбционная –  $B_{\text{н.ад.уд.}} = 30,0 \text{ л/т}$ ; общая –  $B_{\text{н.общ.уд.}} = 38,2 \text{ л/т}$ .

Крупный заполнитель – щебень гранитный РУПП «Гранит» (традиционный) фракции 5-10 мм с характеристиками по таблице 2.6 раздела 2.2, в частности, средняя плотность в рыхлонасыпном и виброуплотненном состоянии:  $\rho_{\text{щ}}^{\text{о}} = 1280 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho_{\text{щ}}^{\text{с}} = 1470 \text{ кг/м}^3$ ; плотность зерен:  $\rho_{\text{н}}^{\text{з}} = 2700 \text{ кг/м}^3$ .

*Расчет состава мелкозернистого бетона.*

1. Расход песка начальный:

$$П_{\text{нач}} = 1770 \text{ кг.}$$

2. Пустотность песка:

$$П_{\text{н}}^{\text{с}} = 1 - \frac{1770}{2650} = 0,332 \text{ м}^3.$$

3. Требуемый минимальный объем цементного теста в уплотненном состоянии:

$$V_{ц.т.} \sim 0,332 \text{ м}^3.$$

4. Корректировка расхода песка (для бетонной смеси жесткостью 15-30 с):

$$П = 1770/1,1 = 1609 \text{ кг.}$$

5. Водопотребность песка (адсорбционная и общая):

$$\begin{aligned} V_{п.ад.} &= 0,001 \cdot 1609 \cdot 30 = 48 \text{ л;} \\ V_{п.общ.} &= 0,001 \cdot 1609 \cdot 38,2 = 61,5 \text{ л.} \end{aligned}$$

6. Водоцементное отношение по критерию прочности бетона (класс С28/35;  $f_{ст.cube(28)} \sim 45 \text{ МПа}$ )

$$(B/C)_{fc} = \frac{0,248 \cdot 0,95 \cdot 47}{45} + 0,092 = 0,34.$$

7. Расход цемента:

$$C = \frac{1000 \cdot 0,332}{1,03 \left( \frac{1000}{3080} + 0,34 \right)} = 485 \text{ кг.}$$

8. Водоцементное отношение бетона по критерию формуемости:

$$(B/C)_f = 0,25 + \frac{48}{485} = 0,35.$$

9. Оценка соответствия начального водосодержания бетона по критериям прочности и формуемости удовлетворяет требуемому допущению (отклонение  $\sim 3 \%$ ).

10. Расчетный расход материалов на  $1 \text{ м}^3$  бетона:

$$\begin{aligned}Ц &= 485 \text{ кг}; \\П &= 1609 \text{ кг}; \\В &= 0,35 \cdot 485 = 170 \text{ кг (л)}.\end{aligned}$$

11. Расчетная средняя плотность бетона в уплотненном состоянии:

$$P_{\text{б.расч.}} = 485 + 1609 + 170 \sim 2265 \text{ кг/м}^3.$$

12. Дальнейший расчет осуществляют по методике п. 6.1, предварительно установив фактическую среднюю плотность свежестоформованного бетона по стандартной методике (с использованием мерного цилиндра).

*Расчет состава вибропрессованного бетона с крупным заполнителем.*

1. Начальный расход щебня (для ориентировочной жесткости 15-30 с) принимаем равным:

$$\text{Щ} = 800 \text{ кг.}$$

2. Абсолютный объем щебня:

$$V_{\text{щ.абс.}} = 800 / 2700 = 0,296 \text{ м}^3.$$

3. Объем и весовой расход песка в 1 м<sup>3</sup> смеси заполнителей:

$$\begin{aligned}V_{\text{п.}} &= 1 - 0,296 = 0,704 \text{ м}^3. \\П_{\text{нач.}} &= 0,704 \cdot 1770 = 1246 \text{ кг}.\end{aligned}$$

4. Пустотность 1 м<sup>3</sup> смеси заполнителей

$$П_{\text{см}} = 0,704 \cdot 0,332 = 0,234 \text{ м}^3.$$

5. Требуемый минимальный объем цементного теста:

$$V_{\text{ц.т.}} = 1,25 / 0,234 = 0,293 \text{ м}^3.$$

6. Корректировка расхода песка:

$$\Pi = 1246/1,25 = 997 \text{ кг.}$$

7. Водопотребность песка (адсорбционная и общая):

$$\begin{aligned} V_{п.ад.} &= 0,001 \cdot 997 \cdot 30 = 30 \text{ л;} \\ V_{п.общ.} &= 0,001 \cdot 997 \cdot 38,2 = 38 \text{ л.} \end{aligned}$$

8. Водопотребность щебня (адсорбционная и общая):

а) Удельная водопотребность традиционного щебня зернового состава по таблице 6.1:

$$\begin{aligned} V_{щ.ад.уд.} &= 0,1[(5 \cdot 5,04 + (89+6) \cdot 0,81) = 10 \text{ л/т.} \\ V_{щ.общ.уд.} &= 0,1[(5 \cdot 5,04 + (89+6) \cdot 1,21) = 12,8 \text{ л/т.} \end{aligned}$$

б) Водопотребность щебня:

$$\begin{aligned} V_{щ.ад.} &= 0,001 \cdot 800 \cdot 10 = 8 \text{ л(кг).} \\ V_{щ.общ.} &= 0,001 \cdot 800 \cdot 12,8 = 10,2 \text{ л(кг).} \end{aligned}$$

9. Водоцементное отношение по критерию прочности бетона (класс С28/35;  $f_{cm,cube(28)} \sim 45 \text{ МПа}$ ):

$$(B/C)_{fc} = \frac{0,248 \cdot 0,95 \cdot 1,13 \cdot 47}{45} + 0,092 = 0,37.$$

10. Расход цемента:

$$C = \frac{1000 \cdot 0,293}{1,03 \left( \frac{1000}{3080} + 0,37 \right)} = 409 \text{ кг.}$$

11. Водоцементное отношение по критерию формуемости:

$$(B/C)_f = 0,25 + \frac{30+8}{409} = 0,343.$$

12. Оценка соответствия:

$$(B/C)_{f_c} > (B/C)_{\phi}$$

13. Расчетный расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона:

$$\begin{aligned}Ц &= 409 \text{ кг;} \\П &= 997 \text{ кг;} \\Ш &= 800 \text{ кг;} \\В &= 0,343 \cdot 409 = 141 \text{ л.}\end{aligned}$$

14. Расчетная средняя плотность бетона в уплотненном состоянии:

$$P_{\text{б,расч.}} = 409 + 997 + 800 + 141 = 2347 \text{ кг/м}^3.$$

15. Дальнейший расчет осуществляют по методике п. 6.2 и 6.1, предварительно установив фактическую среднюю плотность свежеотформованного бетона по стандартной методике (с использованием мерного цилиндра).

## **6.4. Методика оперативного контроля (оценки) морозостойкости вибропрессованного бетона**

### **6.4.1. Область применения**

Настоящая методика распространяется на свежеизготовленные (не эксплуатировавшиеся) элементы тротуарных покрытий (элементы благоустройства) в виде плит и бортовых камней.

### **6.4.2. Нормативные ссылки**

В настоящей методике использованы ссылки на следующие нормативные документы:

СТСТБ 4.212–98	СПКП. Строительство. Бетоны. Номенклатура показателей
СТБ 1035–96	Смеси бетонные. Технические условия
СТБ 1071–2007	Плиты бетонные и железобетонные для тротуаров и дорог. Общие технические условия
СТБ 1097–2012	Камни бортовые, бетонные и железобетонные. Технические условия

СТБ 1152–99	Плиты тротуарные и камни бортовые бетонные вибропрессованные. Методы определения прочности и морозостойкости
СТБ 1182–99	Бетоны. Правила подбора состава
СТБ 1311–2002	Щебень кубовидный из плотных горных пород. Технические условия
ГОСТ 8267–93	Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия
ГОСТ 8736–93	Песок для строительных работ. Технические условия
ГОСТ 10060.0–95	Бетоны. Методы определения морозостойкости. Общие требования
ГОСТ 10060.1–95	Бетоны. Базовый метод определения морозостойкости
ГОСТ 10060.2–95	Бетоны. Ускоренные методы определения морозостойкости при многократном замораживании и оттаивании
ГОСТ 10180–90	Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам
ГОСТ 12730.1–78	Бетоны. Методы определения плотности
ГОСТ 12730.2–78	Бетоны. Метод определения влажности
ГОСТ 12730.3–78	Бетоны. Метод определения водопоглощения
ГОСТ 17624–87	Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности
ГОСТ 18105–2010	Бетоны. Правила контроля и оценки прочности
ГОСТ 21718–84	Материалы строительные. Диезлькометрический метод измерения влажности
ГОСТ 26134–84	Бетоны. Ультразвуковой метод определения морозостойкости

#### ***6.4.3. Приборы и методы контроля состояния бетона***

*Контроль (определение) влажности бетона* испытываемых элементов благоустройства осуществляют с помощью универсальных влагомеров «МГ-4»; «ВСКМ-12»; «ВИМС-1,0» или других диезлькометрических влагомеров с планарными датчиками для контроля влажности с поверхности (прилегающего к ней слоя бетона),



базирующихся на диэлькометрическом методе ее измерения (ГОСТ 21718-84).

*Контроль (определение) скорости ультразвука в бетоне* элементов благоустройства в покрытии на контролируемых участках осуществляют с помощью тестера ультразвукового «УК-1401», оснащенного датчиками «точечного» приложения с базой (межосевым расстоянием) в 150 мм и измеряющего скорость распространения продольных ультразвуковых волн в слое бетона, прилегающем к поверхности элемента благоустройства. Возможно использование иных приборов-аналогов, оттарированных в соответствии с паспортной документацией на прибор и положениями ГОСТ 17624-87.

Среднюю плотность бетона *испытываемых элементов благоустройства при необходимости определяют по ГОСТ 12730.1-78 в зависимости от конкретных условий*, как для образцов правильной или неправильной формы.

#### **6.4.4. Основные положения методики**

Методика включает этапы:

- подготовку образцов (изделий) бетона;
- определение влажности бетона;
- определение скорости ультразвука;
- оценку показателя морозостойкости бетона (рис. 6.1, а–г, рис. 6.2, а–г).

*Подготовка образцов (изделий) включает:*

- отбор изделий для контроля по СТБ 1152–99; ГОСТ 10060.0–95;
- установление вида бетона (мелкозернистый или с крупным заполнителем);
- насыщение бетона в течение 96 ч в 5%-м растворе NaCl по ГОСТ 10060.0–95.

*Определение влажности бетона* осуществляют с помощью диэлькометрических влагомеров с планарными датчиками для контроля влажности с поверхности (прилегающего к ней слоя бетона), базирующихся на диэлькометрическом методе ее измерения (ГОСТ 21718–84), как среднее значение не менее, чем 4 замеров по граням в центральной части образцов.

*Скорость ультразвука в бетоне* определяют с помощью тестеров ультразвуковых, оснащенных датчиками «точечного» приложе-

ния с базой (межосевым расстоянием) в 150 мм, по положениям ГОСТ 17624–87, как среднее значение не менее, чем 4-х замеров по граням в центральной части образцов (ГОСТ 26134–84\*).

Оценку показателя морозостойкости бетона выполняют, используя установленные величины средних значений влажности бетона ( $W_{mi}$ , %) и скорости ультразвука, полученные по результатам замеров на требуемом по СТБ 1152–99; ГОСТ 10060.0–95 количестве образцов, и данные рисунков 6.1–6.4 – для мелкозернистого бетона, и рисунков 6.5–6.8 – для бетона с крупным заполнителем. По ним определяют область установленных значений скорости ультразвука и стадию, к которой относится испытываемый бетон по состоянию его структуры. В настоящей методике стадия I характеризует бетон требуемой плотности, удовлетворяющей требованиям действующих нормативов по водопоглощению бетона. Т. е. объем капиллярной (открытой, сообщающейся) пористости определяемый по водопоглощению по массе бетона мелкозернистого менее 6 %, а для бетона с крупным заполнителем - менее 5 %. Стадия II характеризует бетон, водопоглощение по массе которого превышает указанные значения.

Для этого вначале возводят перпендикуляр от полученного значения водопоглощения бетона на горизонтальной оси  $W_{mi}$  до пересечения с нижней и верхней границей области установленных, соответственно, наименьшего и наибольшего значений (обозначенных на рисунке 6.1 (6.5) и 6.2 (6.6) сплошными графическими линиями) скорости ультразвука и определяют эти значения  $V_{yz}$ , проецируя точки пересечения на вертикальную ось.

Используя установленную область значений скорости ультразвука, ограниченную величинами наименьшей ( $V_{yz}^{min}$ ) и наибольшей ( $V_{yz}^{max}$ ) его скорости, соотносят фактическое значение скорости ультразвука с этим диапазоном и оценивают, к какой стадии по состоянию структуры относится испытываемый бетон контролируемого участка, а именно: к стадии I по рисунку 6.1 (6.5) или к стадии II по рисунку 6.2 (6.6).

Для этого сравнивают величины водопоглощения бетона и среднего значения скорости ультразвука, установленного (фактического, среднearифметического значения) для оцениваемого количества образцов ( $V_{yzi}$ , м/с), с областью ее значений в пределах:

$V_{yz}^{\min} - V_{yz}^{\max}$ , м/с, относящихся к стадиям: I или II. Затем, используя графики и данные рисунка 6.3 (6.7) или 6.4 (6.8) (в зависимости от установленной стадии, к которой относится бетон по состоянию структуры), и величину среднего фактического значения скорости ультразвука в бетоне образцов  $V_{yzi}$ , м/с, определенную по данным замеров, оценивают показатель морозостойкости бетона для испытательной среды 5%-го водного раствора NaCl при температуре минус 18° С (базовый метод) или (-50...-55) С (ускоренный метод).

В случае если среднее фактическое значение скорости ультразвука, определенное на образцах бетона, выходит за пределы диапазона «минимального – максимального» значений, то для дальнейшей оценки его морозостойкости используют величину минимального или максимального значения  $V_{yz}$ , в зависимости от «зоны» выхода фактического значения  $V_{yz}^{cp}$  из данного диапазона.

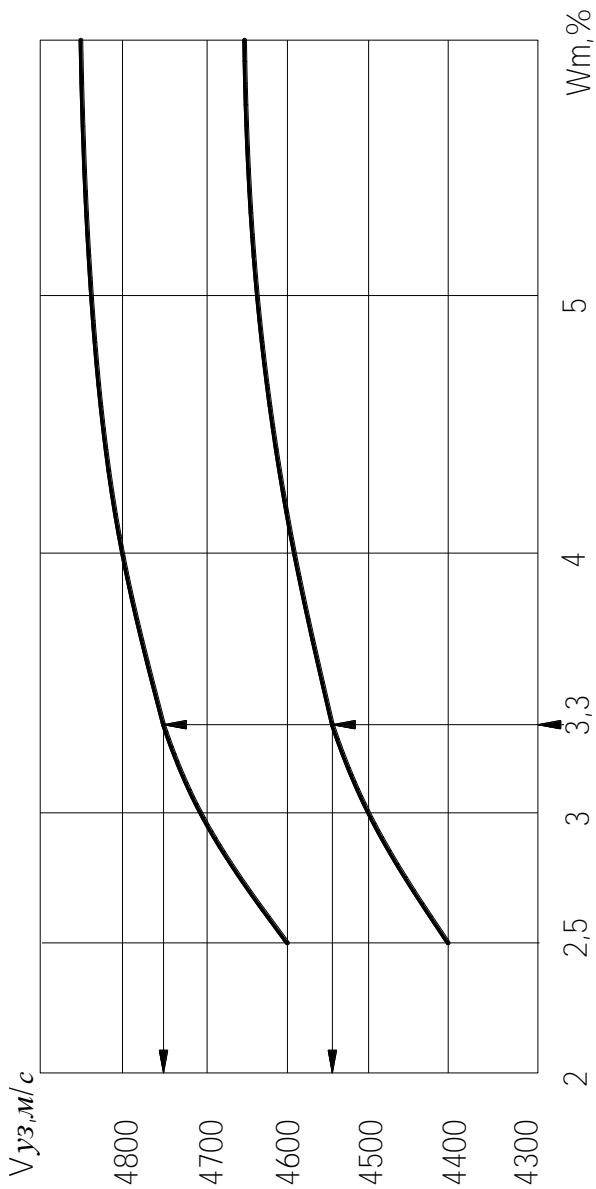


Рис. 6.1. Область установленных значений скорости ультразвука ( $V_{uz}$  м/с) мелкозернистого бетона в зависимости от влажности ( $W_m$ , %) на стадии I .

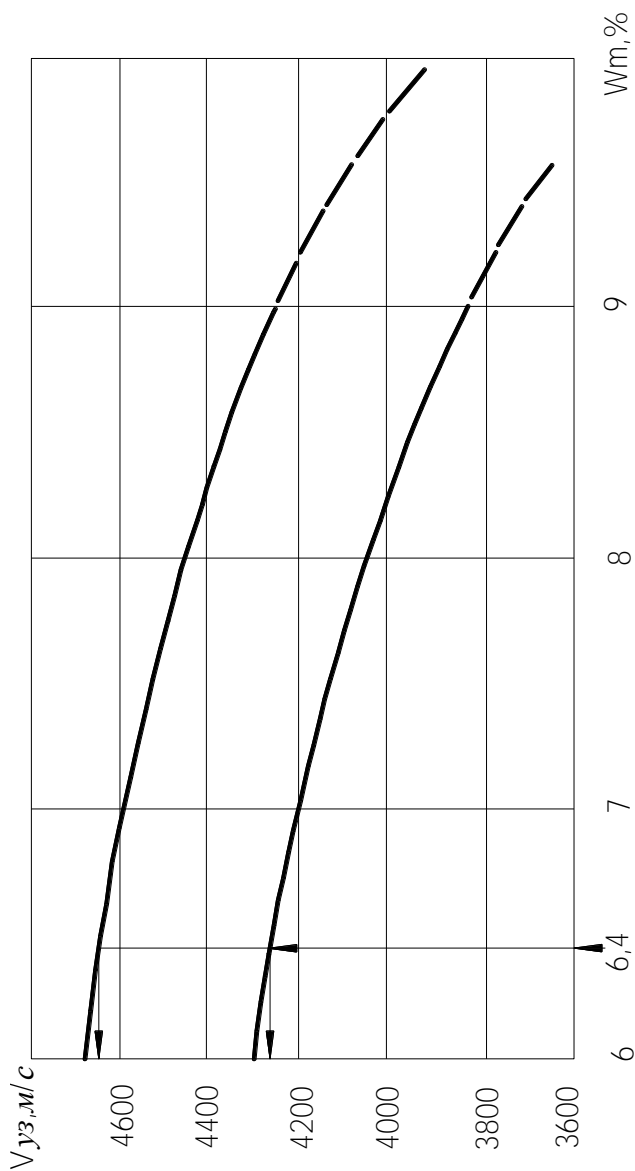


Рис. 6.2. Область установленных значений скорости ультразвука  $V_{uz}$ , м/с) мелкозернистого бетона в зависимости от влажности ( $W_m, \%$ ) на стадии II

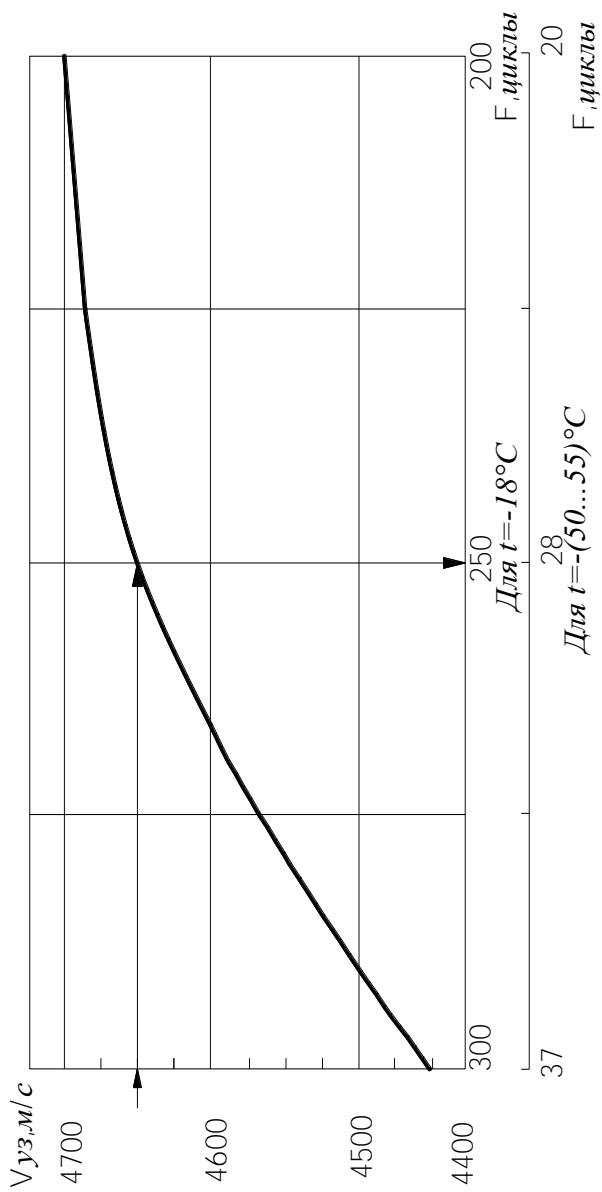


Рис. 6.3. Зависимость «скорость ультразвука - морозостойкость» (циклы) для мелкозернистого бетона на стадии I

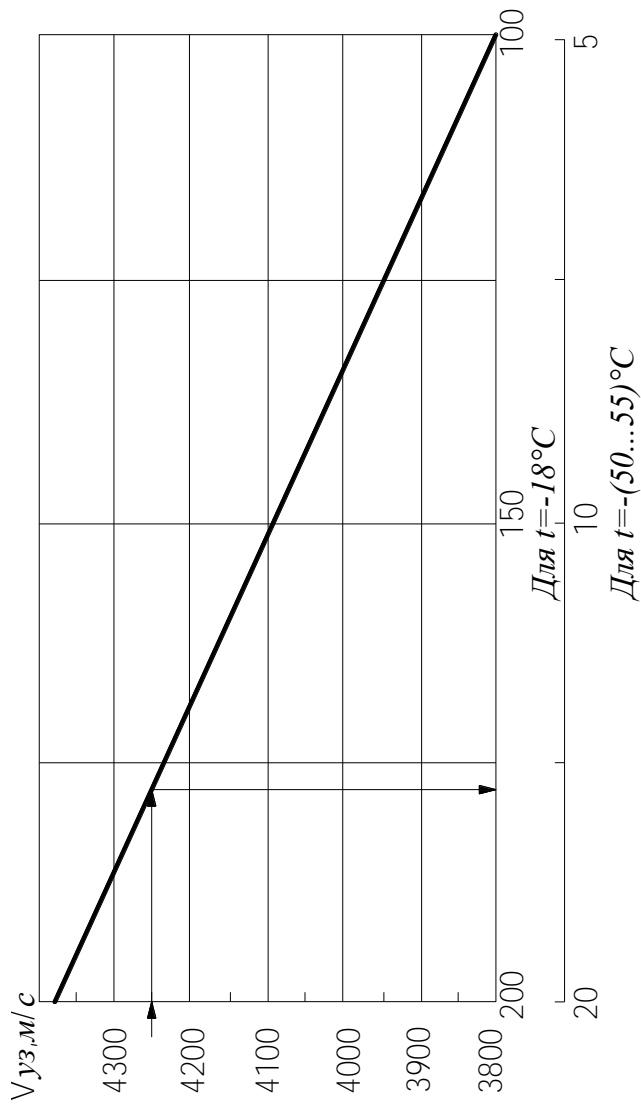


Рис. 6.4. Зависимость «скорость ультразвука – морозостойкость» (циклы) для мелкозернистого бетона на стадии II

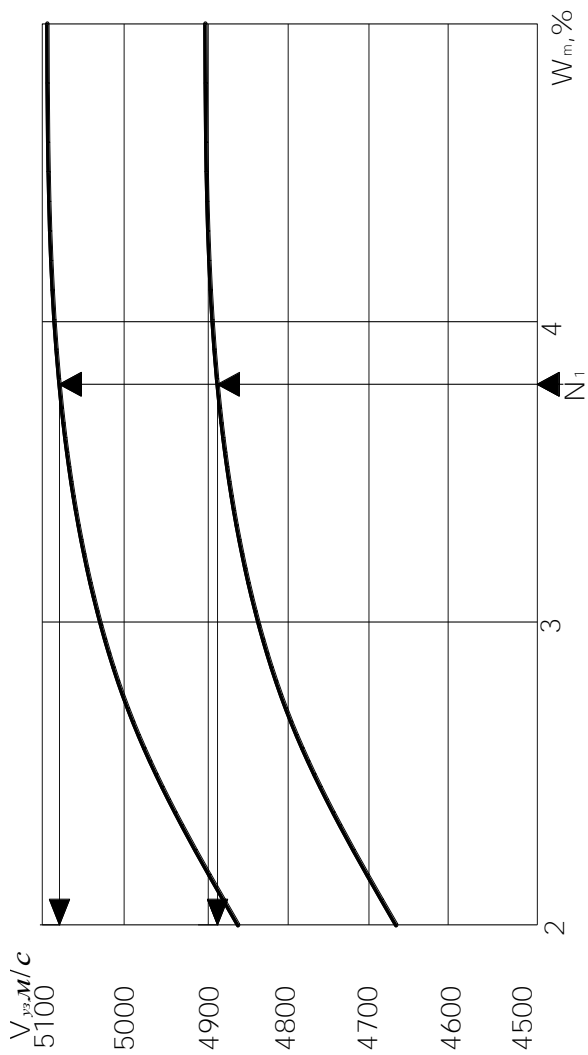


Рис. 6.5. Область установленных значений скорости ультразвука ( $V_{uz}$ , м/с) вибропрессованного бетона с крупным заполнителем в зависимости от влажности ( $W_m$ , %) на стадии I.



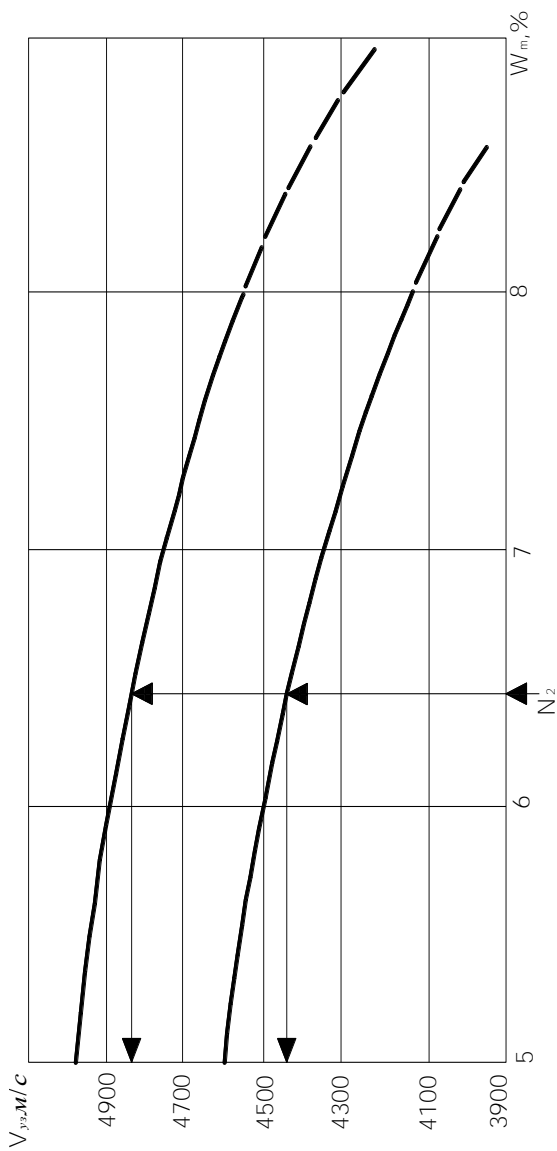


Рис. 6.6. Область установленных значений скорости ультразвука ( $V_{уз}$ , м/с) вибропрессованного бетона с крупным заполнителем в зависимости от влажности ( $W_m$ , %) на стадии П.

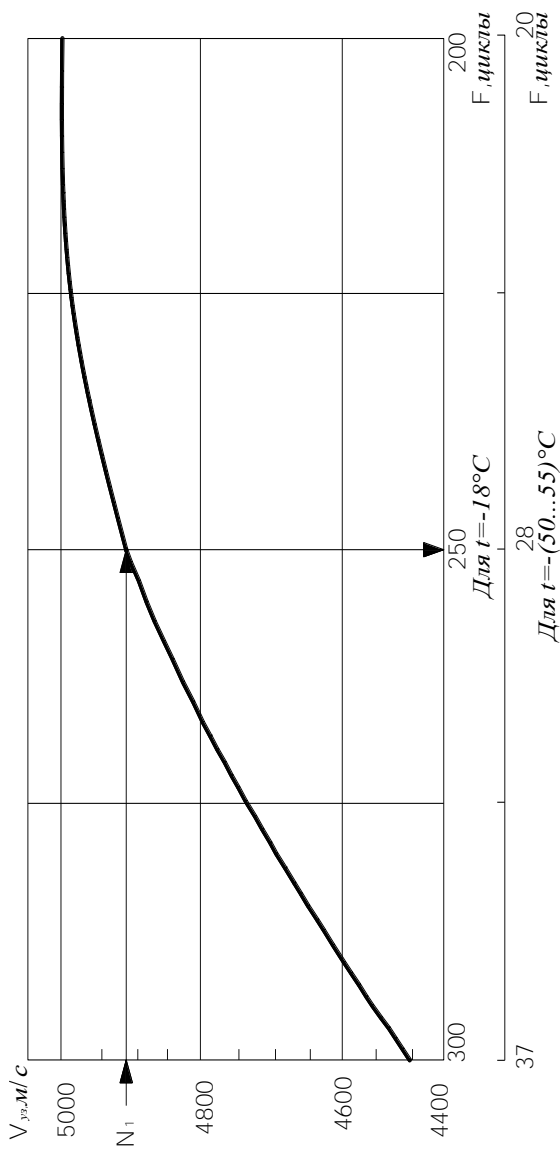


Рис. 6.7. Зависимость «скорость ультразвука – морозостойкость» (циклы) для вибропрессованного бетона с крупным заполнителем на стадии I.

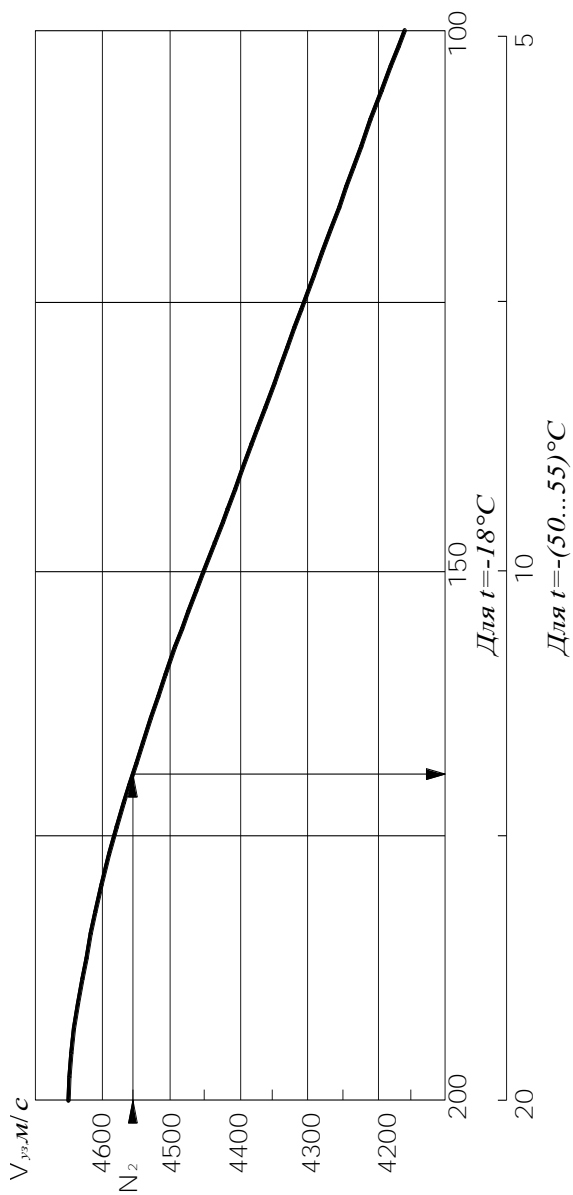


Рис. 6.8. Зависимость «скорость ультразвука — морозостойкость» (циклы) для вибропрессованного бетона с крупным заполнителем на стадии П.

На основании результата оценки морозостойкости бетона испытываемых изделий и сопоставления этих данных с предъявляемым к нему уровнем требований по морозостойкости (марке) делают заключение о соответствии.

В случае если установленный показатель морозостойкости бетона ниже требуемого, анализируют причины данной ситуации. Оценивают качество использованных материалов (характеристики вяжущего и заполнителя(ей)), рациональность состава бетона (расход материалов, водоцементное отношение, консистенцию (жесткость) бетонной смеси), степень (качество) уплотнения (интенсивность и продолжительность вибровоздействия, давление пригрузки и состояние формовочного оборудования в целом), условия и режим твердения бетона (температура, влажность среды, время твердения и др.). На основании результатов анализа выявляют причины, вызвавшие несоответствие морозостойкости бетона требуемому уровню и устраняют их, корректируя параметры технологического процесса изготовления изделий.

*При разработке*, изложенной в своих основных положениях методики ускоренной оценки морозостойкости вибропрессованного бетона исходили из экспериментально установленных данных настоящих исследований, а также работ авторов [115, 116] и из обобщения результатов испытаний, накопленных при оценке морозостойкости бетона в изделиях в НИИЛ бетонов и строительных материалов БНТУ, выполненных (и выполняемых в настоящее время) с участием авторов. Из них следует, что, обеспеченным уровнем морозостойкости вибропрессованных элементов мощения, средняя плотность бетона которых была  $\rho_b \geq 2250 \text{ кг/м}^3$  при водопоглощении  $W_m < 5\%$  для мелкозернистого бетона и  $\rho_b \geq 2350 \text{ кг/м}^3$  при  $W_m < 4,5\%$  для бетона со щебнем, целесообразно считать показатель морозостойкости, соответствующий 300-ам циклам испытаний по 2-му методу контроля. Этот вывод сделан как на основании экспериментальных данных, полученных при разработке методики для оценки «остаточной» морозостойкости и долговечности бетона эксплуатируемых дорожных (тротуарных) покрытий [115, 123-125], так и по накопленным данным натуральных испытаний вибропрессованных изделий. Было установлено, что после снижения

прочности основных образцов испытываемого бетона на  $\geq 5\%$  (ГОСТ 10060.0-95) в процессе испытаний мелкозернистый бетон образцов (изделий) с указанными ранее качественными характеристиками даже через 400 циклов характеризовался прочностью более 30 МПа, а со щебнем гранитным – более 35 МПа, при удовлетворительном качестве поверхности образцов (изделий). Поэтому в предлагаемой ускоренной методике оценки морозостойкости нами принята шкала, ограниченная 300-ми циклов испытаний в солевой среде, обеспечиваемыми качественно отформованным вибропрессованным бетоном. Выявленные в данных исследованиях закономерности «поведения» бетона при циклических испытаниях на морозостойкость были положены в основу предлагаемой методики ускоренной оценки этой его характеристики и разработанных графических зависимостей, приведенных на рис. 6.1–6.4 и рис. 6.5–6.8 для ее установления.

Предложенная методика ускоренного контроля (оценки) морозостойкости тяжелого (мелкозернистого и содержащего крупный заполнитель) бетона для бетонных элементов дорожных (тротуарных) покрытий позволяет за 5 суток определить эту его характеристику. Принятый для оценки характеристик испытываемого бетона (изделий) инструментальный неразрушающий контроль для определения влажности бетона и скорости ультразвука стандартизирован и доступен, что обеспечивает возможность ее широкого применения. В частности, для оперативной оценки морозостойкости бетона предприятиями, выпускающими тротуарные плиты, бортовой камень и другие элементы благоустройства (мощения). Этот вывод обоснован апробацией разработки с использованием изделий предприятий г. Минска (ОАО «Минскжелезобетон») и г. Борисова (ОАО «Завод СЖБ – Борисов») по согласованию с производителями, подтвердившими положительный результат произведенной оценки их продукции. Одновременно проверка морозостойкости изделий ряда предприятий (приводим без поименования) по предлагаемой методике ускоренного контроля показала недостаточный ее уровень.

И в случае положительных результатов испытаний и при выявленном недостаточном уровне морозостойкости бетона практически совпадали данные по количеству циклов замораживания–оттаивания, полученные с помощью данной методики, с результатами непосредственных стандартизированных испытаний изделий

на морозостойкость. Разница в количестве циклов составила не более 10-12 %, а при переходе от числа циклов к марке бетона по морозостойкости имелось полное соответствие при определении по стандартному методу и по предлагаемой методике. Это свидетельствует о возможности ее применения, как варианта оперативного контроля морозостойкости бетона на стадии производства изделий.

При ее использовании следует учитывать условия твердения бетона (изделий) и требуемый уровень обеспечиваемой прочности бетона. Это связано с тем, что если производственный процесс изготовления изделий предполагает применение тепловой обработки, после которой бетон достигает заданной прочности и изделия отпускаются потребителю, приведенная методика может использоваться. В случае если бетон (изделие) твердеет без тепловой обработки, то методика применима после достижения не менее 90 % прочности от проектной, а предпочтительно – в проектном ( 28 сут.) возрасте. Данное условие связано с тем, что при меньшей прочности бетона определяемое водопоглощение по массе может быть существенно завышено. Причина в том, что в последнем случае при высушивании образцов бетона (изделий) может частично испаряться вода затворения, что приведет к завышению показателя водопоглощения

## 7. ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ФОРМОВАНИЮ ЭЛЕМЕНТОВ БЛАГОУСТРОЙСТВА ВИБРОПРЕССОВАНИЕМ

### 7.1. Общие требования к материалам

*Вязущие.* Рекомендуется портландцемент марки не ниже М400 с содержанием 5–10 % активной минеральной добавки в виде, соответственно, микрокремнезема (с содержанием аморфного  $\text{SiO}_2 \geq 85\%$ ), либо доменного гранулированного шлака (с целью предотвращения развития коррозии 1-го вида и высолообразования) и с ограниченным содержанием минерала  $\text{C}_3\text{A} \leq 8\%$  с целью обеспечения морозостойкости бетона; при необходимости обеспечения морозостойкости более 300 циклов в солевой среде рекомендуемое содержание трехкальциевого алюмината в цементе не более  $\text{C}_3\text{A} \leq 5\text{--}6\%$ .

*Мелкий заполнитель.* Рекомендуется песок природный (мытый) крупнозернистый, либо смесь природного песка с крупными фракциями гранитного отсева, характеризующиеся модулем крупности  $M_k \sim 2,5\text{--}3,5$  и содержанием фракций менее 0,16 мм не более 5 %; при этом количество отмучиваемых фракций (глинистых, илистых) должно быть не более 1 %.

*Крупный заполнитель.* Рекомендуется щебень из изверженных плотных горных пород (гранит и другие) прочностью, характеризующейся маркой по дробимости не ниже 1400.

Рекомендуется к применению щебень кубовидной формы, как обеспечивающий более высокую степень уплотнения жестких бетонных смесей в сравнении с традиционным, при прочих равных условиях, и обеспечивающий возможность снижения расхода цемента до 350–450 кг на  $1 \text{ м}^3$  бетона при обеспечении требований к нему по прочности на сжатие, водопоглощению и морозостойкости.

*Красители (пигменты).* В дозировке, соответствующей 3 % и более от массы цемента, большинство из исследованных красителей вызывает снижение морозостойкости бетона или показывают начало проявления этой тенденции.

В меньшей степени этот отрицательный эффект проявляется для красителей, цвет которых соответствует цвету базового вещества, например: красный ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , окись железа) и зеленый ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , окись

хрома). Для этих красителей предельная дозировка, не сопровождающаяся снижением морозостойкости, составила 4 %.

В большей степени снижение морозостойкости проявилось для красителей, у которых базовое вещество  $Fe_2O_3$  (т. е. красного цвета), а собственно цвет красителя обеспечен введением дополнительных (органических по природе) красящих веществ, являющихся «ноу-хау» фирм-производителей.

В наибольшей степени снижает морозостойкость черный краситель – сажа, базовым веществом который является углерод и присутствуют продукты температурного разложения органических веществ. Этот эффект характерен уже при 2 % дозировке черного пигмента.

*Химические добавки.* Целевое назначение химических добавок для вибропрессованного бетона, это обеспечение условий качественного формирования (включая предотвращение налипания цементного теста на поверхность пригруза), снижение его водопоглощения, повышение морозостойкости (эксплуатационной долговечности) при условии обеспечения требуемой прочности или класса бетона.

*Улучшение условий формирования* или снижение эффекта налипания обеспечивают все (но в разной степени) добавки, включающие в состав ПАВ (поверхностно-активные вещества). Молекулы этих веществ «насыщают» слой жидкости, через который контактирует в процессе формирования бетон с формообразующими элементами (пригрузом, матрицей, поддоном). Благодаря их действию снижается адгезия (силы сцепления) цементного теста с поверхностью пригруза, что исключает или сводит к минимуму эффект налипания.

Это положительное явление сопровождается отрицательным эффектом – все добавки такого принципа действия снижают прочность, а в итоге – и морозостойкость бетона, что установлено настоящими исследованиями. Причина заключается в том, что обладая незначительными пластифицирующим эффектом эти вещества не могут обеспечить такое снижение водосодержания, которое компенсировало бы понижение прочности под их действием. В результате снижения на 15-30 % прочности бетона снижается и его способность сопротивляться разрушающим факторам попеременного замораживания-оттаивания при соответствующем снижении морозостойкости. При использовании добавок такого типа, обязательен



предварительный подбор их дозировки (минимальной), обеспечивающей эффект «антиналипания» при минимальном снижении прочности бетона.

*Снижение водопоглощения* за счет применения соответствующих химических добавок, обладающих гидрофобными свойствами, обеспечивается в виде кратковременного эффекта, действие которого прекращается после 2–5 циклов замораживания при  $t \leq (-50^\circ\text{C})$  или 20–50 первичных циклов замораживания при  $t \leq (-16^\circ\text{C})$ . После этого водопоглощение бетона возрастает до истинного, физического объема открытой пористости бетона и разрушение его идет ускоренно, т.к. прочность бетона, обеспечивающая способность сопротивляться деструктивным факторам, снижена за счет введения в его состав всех исследованных (антиадгезионных, воздухововлекающих, гидрофобизирующих) добавок. Более целесообразно повышать прочность и непроницаемость бетона за счет качественного уплотнения, которое достигается сочетанием факторов: использование рекомендуемых заполнителей и цемента; тщательный подбор состава с минимально необходимым расходом, вяжущего; рациональное (не заниженное) водосодержание бетона, обеспечивающее консистенцию (жесткость) бетонной смеси, соответствующую конкретным условиям формирования; интенсивность, время вибровоздействия и давление прессования, которые в сочетании обеспечивают объемное проявление эффекта таксотропии цементного теста в уплотняемом бетоне. Естественно, что отформованные изделия должны твердеть в условиях, исключающих испарение влаги из бетона до набора прочности не менее 70 % от ее фактического уровня в проектном возрасте.

*Повышение морозостойкости* рекомендуется обеспечивать (с учетом ранее изложенного) снижением до необходимого минимума расхода цемента за счет рационального подбора гранулометрии мелкого заполнителя (песок с  $M_k \geq 2,5$ ), широкого использования щебня гранитного (с предпочтением щебня кубовидной формы) и путем повышения плотности бетона за счет пластифицирующих добавок 1-й группы (суперпластификаторов, гиперпластификаторов).

*Одновременно* сочетание указанных приемов решает проблему «налипания» при формировании, которая непосредственно связана с избытком цементного теста в бетоне и применением песка с повы-

шенным содержанием мелких фракций (особенно глинистых-илистых, определяемых отмучиванием) и которая вынуждает необоснованно (не в соответствии с интенсивностью виброуплотнения) снижать водосодержанием бетона, что ведет к его недоуплотнению, понижению плотности, прочности и морозостойкости (см. далее).

*Повышение морозостойкости* за счет применения традиционных для технологии пластичного бетона добавок (с эффектом воз-духововлечения) не рекомендуется, так как организованное дополнительное вовлечение воздуха в объем бетона при вибропрессовании сопровождается эффектом «декомпрессии» (расширения сжатого воздуха) немедленно после формования, способного привести к разуплотнению бетона, включая появление видимых после формования или тепловой обработки трещин.

Рекомендуется ранее изложенный путь повышения плотности свежеотформованного бетона, включая при необходимости (например, при использовании песка с  $M_k < 2,5$ ) применение добавок-пластификаторов 1-й группы (супер- или гиперпластификаторов) в минимально необходимых дозировках, которые следует устанавливать для конкретных условий формования экспериментальным путем.

## **7.2. Общие требования к составу бетона и режиму его формования**

*Правила и методика* расчета состава бетона по критерию наибольшей плотности при формовании приведены в гл. 6.

*Содержание цемента* (или объем цементного теста) в бетоне должно быть минимально необходимым для обеспечения качественного формования. Увеличение расхода цемента (объема цементного камня) сверх оптимального сопровождается ростом общего объема пористости (водопоглощения), деформативности, истираемости, высолообразования, увеличивает эффекты «налипания» и «декомпрессии» при формовании.

*Содержание заполнителей* в бетоне должно быть максимально возможным по условию качественного формования и приближаться по абсолютному объему (см. п. 6) к  $0,9-0,95 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ м}^3$  свежеотформованного мелкозернистого бетона и к  $0,95 \text{ м}^3$  для бетона с крупным заполнителем.

Доля крупного заполнителя в смеси заполнителей рекомендуется в пределах до  $0,65 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ м}^3$  их смеси и устанавливается в соответствии с п. 6.

Водосодержание бетона или водоцементное отношение рекомендуется подбирать с учетом интенсивности виброуплотнения при формировании, исходя из величины водосодержания (см. п. 6), соответствующего водопотребности используемого цемента и адсорбционной способности поверхности заполнителей, т.е.

$$В/Ц \sim K_{не} + \frac{(B_{ад}^{II} \cdot П + B_{ад}^{III} \cdot ШЦ)}{Ц}, \text{ доли ед., с учетом обеспечения}$$

требуемой прочности бетона.

Интенсивность вибрирования, характеризующая сочетание частоты и амплитуды колебаний, рекомендуется не ниже:  $И \geq 900 \text{ см}^2/\text{с}^3$ , при определении по зависимости:  $И = A^2 f^3$ ,  $\text{см}^2/\text{с}^3$  (см. п. 2.1.4 раздела 2).

Рекомендуемое давление пригруза при формировании должно быть не ниже  $0,2 \text{ МПа}$ , включаться в процесс уплотнения бетона после расчетного времени вибрирования без давления и нарастать до максимально возможной величины к окончанию процесса формирования.

Время вибрирования рекомендуется назначать для конкретных условий формирования по критерию проявления эффекта тиксотропного разжижения уплотняемого бетона, что обеспечивает формирование слитной (сплошной) структуры цементного теста (цементного камня в затвердевшем бетоне) и сопровождается образованием на боковых гранях свежееотформованных (и после затвердевания) изделий рисунка ориентированных по направлению движения форм-матрицы «полос», возникающих при сдвиге разжиженного пристенного слоя цементного теста. Необходимо отметить, что отсутствие последних, есть прямое свидетельство недоуплотнения бетона при неизбежном снижении его качества.

Контроль качества уплотнения, кроме контроля интенсивности вибрирования и давления пригруза, должен включать оперативный контроль средней плотности бетона или массы периодически (устанавливает лаборатория предприятия) отбираемых свежееотформованных изделий.

Обеспечение минимально необходимой массы изделий известного объема свежееотформованного бетона позволяет оперативно кон-

тролировать его среднюю плотность, вероятный уровень водопоглощения и других свойств, а также своевременно корректировать состав, режим формирования с целью обеспечения требуемой плотности укладки бетона. Кроме массы, первичным признаком качества уплотнения бетона может служить визуально определяемая интенсивность сорбции им капельной влаги, нанесенной на поверхность свежееотформованных изделий. Эти простейшие методы первичного контроля могут практиковаться на производствах элементов благоустройства любого уровня технической оснащенности.

*Распалубка (расформование)*, транспортирование (пакетирование) свежееотформованных изделий должны осуществляться без нарушений структуры бетона, так как в противном случае после его затвердевания на местах первичных дефектов (даже невидимых визуально микронарушений) образуются трещины.

Причина в том, что свежееотформованный бетон из жестких смесей представляет собой схватившуюся систему, характеризующуюся низкой прочностью (преимущественно в пределах 0,05–0,2 МПа) и не обладающую свойством текучести из-за полного физического связывания жидкости. При возникновении структурных нарушений такая система не способна самоликвидировать (восстановить) нарушенные связи, более того, в процессе последующего твердения цементного камня эти дефекты только увеличиваются.

### **7.3. Общие требования к условиям твердения**

*Рекомендуются* условия твердения вибропрессованного бетона, характеризующегося низким начальным водосодержанием, исключаящие испарение воды до набора бетоном не менее 70–80 % прочности от его фактической прочности в проектном возрасте. Только при выполнении данного условия и соблюдении ранее изложенных рекомендаций возможно обеспечение морозостойкости не менее 250 циклов в солевой испытательной среде и гарантированный срок эксплуатации покрытий – 20 лет и более.

Данные условия приближенно могут обеспечить:

– выдержка в течение 48–72 ч в герметичных замкнутых устройствах при относительной влажности  $\varphi \geq 90\%$ , и температуре

$t = 20\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , включая вариант выдержки под паронепроницаемыми герметичными колпаками;

– мягкое пропаривание (или прогрев при поддержании  $\varphi \geq 90\%$ ) по режиму: предварительная выдержка 2–4 ч, подъем температуры до  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  со скоростью до  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ч}$  и последующее медленное остывание в тепловом агрегате в течение 24–48 ч.

Во всех случаях рекомендуется последующее обертывание пакетов (поддонов) с изделиями паронепроницаемыми материалами.

*Фактическая прочность бетона* в проектном возрасте – это не минимальное гарантированное ее значение, соответствующее прочности класса С18/22,5, указанного в СТБ 1071–97\*, а ее значение, полученное фактически при испытании образцов бетона по ГОСТ 10180.

Данное требование обуславливается тем, что только после набора прочности бетоном не менее 70–80 % от фактической прочности проектного возраста, количество химически связанной воды в цементе камне и бетоне соответствует критическому пределу, обеспечивающему устойчивость его структуры под воздействием эксплуатационных факторов (включая и высыхание).

Проблема заключается в том, что даже при обеспечении по СТБ 1071–97\*, 90%-й отпускной прочности на сжатие бетона класса С18/22,5, которая составляет:  $f_{c,90\%} \sim 0,9 \times 22,5:0,7786 = 26\text{ МПа}$ , фактическая прочность бетона мелкозернистого (практикуемых предприятиями Беларуси составов: ПЦ М500 Д0 при расходе более  $500\text{ кг}/\text{м}^3$  бетона) в проектном возрасте (без химических добавок; средняя плотность  $2250\text{ кг}/\text{м}^3$ ) соответствует 50–60 МПа. То есть очевидно, что отпускная прочность бетона примерно соответствует всего лишь 50 % фактической его прочности проектного (28 сут) возраста. Это означает, что в бетоне отпускаемых изделий процесс гидратации цемента находится в развитии, процесс химического связывания воды не завершен и находится еще в активной стадии. Как следствие под действием эксплуатационных факторов проявляются эффекты роста пористости, высолообразования и снижения качества (прочности, морозостойкости, долговечности) бетона.

#### 7.4. Особенности испытаний образцов-изделий

*Определение прочности бетона.* Основываясь на результатах исследований можно сформулировать следующие общие выводы.

Прямые испытания образцов в виде вибропрессованных изделий или их фрагментов, включая такие, которые характеризуются правильной геометрической формой (прямоугольные параллелепипеды различных типоразмеров), дают результаты по прочности бетона на сжатие неадекватные изготовленным (с соблюдением правила прочих равных условий) образцам кубической формы. В этой связи обоснован подход СТБ 1152–99 с определением прочности бетона на сжатие с помощью специальных испытательных пластин.

Установлено, что показатель прочности бетона при испытаниях на сжатие с помощью пластин непосредственно зависит от их типоразмера и, при прочих равных условиях, величина определяемой прочности будет возрастать с увеличением размера пластин.

Выявлено, что для одного и того же типоразмера пластин показатель прочности бетона на сжатие непосредственно зависит от высоты сжимаемого слоя бетона (изделия), снижаясь с ее ростом и наоборот, возрастая с уменьшением высоты слоя бетона (изделия). Установить четкое корреляционное отражение этой закономерности в рамках выполненной работы не удалось, для этого необходимо проведение соответствующих исследований.

Определено, что величина прочности, определяемой путем сжатия с помощью пластин ограниченных ими объемов бетона образцов-изделий, мало зависит от конфигурации последних в плане. Эта зависимость проявляется в связи с расположением пластин на поверхности изделий и показатель прочности может различаться, если пластины располагают, например, в углах образца-изделия (фрагмента) или по его центру. В последнем случае показатель прочности возрастает, т.к. играет роль «работа» кромки пластины: по ее периметру бетон сминается, оказывая сопротивление в этих объемах срезу, дополняя его сопротивление сжатию.

Определяющим фактором зависимости показателя прочности бетона на сжатие от конфигурации и типоразмера образцов-изделий является их высота или высота сжимаемого слоя бетона. В этой связи, чтобы полностью исключить влияние конфигурации изделий в плане на показатель прочности бетона, определяемой с помощью

пластин, следует однозначно устанавливать место их расположения (всегда одно и то же) при испытаниях с целью определения поправочного коэффициента по СТБ 1152–99 и затем при проведении контрольных испытаний.

Обобщение экспериментальных данных показывает, что точность определения прочности бетона на сжатие в изделиях с помощью испытательных пластин наиболее высока при совпадении типоразмера пластин и высоты слоя испытываемого бетона (изделия), т. е. для высоты около 7; 10 и 15 см. При отклонениях от этих типоразмеров по высоте слоя бетона проявляются эффекты «снижения-роста» показателя прочности, связанные как с высотой сжимаемого слоя бетона (изделия), так и с влиянием ранее отмеченного типоразмера пластин. Выходом из этого положения (если не изменять данное положение СТБ 1152–99 и не вводить дополнительные типоразмеры испытательных пластин) является скрупулезное определение переходного коэффициента по диапазону выпускаемых предприятием изделий, отличающихся классом бетона, высотой (толщиной) изделий и их конфигурацией.

*Определение морозостойкости бетона.* Из результатов исследований морозостойкости образцов-изделий (целых плит), образцов-кубов бетона, полученных путем резки плит (бортового камня), следует, что процесс деструкции бетона образцов, изготовленных распиловкой и имеющих грани с «вскрытой» структурой бетона развивается быстрее, чем исходных изделий (в данном случае целых плит). При этом, чем больше разрезов поверхности плит (бортового камня) было при изготовлении образцов-кубов, тем значительно растёт количество поглощаемой ими воды в начальный период испытаний и тем резче снижается прочность бетона в процессе испытаний на морозостойкость.

В рамках выполненных экспериментов влияние разрезки изделий из вибропрессованного бетона на снижение показателя его морозостойкости выражается следующими изменениями прочности бетона в процессе испытаний.

При разрезке плит типоразмера «200 x 100 x 80» мм пополам (1 грань с разрезом) снижение прочности бетона составило через 10 циклов 3,6 % (34,7 МПа); через 15 циклов 12,6 % (31,4 МПа) и через 20 циклов ~ 30 % (25,3 МПа) от начальной прочности 36 МПа. В сравнении с данными об изменении прочности бетона целых плит

при разрезке их на 2 части соотношение прочности (при примерно равной начальной – 36 МПа) следующее:

- 10 циклов: плита – 37,5 МПа; кубы – 34,7 МПа (–7,5 %);
- 15 циклов: плита – 35,9 МПа; кубы – 31,4 МПа (–12,5 %);
- 20 циклов: плита – 32,1 МПа; кубы – 25,3 МПа (–21 %).

Сопоставление данных о результатах одновременных испытаний целых плит и образцов-кубов с разрезами по 2-м и 3-м граням свидетельствуют о резком падении морозостойкости последних, в сравнении с целыми плитами. Эксперименты были прекращены, соответственно, после 15 и 10 циклов, так как прочность бетона образцов с разрезом по 2 и 3 граням к этому моменту снизилась до 30 % и более от ее начального значения (36 МПа).

Основными причинами являются «вскрытие» более пористой структуры бетона и возникающие микротрещины по разрезаемой поверхности. Если при определении прочности на сжатие последние практически не оказывают влияния, т.к. расположены по нормали или под углом к направлению действия приложенной нагрузки и «закрываются» при сжатии образца, то при циклических испытаниях на морозостойкость в сочетании с солевой коррозией они приобретают существенное значение. Этот вывод обоснован как ранее приведенным анализом важнейших работ в области морозостойкости (солестойкости) бетона, так и всем комплексом выполненных в данной работе исследований. «Вскрытая» пористость бетона и зародившиеся при разрезе бетона микротрещины его поверхности при циклических испытаниях (особенно с глубоким замораживанием в растворе соли) не закрываются, а интенсивно развиваются, приводя к ускоренной деструкции бетона. Фактически процесс разрезки выполняет роль начальной стадии испытаний целых образцов до момента появления микротрещин в бетоне. В разрезанных образцах они присутствуют уже к началу испытаний. Изложенное подтверждается наблюдениями за изменением поверхности образцов бетона в процессе испытаний. Явные признаки размораживания: шелушение, округление ребер, отслоения участков, проявляются именно со стороны разреза.

Сопоставляя данные по морозостойкости целых плит и образцов после разрезки следует отметить влияние на процесс деструкции бетона гидрофобизирующей добавки.



Так, начальное водопоглощение по массе бетона целых плит составило всего 2 %. Это очень низкое значение водопоглощения и если бы оно было получено за счет плотности бетона, то соответствовало бы его морозостойкости не менее 500 циклов в солевой среде [23, 60]. Для сравнения - водопоглощение такой горной породы как гранит составляет 0,5–1,5 %.

В данном же случае указанное низкое водопоглощение получено за счет применения гидрофобизирующей добавки и не отражает физической сущности (состояния) пористости цементного камня и бетона в целом. Так, по данным настоящих исследований при первоначальном водонасыщении бетон с добавками «набирает» относительно небольшой объем воды (на  $W_m \sim 2\%$ ). Но через 3–5 циклов замораживания (при  $-50$  ( $55$ ) °C) – оттаивания водопоглощение нарастает до реального физического объема пор (выравнивается с водопоглощением разрезанных образцов), т.е. гидрофобизирующее действие добавки по существу исчезает.

Одновременно введение гидрофобизирующей добавки существенно повлияло на прочность бетона, а именно: снизило ее до 36 МПа, от наиболее вероятного значения в 50–60 МПа и более для бетона примененного состава, величины  $(B/C)_6$  и степени (качества) уплотнения. В результате этого существенно снизилась способность структуры бетона без нарушений воспринимать знакопеременные деформации и действие других разрушающих факторов, возникающих в процессе испытаний (эксплуатации) и подробно рассмотренных в 1-м разделе; как следствие, понижается морозостойкость и долговечность бетона.

На основании изложенного следует, во-первых, вывод-рекомендация о повышении морозостойкости бетона вибропрессованных изделий за счет повышения его плотности и непроницаемости, а во-вторых, рекомендация о необходимости изготовления образцов для испытаний на морозостойкость не разрезкой изделий, а путем формования образцов стандартных типоразмеров. Критерием одинакового качества структуры бетона в изделиях и образцах для испытаний (при прочих равных условиях) является равенство средней плотности бетона изготавливаемых образцов и контролируемой средней плотности бетона в изделиях. Максимальное отклонение величины средней плотности между ними не должно превышать  $25 \text{ кг/м}^3$  (рекомендуется  $10\text{--}15 \text{ кг/м}^3$ ) в большую или меньшую сто-

рону, так как при этом более чем на 1 %, соответственно, уменьшается или увеличивается водопоглощение бетона по массе, что может существенно повлиять на показатель его морозостойкости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты отраженных в монографии исследований направлены на решение задачи повышения качественных характеристик бетона изделий, изготавливаемых вибропрессованием. Авторы далеки от мысли, что в настоящей работе найдено решение всего множества аспектов этой чрезвычайно важной для обеспечения эксплуатационной надежности и долговечности изделий из вибропрессованного бетона задачи. Вместе с тем в монографии нашло отражение влияние на процесс формирования структуры бетона свойств применяемых материалов, режимов формования, условий твердения, а также экспериментальное обоснование взаимосвязи и взаимозависимости его прочностных и эксплуатационных свойств от качественных характеристик (пористости, проницаемости) сформировавшейся структуры бетона.

Практическую значимость (в том числе и с позиций корректировки действующих нормативных документов) имеют закономерности изменений морозостойкости бетона (ее снижения) под влиянием механических нагрузок, а также выявленная взаимосвязь между показателем (величиной) прочности бетона, размерами испытательных пластин и размерами изделий, непосредственно на которых определяют прочность бетона по действующему стандарту.

Значительным подспорьем в работе технологических служб предприятий, производящих вибропрессованные изделия, могут стать предложенная методика подбора состава бетона, методика оперативного контроля его ожидаемой морозостойкости, а также общие рекомендации по формованию изделий вибропрессованием.

Отзывы, замечания, пожелания и предложения просим направлять в Белорусский национальный технический университет на кафедру «Технология бетона и строительные материалы».

## ИСПОЛЬЗУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Горчаков, Г.И. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений/ Г.И. Горчаков, М.М. Капкин, Б.Г. Скрамтаев. – Москва: Стройиздат, 1965. – 195 с.

2. Дементьев, Г.К. Условие долговечности бетона и железобетона/ Г.К. Дементьев. – Куйбышев: Куйбышевское книгоиздат, 1955. – 120 с.

3. Нилендер, Ю.А. Поверхностная прочность бетона и связь ее с появлением трещин/ Ю.А. Нилендер// Труды конференции по коррозии бетона/ АН СССР. 1937. – 284 с.

4. Попов, Н.Д. К вопросу об усталости бетона при многократных циклах чередующихся воздействий окружающей среды/ Н.Д. Попов, В.А. Невский// Тр. МИСИ им. В.В. Куйбышева: Сб. № 15. – Москва, 1957.

5. Москвин, В.М. Морозостойкость бетона в напряженном состоянии/ В.М. Москвин, А.М. Подвальный – Бетон и железобетон. – 1960. – № 2.

6. Цементный бетон в дорожном строительстве/ С.В. Шестоперов и [др.] – Москва: Дориздат, 1950. – 132 с.

7. Шестоперов, С.В. Долговечность бетона/ С.В. Шестоперов. – Москва: Автогосиздат, 1970. – 267 с.

8. Стольников, В.В. Исследования по гидротехническому бетону/ В.В. Стольников. – Москва: - Ленинград: Госэнергоиздат, 1953. – 330 с.

9. Цытович, Н.А. Основания механики мерзлых грунтов/ Н.А. Цытович, М.И. Сумгин. – Москва: Изд-во, АН СССР, 1937. – 432 с.

10. Лыков, А.В. Тепло- и массообмен в процессах сушки/ А.В. Лыков. – Москва: - Ленинград: Госэнергоиздат, 1956. – 464 с.

11. Конопленко, А.И. К вопросу теории морозостойкости бетона. В сб. тр. Ростовского инженерно-строит института. – Ростов – на Дону, 1958. Вып. XII. –С. 105-120.

12. Powers T. A Working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete/ T. Powers// J. Am. Coner. Inst. – 1945, No. 4 – v. 16.

13. Powers T., Helmuth R. Theory of volume changes in hardened portland – cement paste during freezing/ Proceedings Hig way Research Board, 1953, v. 32.

14. Collins A. The destruction of concrete by frost, Institute of Civil Engineers 1944 nov.p.5412.

15. Бриджмен, П.В. Новейшие работы в области высоких давлений/ П.В. Бриджмен.– Москва: Госиздат, 1948. – С. 98, 110–112.

16. Нерсесова, З.А. Изменение льдистости грунтов в зависимости от температуры/ З.А. Нерсесова// ДАН СССР, 1950. – Т. 75, № 6. – С.845–846.

17. Цытович Н.А. Основания и фундаменты на мерзлых грунтах/ Н.А. Цытович – Москва: Изд-во, АН СССР, 1958. – 168 с.

18. Кириенко, И.А. Теоретическое обоснование твердения цементных растворов и бетонов на морозе/ И.А. Кириенко– Киев: Академия строительства и архитектуры УССР, 1962. – 28 с.

19. Кириенко, И.А. Теоретическое обоснование твердения цементных растворов и бетонов на морозе/ И.А. Кириенко.– Киев: Госстройиздат УССР, 1962. – 271 с.

20. Ахвердов, И.Н. Механизм упрочения бетона при его раннем замораживании / И.Н. Ахвердов, Э.Л. Каплан //ДАН БССР, 1967. – Т.17, № 7. – С. 688–691.

21. Ахвердов, И.Н. Исследование особенностей фазовых превращений воды в цементном камне/ И.Н. Ахвердов, Л.Б. Дзабиева// ДАН БССР. – Минск, 1973. – Т. 17, № 7. – С. 636–639.

22. Зацепина, Г.Н. Свойства и структура воды/ Г.Н. Зацепина. – Москва: Изд-во Московского университета, 1974. – С. 48-80.

23. Батяновский, Э.И. Особо плотный бетон сухого формирования/ Э.И. Батяновский - Минск.: НПООО «Стринко»; 2002. – 224 с.

24. Шейкин, А.Е. Влияние тепловлажностной обработки и тонкости помола цемента на структуру и свойства цементного камня/ А.Е. Шейкин, Н.И. Олейникова. - Москва: Стройиздат, 1964. – 24 с.

25. Шейкин, А.Е. Прогнозирование морозостойкости бетона при выборе его состава/ А.Е. Шейкин// Бетон и железобетон, 1979. №11. – С. 25-26.

26. Шейкин, А.Е. Структура и свойства цементного бетона/ А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. – Москва: Стройиздат, 1979. – 343 с.

27. Шейкин, А.Е. О связи критерия морозостойкости с реальной морозостойкостью бетонов/ А.Е. Шейкин, Л.М. Добшиц// Бетон и железобетон, 1981. №1. – С. 19-20.

28 Шейкин, А.Е. Цементные бетоны высокой морозостойкости/ А.Е. Шейкин, Л.М. Добшиц. – Ленинград: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1989. – С. 128 с.

29. Ахвердов, И.Н. Влияние вида цемента на стойкость цементного камня при насыщении растворами NaCl и KCl/ И.Н. Ахвердов, И.В. Станишевская// ДАН БССР, 1967. – Т. 11, № 10. – С.893–896.

30. Ахвердов, И.Н. Механизм разрушения пористых материалов при насыщении их солями/ И.Н. Ахвердов, И.В. Станишевская// ДАН БССР, 1967. – Т. 11, № 4. – С. 320–323.

31. Иванов, Ф.М. Защита железобетонных транспортных сооружений от коррозии/ Ф.М. Иванов. – Москва: Транспорт, 1968. – 175 с.

32. Путан, А.А. Оценка кристаллизационных давлений в пористых средах методом фотоупругости/ А.А. Путан, А.А. Барташевич// В кн. Методы исследований стойкости строительных материалов и конструкций. – Минск: Вышэйшая школа, 1969. – С. 60–69.

33. Алексеев, С.Н. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде/ С.Н. Алексеев, Н.К. Розенталь. – Москва: Стройиздат, 1976. – 205 с.

34. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин [и др.] – Москва: Стройиздат, 1980. – 536 с.

35. Шалимо, М.А. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. – Мн.: Выш. Шк., 1986. – 200 с.

36. Гузеев, Е.А. Расчет железобетонных конструкций с учетом кинетики коррозии бетона третьего вида/ Е.А. Гузеев, Н.В. Савицкий, // Сб. научн. трудов НИИЖБа. Под общ. ред. С.Н. Алексеева. – Москва: НИИЖБ Госстроя СССР, 1988. – С. 16-20.

37. Плиты бетонные и железобетонные для тротуаров и дорог. Технические условия. СТБ 1071-2007. Введ. 18.07.2007. – Минск: Госстандарт, 2007. – 15 с.

38. Камни бетонные бортовые и железобетонные. Технические условия. СТБ 1097-2012. – Введ. 20.04.2012. – Минск: Госстандарт, 2012. – 13 с.

39. Юнг, В.Н. Технология вяжущих веществ/ В.Н. Юнг [и др.] – Москва: Промстройиздат, 1952. – 262 с.

40. Лыков, А.В. Теория сушки/ А.В. Лыков. – Москва: Госиздат, 1968. – 472 с.

41. Дерягин, Б.В. Упругие свойства тонких слоев воды/ Б.В. Дерягин // Журн. физической химии. 1932. Т.3, №1. – С. 29–42.

42. Дерягин, Б.В. Новые свойства жидкостей. Сверхплотная вода/ Б.В. Дерягин, Н.В. Чураев. – Москва: «Наука» 1971. – 176 с.

43. Федякин, Н.Н. О температурном расширении воды в микрокапиллярах/ Н.Н. Федякин // Доклады АН СССР, т. 138, № 6, 1961. – С. 1389–1391.

44. Москвин, В.М. Влияние низких отрицательных температур на деформативность цементного камня/ В.М. Москвин, М.М. Капкин. – Тр. НИИЖБ АС и А СССР, вып. 28, 1962. – С. 66–75.

45. Volare R. Volume changes in small concrete cylinders during freezing and thawing. J. Am. Coner. Jnst., v. 21, № 6, 1950, v. 21.

46. Попов, Н.А. Температурные деформации цементно-песчаного раствора при замерзании и оттаивании/ Н.А. Попов, Г.И. Горчаков, И.И. Лифанов// «Известия вузов (Строительство и архитектура)», Москва, 1962, №1. – С. 103-112.

47. Вейберг, Б.П. Лед. Монография. – Москва: - Ленинград: Госиздат, 1940.

48. Бриллинг, Р.Е. Миграция влаги в строительных ограждениях/ Р.Е. Бриллинг// Исследования по строительной физике/ ЦНИПС. Москва; Ленинград, 1949. №3. С. 85-120.

49. Ахвердов, И.Н. Высокопрочный бетон/ И.Н. Ахвердов. – Москва: Госстройиздат, 1961. – 163 с.

50. Мощанский, Н.А. Повышение стойкости строительных материалов и конструкций, работающих в условиях агрессивных сред/ Н.А. Мощанский. – Москва: Госстандарт, 1962. – 235 с.

51. Ступаченко, П.П. Структурная пористость и ее связь со свойствами цементных, силикатных и гипсовых материалов/ П.П. Ступаченко // Тр. Дальневосточного политехнического ин-та им. В.В. Куйбышева. Т.63, вып. 1. Владивосток, 1964. – С. 3 – 62.

52. Чеховский, Ю.В. Понижение проницаемости бетона/ Ю.В. Чеховский. – Москва: Энергия, 1968. – С. 39-56.

53. Гордон, С.С. Структура и свойства тяжелых бетонов на различных заполнителях/ С.С. Гордон. – Москва: Стройиздат, 1969. – 160 с.

54. Пауэрс, Т.К. Физическая структура портландцементного теста/ Т.К. Пауэрс. – Москва: Стройиздат, 1969. – С. 300–319.

55. Иванов, Ф.М. Коррозионные процессы и стойкость бетона в агрессивных средах/ Ф.М. Иванов. – Автореф. Дис... д-ра техн. наук. – 1969. – 39 с.

56. Иванов, Ф.М. Влияние тепловлажностной обработки на структуру и свойства цементных растворов/ Ф.М. Иванов, Т.Г. Красовская, В.Л. Солнцева// Труды междунар. конф. по проблемам ускор. тверд. бетона при изготовлении СЖБ. Москва, 1968. – 400 с.

57. Бруссер, М.И. Исследование структурной пористости бетона и факторов ее определяющих/ М.И. Бруссер. – Автореф. дис. канд. техн. наук. Москва, 1971. – 19 с.

58. Коупленд, Л.Э. Структура и свойства затвердевшего цементного теста/ Л.Э. Коупленд, Д.Д. Вербек// Шестой международ. конгр. по химии цемента. – Москва: Стройиздат, 1976. – Т. 2. – С. 258-274.

59. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона/ И.Н. Ахвердов. – Москва: Стройиздат, 1981. – 464 с.

60. Батяновский, Э.И. Основы технологии изготовления бетонных и железобетонных изделий и конструкций с применением сухих бетонных смесей/ Э.И. Батяновский. – Дис... докт.техн. наук: БНТУ. – Минск, 2002. – С 156-159.

61. Стольников, В.В. Седиментационные процессы в бетонной смеси и их влияние на образование структуры бетона и его водонепроницаемость/ В.В. Стольников, П.А. Ребиндер, Е.В. Лавринович// ДАН СССР, 1951, вып. XXXI, №3. – С. 431-434.

62. Scrivener K.L., Crumbie A.K., Pratt P.L. A Study of the Interfacial Region between Cement Paste and Aggregate in Concrete//Bond. Cementitious Compos.: Symp., Boston, Mass., Dec. 2 – 4, 1987. Pittsburgh (Pa), - 1988/ - p. 87-88.

63. Wang Jia. Investigation of structure and properties of the Interfacial Zone between Lime Aggregate and Cement Paste. //J. Chin. Silic. Soc., 1987, N2. – p. 114-121.

64. Detwiler R.J., Monteiro P.J.M., Wenk Hans-Rudolf, Zhong Zengqiu. // Texture of Calcium Hydroxide near the Cement Paste-Aggregate Interface. // Cem. And. Concr. Res., 1988, M5, - p. 823-829.

65. Garboczi E.J., Bentz D.P. Digital Simulation of the Aggregate-Cement Paste Interfacial Zone in Concrete. // J. Mater. Res., 1991, NsII. – p. 196-201.

66. Eghbalnik S. PRIMARY PROTECTION OF HARDENING CONCRETE BY SUBSTANCES CONSOLIDATING THE STRUCTURE (Доклад на конференции молодых ученых: «EUROPEAN

AND NATIONAL DIMENSION IN RESERCH»). – Новополюцк, 2011. Полоцкий государственный университет. Ч.3., - С. 96-100.

67. Рейтлингер, С.А. Механизмы переноса газов и жидкостей через бетон и методы исследования структуры пор бетона/ С.А. Рейтлингер, Ю.В. Чеховский. – Москва: ВНИИСТ Главгаза СССР, 1961. – 18 с.

68. Баженов, Ю.М., Технология бетона: учеб. Пособие для строит. вузов. 2-ое изд., перераб/ Ю.М. Баженов, – Москва: Высшая шк., 1987. – С. 88-105.

69. Тейлор, Х. Химия цемента. пер. с англ. – Москва: Кир, 1996. – С. 290-327.

70. Хадли, М. Гидрофобно-кальматирующая пропитка бетона в условиях жаркого климата: автореф. дис. канд. техн. наук. Госуниверситет строительства архитектуры. Харьков, 1996. – 21 с.

71. Трахимчик, О.Е. Повышение эксплуатационных свойств бетона обработкой растворами на основе гексафторсиликата магния. автореф. дис. канд. техн. наук. Специальность: 05.17.11., 05.17.01. Бел.Гос.Технол. Ун-т. – Минск, 2006, -19 с.

72. Эгбалник, С. Технология и эффективность защиты твердеющего бетона веществом сульфоалюмината /С. С.Эгбалник, Э.И. Батяновский// Строительная наука и техника. – Минск, 2013. - №1 (42). – С. 14-21.

73. Эгбалник, С. Теоретико-практические аспекты ухода за твердеющим цементным бетоном. /С. Эгбалник, Э.И. Батяновский// Наука и техника. – Минск, 2013. – №3. – С. 22-27.

74. Эгбалник, С. Технология первичной защиты твердеющего бетона уплотняющим его структуру сульфатом алюминия. дис.... канд. техн. наук: 05.23.05.- Мн., 2013. – 128 с.

75. Скрамтаев, Б.Г. Достижения технологии бетона в СССР и дальнейшие задачи/ Б.Г. Скрамтаев //Труды IV Всесоюзной конференции по бетону и железобетонным конструкциям. Ч. III. Усовершенствование технологии бетона. – Москва-Ленинград: Гос. из-во. Строит. Лит. 1949. – С. 3-25.

76. Шестоперов, С.В. Долговечность бетона/ С.В. Шестоперов – Москва: Автоотрансиздат, 1955. – 480 с.

77. Горчаков, Г.И. Повышение морозостойкости и прочности бетона. – Москва: Промстройиздат, 1956. – 107 с.



78. Алексеев, С.Н. Установка для ускорений испытаний морозостойкости //Труды НИИЖБа. – 1959. – Вып. 12. – С. 113–124.

79. Власов, О.Е. Физические основы теории морозостойкости// Труды НИИ стройиндустрии. – 1967. – Вып. 3. – С. 163–178.

80. Иванов, Ф.М. Определение морозостойкости бетона ускоренным методом/ Ф.М. Иванов, В.С. Гладков, О.А. Виноградов – Ленинград: Энергия, 1969. – 57 с.

81. Москвин, В.М. Расчетно-экспериментальные методы оценки морозостойкости бетона/ В.М. Москвин, Н.Д. Гоглубых, // Бетон и железобетон. – 1976. № 9. – С. 19–22.

82. Лифанов, И.И. К вопросу прогнозирования долговечности бетона // сб. трудов МИСИ. №141 – 1977. – С. 74-86.

83. Пиралов, Т.С. Способ ускоренного определения морозостойкости бетона/ Т.С. Пиралов, В.А. Невский, Ю.А. Ильевский// Бетон и железобетон. – 1980. №9. – С.19.

84. Макарова, О.А. Определение морозостойкости пористых материалов/ О.А.Макарова, А.П. Меркин, // Строительные материалы. – 1965. №11. – С. 23.

85. Блещик, Н.П. Основы технологии и методов контроля качества морозостойкости бетонов/ Н.П. Блещик, О.В. Лазаренко// Архитектура и строительство. – 2001, № 6. – С. 41–48.

86. Лазаренко, О.В. Структура, температурные деформации и методика ускоренного определения морозостойкости бетонов: автореф. дис. канд. техн. наук. 05.23.05 / Брест. Гос. техн. ун-т. – Брест, 2001. – 20 с.: ил.; 20 см.

87. Бабицкий, В.В. Прогнозирование морозостойкости бетона/ В.В. Бабицкий, А.А. Дрозд// Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республике Беларусь: материалы XI Международного научно-методического межвузовского семинара; Брест 25-27 ноября 2004 г./ Брестской государственной технической университет, 2005.- Ч.1. – С. 212-216.

88. Бабицкий, В.В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона: дис. д-ра техн. наук: 05.23.05 – Строительные материалы и изделия. – Минск, 2005. – С. 90 – 131.

89.Ковшар, С.Н. Прогнозирование морозостойкости на стадии проектирования составов бетона/ С.Н. Ковшар, О.В. Глинская// Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова – 2010. – №1. – С. 5 – 9.

90. Ковшар, С.Н. Оценка и прогнозирование морозо- и солестойкости тяжелого бетона с учетом изменения конструктивных и деформативных факторов: Дис... канд. техн. наук: 05.23.05 – строительные материалы и изделия. – Минск, 2010. – 175 с.
91. Десов, А.Е. Вибрированный бетон. – Москва: Гос. Издат по строит. И архитект., 1956. – 229 с.
92. Рейнер М. Реология: пер. с нем. – Москва: Наука, 1965. 463 с.
93. Ребю П. Вибрирование бетона: пер. с фр. – Москва: Стройиздат, 1970. – 256 с.
94. Сторк Ю. Теория состава бетонной смеси: пер. с болг. – Ленинград: Стройиздат, 1971. – 276 с.
95. Савинов, О.А., Теория и методы вибрационного формирования железобетонных изделий/ О.А. Савинов, Е.В. Лавринович. – Ленинград: Стройиздат, 1972. – С. 276.
96. Савинов, О.А. Вибрационное уплотнение бетонных смесей/ О.А. Савинов [и др.]. – Ленинград: Энергия. 1973. 46 с.
97. Шмигальский, В.Н. Уплотнение бетонных смесей разночастотным вибрированием/ В.Н. Шмигальский // Бетон и железобетон. – 1974 – №11. – С. 26–27.
98. Шмигальский, В.Н. О роли гистерезисных явлений при виброуплотнении бетонных смесей/ В.Н. Шмигальский, Б.П. Кутько // Технологическая механика бетона. – Рига, 1981. – С. 51–54.
99. Кунос, Г.Я. Реология бетонных смесей и ее технологические приложения/ Г.Я. Кунос // Технологическая механика бетона. – Рига, 1980. -20.
100. Миклашевский, Е.П. Глубинное вибрирование бетонной смеси/ Е.П. Миклашевский – Москва: Стройиздат, 1981. – 275 с.
101. Гусев, Б.В. Ударно-вибрационная технология уплотнения бетонных смесей/ Б.В. Гусев [и др.] – Москва: Стройиздат, 1982. – 127 с.
102. Зазимко, В.Т. Уплотнение жестких бетонных смесей вибраторами с регулируемыми параметрами/ В.Т. Зазимко, А.С. Петров// Пром. сбор. железобетона. – Москва, 1983. – Вып. 8. – С. 8-11.
103. Афанасьев, А.А. Уплотнения бетонных смесей/ А.А. Афанасьев. – Москва: Стройиздат, 1987. – 168 с.
104. Афанасьев, А.А. Возведение зданий и сооружений из монолитного железобетона/ А.А. Афанасьев. – Москва: Стройиздат, 1990. – 376 с.
105. Ахвердов, И.Н. Ультразвуковое вибрирование в технологии бетона/ И.Н. Ахвердов, М.А. Шалимо. – Москва: Стройиздат, 1969. – 135 с.

106. Ахвердов, И.Н. Акустическая технология бетонов/ И.Н. Ахвердов [и др.] – Москва: Стройиздат, 1976. – 145 с.

107. Баженов, Ю.М. Технология бетонных и железобетонных изделий/ Ю.М. Баженов, А.Г. Комар. – Москва: Стройиздат, 1984. – 561 с.

108. Блещик, Н.П. Структурно-механические свойства и реология бетонной смеси и пресс-вакуум-бетона/ Н.П. Блещик. – Минск: Наука и техника, 1977. – 230 с.

109. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона/ И.Н. Ахвердов. – Москва: Стройиздат, 1981. – 425 с.

110. Батыновский, Э.И. Влияние технологических факторов на проницаемость вибропрессованного бетона/ Э.И. Батыновский, А.И. Бондарович, П.В. Рябчиков// Строительная наука и техника, 2006. № 3. – С.18-26.

111. Фридрихсберг, Д.А. Курс коллоидной химии/ Д.А. Фридрихсберг. – Ленинград; Химия, 1984. – 368 с.

112. Тейлор, Х. Химия цемента. пер. с англ./ Х. Тейлор. – Москва: МИР, 1996. – 500 с.

113. Применение добавок в бетоне. П 1-99 к СНиП 3.09.01-85. – Минск.: Минстройархитектуры РБ, 2000. – 33с.

114. Бондарович, А.И. Влияние комплексных физико-механических воздействий на структуру и морозостойкость вибропрессованного тяжелого бетона. Дис... канд. техн. наук: БНТУ. – Минск, 2015. – 217 с.

115. Батыновский, Э.И. Оценка эксплуатационной долговечности тяжелого бетона по критерию «остаточной» морозостойкости / Э.И. Батыновский, А.И. Бондарович// Автомобильные дороги и мосты, 2010. - № 2(6). – С. 49-59.

116. Бондарович, А.И. Методика ускоренной оценки морозостойкости вибропрессованного бетона в изделиях / А.И. Бондарович, Э.И. Батыновский // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. трудов /Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. РУП «Институт БелНИИС»; редкол. М.Ф. Марковский (председатель) [и др.]. – Минск: издатель А.Н. Вараксин, 2014 - №6. - Стр. 34-44.

117. Берг О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона/ О.Я. Берг – Москва: Госстройиздат, 1962. – 96с.

118. Берг О.Я. О предельном состоянии железобетонных конструкций по долговечности/ О.Я. Берг // Бетон и железобетон, 1964. № 11. – С. 486-488.

119. Берг О.Я. Высокопрочный бетон/ О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко– Москва: Стройиздат, 1971.

120. СТБ ЕН 1339–2007 Плиты бетонные. Требования и методы испытаний.

121. СТБ ЕН 1340–2007 Камни бортовые бетонные. Требования и методы испытаний.

122. Ахвердов, И.Н. Исследование метода испытания бетона на растяжение посредством раскалывания образцов/ И.Н. Ахвердов, С.М. Ицкович// Бетон и железобетон. – 1961. – № 1. – С. 19–23.

123. Батяновский Э.И. Влияние многократных механических нагрузок на свойства тяжелого бетона / Э.И. Батяновский, А.И. Бондарович, П.В. Рябчиков // Строительная наука и техника, 2007. - № 1-10. – С. 12-22.

124. Батяновский Э.И. Морозо- и солестойкость бетона, подверженного механическим нагрузкам / Э.И. Батяновский, А.И. Бондарович// Вестник БНТУ, 2008. – № 4. – С. 5–16.

125. Бондарович, А.И. Влияние комплексного воздействия эксплуатационной среды и механических нагрузок на динамику изменения свойств бетона элементов благоустройства / А.И. Бондарович, Э.И. Батяновский // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов европейского союза в области строительства: материалы научно-методического семинара (Минск, 22-23 мая 2013 г.): сб. науч. статей науч.-метод. Семинара: в 2 ч. – Минск: БНТУ, 2013. – Ч. 2., Стр.28–39.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
1. Структура и морозостойкость цементного бетона .....	5
1.1. Гипотезы и механизм морозной деструкции бетона .....	5
1.2. Взаимосвязь морозостойкости бетона с его пористостью (структурой), свойствами и миграцией насыщающей его жидкости и деформациями при замораживании-оттаивании .....	12
1.3. Принципиальные основы методов прогнозирования (оценки) морозостойкости бетона .....	37
2. Влияние вибровоздействия и свойств составляющих на качество уплотнения и свойства бетона .....	43
2.1. Теоретические основы влияния параметров вибрирования и характеристик смеси на процесс уплотнения бетона .....	43
2.1.1. Теоретико-физические основы вибровоздействия .....	43
2.1.2. Миграция воздуха в смесях при вибровоздействии .....	48
2.1.3. Скорость, ускорение и распространение колебаний в вибрируемой смеси .....	52
2.1.4. Интенсивность и эффективность вибрирования .....	58
2.2. Влияние свойств составляющих на формуемость и свойства бетона .....	63
2.2.1. Особенности виброуплотнения жестких смесей .....	68
2.2.2. Влияние гранулометрии заполнителей .....	69
2.2.3. Влияние расхода цемента и пигментов .....	72
2.2.4. Влияние водосодержания и химических добавок .....	75
2.3. Влияние свойств заполнителей на свойства бетона .....	79
2.3.1. Прочность и истираемость бетона .....	80
2.3.2. Водопоглощение и морозостойкость бетона .....	81
2.4. Влияние пигментов на свойства бетона .....	83
2.4.1. Свойства пигментированного цемента .....	84
2.4.2. Свойства пигментированного бетона: прочность, водопоглощение, морозостойкость, истираемость бетона .....	85
2.5. Влияние химических добавок на свойства бетона .....	86
2.5.1. Свойства цемента с добавками .....	87
2.5.2. Свойства бетона с добавками: прочность, водопоглощение, морозостойкость, истираемость .....	88
3. Влияние условий твердения и качества уплотнения на проницаемость бетона .....	91

3.1. Направления и общая методика исследований .....	91
3.2. Кинетика водопоглощения бетона.....	94
3.2.1. Влияние условий и времени твердения.....	95
3.2.2. Влияние качества уплотнения бетона .....	103
3.3. Влияние условий твердения на проницаемость бетона ....	105
3.3.1. Водонепроницаемость бетона.....	105
3.3.2. Коэффициент фильтрации бетона .....	108
3.4. Взаимосвязь условий твердения, водопоглощения (пористости) и прочности бетона .....	110
4. Морозостойкость бетона в зависимости от условий твердения, способа изготовления образцов и воздействия механических нагрузок .....	113
4.1. Влияние условий твердения бетона на его морозостойкость ...	113
4.1.1. Методика исследований.....	113
4.1.2. Характеристики образцов бетона для испытаний.....	114
4.1.3. Изменение массы бетона в процессе испытаний .....	116
4.1.4. Изменение прочности бетона .....	120
4.2. Влияние разрезки образцов на показатель морозостойкости бетона .....	123
4.2.1. Характеристики образцов бетона для испытаний.....	123
4.2.2. Морозостойкость бетона по изменению массы, прочности, скорости ультразвука .....	129
4.3. Снижение морозостойкости бетона под влиянием статической и динамической нагрузок .....	136
4.3.1. Изменение массы образцов бетона при испытании в водной среде и солевом растворе .....	139
4.3.2. Прочность бетона в зависимости от условий твердения и действия статической нагрузки .....	144
4.3.3. Изменение скорости ультразвука при действии статической нагрузки .....	149
4.3.4. Влияние динамической нагрузки и циклических воздействий на свойства бетона.....	152
4.3.5. Натурные испытания бетона тротуарных плит на комплексное воздействие среды и механических нагрузок .	169
4.4. Обобщение результатов экспериментов.....	176
5. Исследования зависимости показателя прочности бетона при испытаниях на сжатие от типоразмеров образцов.....	178

5.1. О методике стандартных испытаний бетона мелкоштучных изделий на прочность и общая методика исследований .....	178
5.2. Влияние высоты образцов на показатель прочности бетона .....	190
5.3. Влияние типоразмера пластин на показатель прочности бетона .....	195
5.4. Влияние размеров образцов в плане (ширина, длина, конфигурация) на показатель прочности бетона .....	200
5.5. Испытания бетона в изделиях на сжатие .....	206
5.6. Обобщение результатов исследований .....	209
6. Методики подбора состава вибропрессованного бетона и оперативного контроля (оценки) морозостойкости .....	211
6.1. Методика подбора состава мелкозернистого бетона .....	212
6.2. Особенности методики подбора состава со щебнем .....	216
6.3. Примеры расчета составов бетона .....	219
6.4. Методика оперативного контроля (оценки) морозостойкости бетона .....	223
6.4.1. Область применения .....	223
6.4.2. Нормативные ссылки .....	223
6.4.3. Приборы и методы контроля состояния бетона .....	224
6.4.4. Основные положения методики .....	225
7. Общие рекомендации по формированию элементов благоустройства вибропрессованием .....	239
7.1. Общие требования к материалам .....	239
7.2. Общие требования к составу бетона и режиму его формирования .....	242
7.3. Общие требования к условиям твердения .....	244
7.4. Особенности испытаний образцов-изделий .....	246
Заключение .....	250
Используемая литература .....	251

Научное издание

**БАТЯНОВСКИЙ** Эдуард Иванович  
**БОНДАРОВИЧ** Александр Иванович

**ВИБРОПРЕССОВАННЫЙ БЕТОН:  
ТЕХНОЛОГИЯ И СВОЙСТВА**

Подписано в печать 22.06.2018. Формат 60×84<sup>1/16</sup>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 15,35. Уч.-изд. л. 12,00. Тираж 100. Заказ 632.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск