

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Архитектурно-строительный институт

(наименование института полностью)

Центр архитектурных, конструктивных решений и организации строительства

(наименование)

08.04.01 Строительство

(код и наименование направления подготовки)

Строительство, эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений

(направленность (профиль))

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Подбор бетонной смеси по морозостойкости для гибких бетонных  
плит ПБЗГУ-405

Обучающийся

А.А. Фуфыгин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

канд. техн. наук, доцент, Д.С. Тошин

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант

канд. пед. наук, доцент, О.Н. Брега

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Рецензент

канд. техн. наук, д-р. экон. наук, профессор, А.А. Руденко

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

## Оглавление

Введение.....	3
Глава 1 Обзор литературы. Постановка задач исследования.....	6
1.1 Область применения плит бетонных защитных гибких универсальных.	6
1.2 Технические требования и область применения дорожного бетона .....	8
1.3 Процессы гидратации и структурообразования при твердении цементов .....	13
1.4 Морозостойкость дорожного бетона .....	20
1.5 Современные методики получения долговечного дорожного бетона ...	28
Глава 2 Характеристики применяемых материалов и подбор состава бетонной смеси .....	33
2.1 Свойства и характеристики применяемых материалов .....	33
2.1.1 Цемент .....	33
2.1.2 Песок .....	34
2.1.3 Щебень .....	35
2.1.4 Добавки .....	40
2.2 Разработка состава бетонной смеси .....	41
2.3 Выбор факторов и интервалов варьирования .....	46
2.4 Выбор плана и условий проведения эксперимента.....	48
Глава 3 Проведение и обработка результатов испытаний.....	51
3.1 Расчет всех составов бетонной смеси .....	51
3.2 Проведение эксперимента.....	54
3.3 Статистическая обработка результатов эксперимента .....	57
3.4 Оценка достоверности полученных результатов .....	60
3.5 Определение оптимального состава бетонной смеси .....	64
3.6 Физико-механические испытания дорожного бетона.....	65
3.7 Исследование влияния химических добавок на структуру бетона.....	67
Заключение .....	69
Список используемой литературы и используемых источников.....	70

## Введение

Актуальность и научная значимость. В сфере дорожного строительства в настоящее время проводятся масштабные работы по обновлению и улучшению существующей инфраструктуры, а также по возведению новых сооружений. В связи с этим возникает значительная потребность в прочных и долговечных строительных материалах, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, среди которых особое внимание уделяется бетонам. Для укрепления откосов дорог, опорных частей мостов и береговых линий, предохраняя их размывание применяют плиты бетонные защитные гибкие универсальные. Исходя из того, что эти плиты постоянно находятся в условиях агрессивной среды, конструкции должны обладать прочностью и продолжительным сроком эксплуатации.

Разработка высокоэффективных бетонов для дорожного строительства является актуальной задачей, требующей комплексного подхода. Для повышения прочности бетона возможно использование различных методов, включая увеличение гидратных новообразований в виде геля, введение в смесь металлической и полимерной фибры, а также повышение плотности матрицы через улучшение однородности структуры бетона. Для улучшения свойств цементных бетонов могут быть применены добавки различной природы, включая минеральные и химические добавки.

Одним из ключевых факторов, влияющих на стойкость бетонов в условиях агрессивной среды, является модификация структуры и свойств новообразований. Для достижения желаемых результатов следует учитывать условия твердения и эксплуатации материала, а также формирование требуемой структуры цементного камня и свойств бетона.

Цель исследований – оптимизация состава дорожного бетона для гибких бетонных плит ПБЗГУ-405 по морозостойкости с использованием высококачественных заполнителей и пластификаторов.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- провести литературный обзор для уточнения научной новизны и актуальности исследования;
- определить свойства и характеристики применяемых материалов;
- разработка номинального состава бетонной смеси;
- проведение эксперимента;
- статистическая обработка результатов эксперимента;
- определить оптимальный состав бетонной смеси;
- исследовать влияние химических добавок на структуру бетона.

Предметом исследования данной работы являются плиты бетонные защитные гибкие универсальные ПБЗГУ-405.

Объект исследования магистерской диссертации – технология повышения морозостойкости дорожных бетонов.

Методы исследования – исследования качества инертных материалов проведены в соответствии с ГОСТ 30744–2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка», ГОСТ 31108–2020 «Цементы общестроительные. Технические условия», ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия», ГОСТ 8269.0–97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний», ГОСТ 8735–88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний», ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия».

Подбор состава и исследование свойств бетонной смеси осуществлялось в соответствии с ГОСТ 27006–19. «Бетоны. Правила подбора состава», ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам», ГОСТ 10060–2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости»

Исследование свойств мелкозернистого бетона проводилось в соответствии с ГОСТ 26633–2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые.

Технические условия», ГОСТ 25192–2012 «Бетоны. Классификация и общие технические требования», ГОСТ 12730.0–2020 «Бетоны. Общие требования к методам определения плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости».

Научная новизна диссертационной работы, заключается в получении оптимального состава дорожного бетона для ПБЗГУ-405.

Практическая значимость исследования состоит в применении железобетонными заводами состава дорожного бетона для ПБЗГУ-405.

Апробация и внедрение результатов работы.

По теме диссертационного исследования опубликована 1 статья:

Фуфыгин А.А. Область применения плит бетонных защитных гибких универсальных // Международный научный журнал «Вестник науки». 2023г. №6 (63) том 3. С. 1182-1185.

## **Глава 1 Обзор литературы. Постановка задач исследования**

### **1.1 Область применения плит бетонных защитных гибких универсальных**

Плиты бетонные защитные гибкие универсальные (далее по тексту ПБЗГУ), предназначены для защиты подводных переходов трубопроводов, при строительстве дорог, защиты опор мостов, укреплении берегов, защиты дна акваторий портов, дополнительной защиты кабельных трасс, прокладываемых через водные преграды, сооружения временных противопаводковых укреплений, защиты гребней плотин и дамб от размыва при переливе, сооружении каналов, канав и стоков, защиты дна отстойников и в других отраслях хозяйства.

«ПБЗГУ состоит из бетонных блоков, соединенных между собой монолитным искусственным или синтетическим канатом. По периметру гибких матов располагаются встроенные узлы крепления в виде дополнительных монтажных канатов (ДМК) и стальных закладных деталей, предназначенных для скрепления плит в единое покрытие.

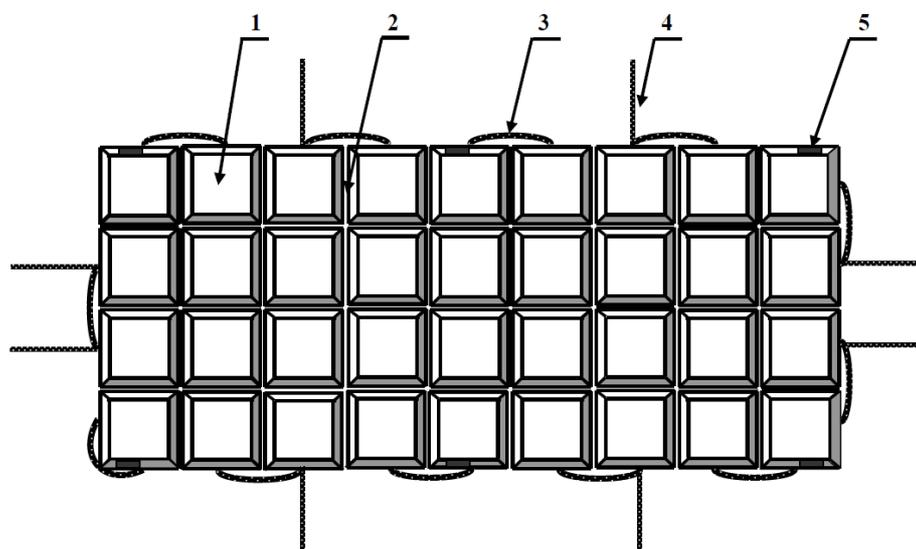
Бетонные блоки ПБЗГУ по форме представляют собой две усеченные пирамиды с окантовкой, проходящей через общее квадратное основание, изготавливаются из тяжелого бетона по ГОСТ 26633–2015. Прочность на сжатие должна соответствовать классу по прочности на сжатие не ниже В30. Марка бетона по морозостойкости должна соответствовать F<sub>2300</sub> по ГОСТ 10060–2012. Водонепроницаемость блоков из тяжелого бетона в соответствии с ГОСТ 26633–2015, должна быть не менее W8. Требования к качеству и внешнему виду одной из поверхности бетонного блока по ГОСТ 13015, категория А6» [17].

При изготовлении ПБЗГУ используется арматурный соединительный и дополнительный монтажные канаты. Соединительный канат обеспечивает сплочение бетонных блоков в единое поле. «Дополнительный монтажный

канат (ДМК) применяется для соединения ПБЗГУ между собой. ДМК представляет собой выпущенные из периферийных бетонных блоков канаты. В одной плите ПБЗГУ заключено 8 канатов. При монтаже дополнительные монтажные канаты близлежащих ПБЗГУ соединяются обжимной втулкой при помощи ручного гидравлического пресса» [17].

Материал, из которого выполнены канаты, должен быть устойчивым к воздействию ультрафиолетового излучения.

«Маты соединяются за закладные детали при помощи арматурной стали диаметром 10 мм, привариваемой к соседним закладным деталям. Они позволяют соединять ПБЗГУ между собой. Закладными деталями оснащаются все модели ПБЗГУ, и представляют собой забетонированные в периферийные блоки металлические элементы. В ПБЗГУ заключено от 4 до 6 закладных деталей» [17].



1 – бетонный блок; 2 – соединительный арматурный канат; 3 – строповочная (такелажная) петля; 4 – дополнительный монтажный канат; 5 – стальная закладная деталь

Рисунок 1 – Конструкция ПБЗГУ

Так как плиты бетонные защитные гибкие универсальные применяются в дорожном строительстве, то основным фактором, «определяющим долговечность цементного камня, является попеременное замораживание-оттаивание в присутствии водных растворов хлористых солей-антиобледенителей. Соответственно, для обеспечения высокой долговечности цементобетонных покрытий наиболее актуально получение бетона надёжной, гарантированной высокой морозостойкости и водонепроницаемости. Морозостойкость бетона характеризуют соответствующей маркой по морозостойкости F. Марка по морозостойкости F<sub>2</sub> обозначается для дорожных и аэродромных покрытий и бетона, эксплуатируемого при воздействии минерализованной воды» [17].

## **1.2 Технические требования и область применения дорожного бетона**

В сфере дорожного строительства широко применяются тяжелые бетоны. Этот материал используется для устройства цементобетонных покрытий на автомобильных дорогах и аэродромах, которые подвержены повышенным нагрузкам и требуют высокой долговечности. «В зависимости от предназначения, дорожный бетон подразделяется на несколько типов, в том числе бетон для монолитных покрытий, для верхнего и нижнего слоев двухслойных покрытий и для оснований усовершенствованных покрытий. При изготовлении этого материала основное внимание уделяется его прочности при сжатии, растяжении при изгибе, морозостойкости и истираемости» [13].

Чтобы гарантировать долговечность бетона, необходимо ограничить водоцементное отношение. При выборе состава дорожного бетона на основе заданных прочностных характеристик при изгибе, необходимо учитывать количество воздуха, вовлеченного в бетонную смесь. Это поможет определить необходимое В/Ц соотношение.

Таким образом, успешная эксплуатация цементобетонных покрытий на дорогах и аэродромах зависит от этапов производства - от выбора состава бетонной смеси до ее монтажа. Правильный выбор состава смеси в сочетании с ограничением водоцементного отношения и учетом вовлеченного воздуха в итоговую смесь поможет увеличить срок эксплуатации дорожных покрытий из цементобетона.

Рекомендации по снижению В/Ц отношения в бетонной смеси включают использование пластифицирующих и водоредуцирующих добавок. Основным эффектом пластифицирующих добавок – увеличение подвижности без снижения прочности на все сроки испытаний. Водоредуцирующие компоненты понижают водопотребление бетонной смеси. Зачастую, пластифицирующе-водоредуцирующие добавки именуется пластификаторами, не зависимо от основной цели их введения: пластифицирование или водоредуцирование.

Кроме использования совместных пластифицирующих и воздухововлекающих добавок ПАВ, чтобы снизить водопотребление бетонной смеси, рекомендуется также использовать чистый мелкий и крупный заполнители.

В России одной из главных задач на сегодняшний день является повышение долговечности дорожных бетонов в условиях агрессивного климата. «Попеременное замораживание-оттаивание в присутствии водных растворов хлористых солей-антиобледенителей является главным фактором, определяющим долговечность цементобетонных покрытий. Ключевым моментом в решении этой задачи является направленное регулирование системы дополнительных «резервных» пор и распределение оптимального количества воздушных пузырьков заданного размера в структуре цементного камня. Эта технология позволяет обеспечить бетон надежной, гарантированной высокой морозостойкости и водонепроницаемости» [13]. Таким образом, направленное регулирование системы пор и оптимальное распределение воздушных пузырьков являются важными методами

повышения долговечности дорожных бетонов в условиях агрессивного климата.

Значение марки по морозостойкости  $F$  является важным параметром для характеристики морозостойкости бетона. «Особое внимание уделяется марке по морозостойкости  $F_2$ , обозначающей морозостойкий бетон, используемый для дорожных и аэродромных покрытий, а также бетона, эксплуатируемого при воздействии минерализованной воды.  $F_2$  маркируется после проведения испытаний образцов, насыщенных 5-процентным водным раствором хлорида натрия» [12].

Для изготовления бетонных плит, необходимыми свойствами которых являются прочность и морозостойкость, применяются высококачественные исходные материалы (песок, щебень, цемент), а также пластифицирующие и воздухововлекающие добавки.

Рекомендуется использовать мягкий режим тепловлажностной обработки при изготовлении изделий с повышенными требованиями к морозостойкости. «Этот режим включает предварительное выдерживание не менее 3-5 часов, постепенный подъем температуры среды в камерах со скоростью не более  $10-15^{\circ}\text{C}$  в час и изотермическое выдерживание при температуре не выше  $70^{\circ}\text{C}$ , обеспечивающее получение бетоном максимальной прочности (в процентах от проектной). Охлаждение изделий с увлажнением их открытых поверхностей водой регулируемой температуры также рекомендуется. При извлечении изделий из форм и передаче их на склад необходимо соблюдать условие, чтобы перепад температуры между поверхностью изделия и окружающей средой не превышал  $40^{\circ}\text{C}$ » [33].

«Условия последующего твердения также сильно влияют на морозостойкость бетона, подвергнутого тепловлажностной обработке. Изделия из бетонов высокой марки по морозостойкости рекомендуется выдерживать в специальных камерах дозревания с высокой относительной влажностью среды или в водных бассейнах в любое время года не менее трех суток.

При возведении дорожных и аэродромных покрытий и оснований необходимо использовать цемент по ГОСТ Р 55224–2020 «Цементы для транспортного строительства. Технические условия» в качестве вяжущего в бетоне. Данный цемент должен содержать не более 7% трехкальциевого алюмината в клинкере и отвечать требованиям стандарта по определению сроков схватывания, нормальной густоты цементного теста и равномерности изменения объема по ГОСТ 30744–2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка».

В качестве мелкого заполнителя следует использовать кварцевый и полевошпатный природный песок, обогащенный и фракционированный в соответствии с ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия». Данный песок должен соответствовать требованиям относительно модуля крупности (не менее 2,0), содержания пылевидных, глинистых и илистых частиц (не более 2% по массе), при этом содержание глины в комках должно превышать 0,25% в соответствии с ГОСТ 26633–2015» [13].

При изготовлении бетонных конструкций наиболее распространенным материалом для заполнения его пор в строительстве является щебень, согласно ГОСТ 8267–93. Данный стандарт регулирует технические условия для использования щебня и гравия из плотных горных пород в строительных работах. Для получения качественного бетона необходимо соблюдать ряд условий, такие как наименьшая крупность щебня, которая не должна превышать 20 мм и содержание глины в комках, которое не должно превышать 0,25%. Кроме того, содержание зерен пластинчатой, игловатой формы не должно превышать 25% по массе, содержание пылевидных и глинистых частиц в щебне не должно превышать 2%. Необходимо также учитывать содержание зерен слабых пород, которое не должно превышать 10% по массе, а марка щебня должна быть не менее Др800 (ГОСТ 26633–2015) по дробимости. Кроме того, для обеспечения необходимой морозостойкости крупного заполнителя для бетона покрытий и оснований марки по морозостойкости должны соответствовать указанным в таблице 1 значениям.

Таблица 1 – Марки по морозостойкости крупного заполнителя

Назначение бетона	Марка по морозостойкости крупного заполнителя для бетона, эксплуатируемого в районе со среднемесячной температурой наиболее холодного месяца, не ниже		
	минус 5 °С	минус 15 °С	ниже минус 15 °С
Для покрытий	F50	F100	F150
Для оснований	F15	F25	F25

Однако, помимо материала для заполнения пор, также важную роль при изготовлении бетонных конструкций играет вода. Вода, используемая в производстве бетона, должна соответствовать требованиям ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия». Правильный подбор качественного материала обеспечивает долговечность и надежность бетонных конструкций.

Введение хлористых солей (NaCl, CaCl<sub>2</sub> и других) в бетонную смесь строго запрещено с целью ускорения твердения и для других целей. Бетон, предназначенный для дорожных покрытий, имеет существенные отличия от других бетонных растворов, поскольку подвергается «экстремальным» условиям эксплуатации. «Дорожное покрытие из бетона подвергается многочисленным механическим воздействиям и негативным погодным условиям, таким как циклическое замораживание и оттаивание, увлажнение и высыхание. По этой причине, любой класс бетона, предназначенный для строительства дорожных полотен, должен отличаться повышенной износостойкостью, механической прочностью, гибкостью, стойкостью к воздействиям влаги и перепадам температур, а также долговечностью» [14]. Технические характеристики и качество используемых материалов имеют огромное значение для получения такого бетона, и поэтому необходимы тщательный анализ и подбор составляющих.

### 1.3 Процессы гидратации и структурообразования при твердении цементов

В процессе твердения портландцемента происходят сложные физические и химические явления в неоднородной системе, которая формируется при взаимодействии цемента с водой. Портландцемент содержит ряд клинкерных минералов, каждый из которых взаимодействует с водой, образуя сложные гидратные фазы, которые могут взаимодействовать между собой и с исходными клинкерными минералами. Это усложняет процесс изучения гидратации и твердения портландцемента, а также точного определения состава новых образований.

Исследование Сайэча и Свенсона показало, что продукты гидратации портландцемента в интервале температур 25-50 °С практически не отличаются от продуктов гидратации индивидуальных клинкерных минералов, при условии их независимости друг от друга. Поэтому при изучении механизма гидратации цемента обычно рассматриваются процессы гидратации основных клинкерных минералов:  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4$ .

Таким образом, гидратация и твердение портландцемента являются многоэтапными процессами, включающими сложные физико-химические явления. Изучение этих процессов требует учета взаимодействия гидратных фаз и клинкерных минералов, а также определения состава новых образований.

Трехкальциевый силикат ( $C_3S$ ) – является важнейшей фазой портландцементного клинкера. Она определяет ход процесса твердения и нарастания начальной прочности цементного камня. Процесс гидратации  $C_3S$  был предметом многих исследований, что позволило нам понять механизм гидратации и гидратообразования с достаточной точностью.

Скорость процесса взаимодействия  $C_3S$  с водой изменяется со временем, что позволяет разделить этот процесс на пять периодов. Первый период начинается немедленно после затворения  $C_3S$  водой и длится около 4-5

минут. Этот период характеризуется адсорбцией воды зерном  $C_3S$  (3-4 мономолекулярных слоя) и одновременным растворением  $C_3S$  в количестве примерно одного молекулярного слоя. Это можно подтвердить высокой начальной скоростью выделения тепла.

Далее следует второй период, когда наблюдается прекращение растворения  $C_3S$  и начинается образование первичных гидратов. В третьем периоде происходит дальнейший рост гидратов, а в четвертом периоде - образование продуктов гидратации. Наконец, в пятом периоде наступает заключительный этап, когда закончившийся процесс гидратации вызывает конечное затвердевание цементного камня.

В целом изучение гидратации  $C_3S$  позволяет нам получить глубокие знания об основных процессах закрепления прочности цементного камня.

В работе проведен анализ жидкой фазы твердеющего  $C_3S$ , который позволил выяснить следующие особенности процесса твердения. В начальный период твердения отношение  $CaO/SiO_2$  в жидкой фазе равно 3, что свидетельствует о конгруэнтном растворении  $C_3S$ . В то же время, жидкая фаза насыщена по отношению к  $Ca(OH)_2$ , что может означать возможность частичной гетеролитической диссоциации  $C_3S$  адсорбированной водой. «Результаты исследований Кантро, Брунауэра и Вайса показали, что первичным продуктом при гидратации  $C_3S$  является фаза, молярное отношение  $CaO/SiO_2$  в которой приближается к 3. Эта фаза, будучи богатой известью гидратом состава  $3CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$ , сохраняется в течение 2–6 часов и высаживается в виде пленки на поверхность исходного зерна  $C_3S$ » [12].

Второй период реакции начинается через 6–10 минут после начала гидратации  $C_3S$  и характеризуется замедлением скорости гидратации - так называемым индукционным периодом. Следует отметить, что результаты анализа жидкой фазы твердеющего  $C_3S$ , в сочетании с данными об индукционном периоде, могут быть использованы для объяснения механизма гидратации  $C_3S$  и оптимизации процесса твердения. «Вопрос о причинах

возникновения индукционного периода остается пока неясным, однако высказываются следующие предположения:

- замедление наступает вследствие появления на поверхности зерна цемента пленки гидрата при достижении ею определенной толщины.
- замедление наступает вследствие "истощения" поверхностного слоя зерна  $C_3S$ , обладающего особой аморфизированной структурой, образующейся в результате механохимической активации при помоле минерала.
- замедление наступает в результате блокировки молекулами воды активных центров (мест с повышенной концентрацией дефектов кристалла  $C_3S$ ) [14].

В начальной фазе реакции гидратации  $C_3S$  реакция протекает медленно в течение 2-6 часов. Гидролиз  $C_3S$  под воздействием адсорбированной воды приводит к образованию гидросиликата кальция с общей формулой  $(0,8-1,5) CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$  вокруг первичных гидрантов. Внешний слой гидрата тоже подвергается гидролизу, образуя гидросиликат кальция с общей формулой  $1,6CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$ . В процессе гидролиза ионы  $Ca^{2+}$  и  $OH^-$  диффундируют в жидкую фазу. Этот процесс продолжается до тех пор, пока жидкая фаза не станет насыщенной.

Когда размер кристаллов метастабильного гидрата достигнет толщины образовавшейся гидратной оболочки, происходит переход к третьей стадии реакции, периоду ускорения. Гидратная оболочка становится проницаемой для молекул воды, свободно проникающих сквозь нее, ускоряя реакцию. Параллельно происходит образование нового наружного слоя гидратов через растворение. В дальнейшем метастабильный гидрат  $1,63CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$  превращается в тоберморитовый гель, состав которого  $(1,6-2,2) CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$ .

«К концу периода ускорения толщина слоя гидратов достигает примерно 2000 Å и процесс гидратации протекает с постоянной скоростью с

диффузионным контролем (IV период). Увеличение толщины слоя продуктов гидратации приводит к уменьшению коэффициентов диффузии, что вызывает замедление процесса (V период реакции)» [14].

При гидратации цементов могут протекать различные процессы, включая сквозьрастворный и топохимический механизмы. Многие исследователи, такие как Кондо, Даймон, Лохер и Рихартц, разработали схемы гидратации, которые хорошо соответствуют имеющимся данным. Людвиг предложил сквозьрастворную схему гидратации  $C_3S$ , которая была разработана на основе обширных литературных исследований.

Тем не менее, топохимический механизм гидратации был выдвинут И.П. Выродовым. Следует отметить, что сквозьрастворный и топохимический процессы гидратации могут протекать параллельно друг другу или чередоваться в различных периодах времени.

Говоря об окончательном продукте гидратации  $C_3S$ , стоит упомянуть работы О.П. Мчедлова-Петросяна и В.И. Бабушкина. Их термодинамические исследования показали, что в системе  $C_3S$  - вода могут образовываться такие соединения, как гиллебрандит, тоберморит, гиролит и окенит. Однако, следует учитывать, что образование этих гидратных фаз возможно только при достижении равновесия, что на практике практически нереализуемо.

Гидратация  $C_3S$  является сложным химическим процессом, в результате которого образуются гидросиликаты кальция. Важно отметить, что основность этих гидросиликатов может изменяться в течение процесса твердения. Кристаллические гидратные фазы, которые имеют соотношение  $CaO/SiO_2$  равное 1,8-2,0, образуются только при длительных сроках твердения.

Однако, гидросиликаты кальция с низкой основностью ( $CaO/SiO_2$  от 0,8 до 1,5) или высокой (например, гиллебрандит и фашагит) обладают более высокой прочностью, поэтому образование таких структурных составляющих является желательным. У этих гидросиликатов основность изменяется меньше в процессе твердения, что делает их более стабильными и благоприятными для

повышения прочности цементного камня. Важно учитывать, что изменение основности гидросиликатов кальция может снизить прочностные свойства цементных материалов.

По результатам исследования отмечается, что при процессе гидратации цементного зерна образуется первоначальный гидрат, который имеет отношение, равное 3. Однако уже через несколько часов происходит гидролиз гидросиликата  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ , и образуется гидросиликат  $(1,5-2)\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ . В этот момент гетеролитическая диссоциация  $\text{C}_3\text{S}$  происходит под пленкой первичных гидратов. Это приводит к образованию гидросиликатов состава  $(0,8-1,5)\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ , а также к выделению избытков  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , которые могут кристаллизоваться или взаимодействовать с ранее образовавшимися гидратами, повышая их основность.

В связи с вышеизложенным, следует отметить, что образующаяся при гидратации зерна цемента гидратная фаза распадается на три различные фазы: внутреннюю низкоосновную ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  0,8–1,5) фазу  $\text{C-S-H}$ , внешнюю высокоосновную ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  – 1,5–2,2) фазу  $\text{C-S-H}$  и фазу  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Эти фазы играют важную роль в процессе твердения цемента, поэтому для более глубокого исследования данной темы рекомендуется проведение дальнейших исследований.

При гидратации  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ , играющую роль определяют топохимические процессы, согласно данным Сычева, Казанской и Корнеевой. При взаимодействии с водой на зернах  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  происходит химическая адсорбция воды и образование пленки, являющейся промежуточным продуктом. Синхронно с этим конгруэнтно растворяется  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ . Далее происходит гидролиз промежуточного продукта с образованием гидросиликата кальция с соотношением  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ , равным 1,8–2,0. В состав гидросиликата, вероятно, входят кислые силикат-анионы  $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ , способные формировать водородные связи за счет конденсации силикатных анионов и усложняющие его состав. При гидратации  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  в условиях низкого водотвердого отношения формируется слабо закристаллизованный гидросиликат состава  $\text{C-S-H}$  (II) с

очень развитой поверхностью, гидрофильность которого обеспечивает его легкую адсорбцию воды.

При гидратации портландцементного клинкера основные алюмосодержащие фазы  $C_3A$  и  $C_4AF$  взаимодействуют с водой на начальных стадиях гидратации и относятся к наиболее гидравлически активным минералам клинкера. Существуют данные, указывающие на то, что процесс гидратации данных фаз происходит при сквозьрастворном механизме, при котором происходит растворение вяжущего и последующая его гидратация и кристаллизация гидратных новообразований из раствора.

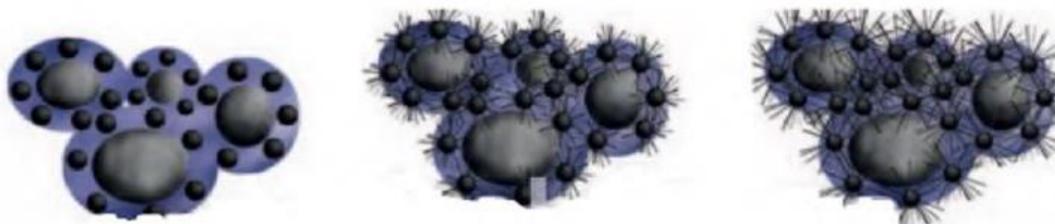
Новообразования при этом могут быть разных структур – игольчатой, пластинчатой или в форме фольги. При этом гидросиликаты кальция, образующиеся при гидратации  $C_3S$  и  $\beta-C_2S$  данного клинкера, могут быть классифицированы как гидросиликаты тоберморитовой группы. Они представлены двумя типами структур:  $C-S-H$  (I), имеющей вид деформированных лент, и  $C-S-H$  (II), обладающей волокнистой гофрированной структурой.

Таким образом, кристаллы продуктов гидратации данных фаз достаточно велики и хорошо оформлены благодаря свойствам сквозьрастворного механизма гидратации вяжущего.

При гидратации соединения  $C_3A$  происходит образование гидроалюминатов  $C_4AH_x$ , который могут иметь переменный или стабильный состав в зависимости от влажности и температуры окружающей среды. Кристаллическая структура этих гидратов представляет собой гексагональные пластины. Однако, метастабильные при переходе в более стабильный  $C_4AH_6$  под влиянием изменения уровня pH в жидкой фазе цемента или температуры, что вызывает изменение внутренней структуры портландцементного камня и ведет к снижению его прочности.

Для регулирования сроков схватывания в клинкер вводится некоторое количество гипса. Гипс способствует образованию гидросульфалюминатов кальция этtringита  $(3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O)$  и

моногидросульфоалюмината кальция ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ). Эту структуру характеризует игольчатая или призматическая гексагональная форма, а моногидросульфат образует гексагональные пластины.



а) Цемент с водой образует цементный клей вокруг зерен заполнителя

б) Цемент вступает в химическую реакцию с водой, из цементного клея образуются кристаллы

в) Кристаллизующиеся зерна цемента срастаются друг с другом и образуют цементный камень, который придает бетону необходимую прочность и долговечность.

Рисунок 2 – Структурообразование цементного камня

«По Н.Н. Круглицкому в понятие «структура твердого тела» входит строение пространственной сетки, состоящей из различных элементов образующих кинетических единиц, которая может быть правильной в истинно кристаллических телах или хаотической – в гелях, студнях, стеклах. Условия срастания и упаковки отдельных кристалликов определяют открытую (капиллярную) и замкнутую пористость. Распределение в твердом теле различных дефектов приобретает основные значения в границах деформаций предразрушающего состояния» [13].

«Различают несколько структурных составляющих цементного камня:

– кристаллическая структурная составляющая цементного камня представленная игольчатыми кристаллами гидросиликатов, призматическими кристаллами этtringита и портландита –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , а также гексагональными пластинами гидроалюминатов, гидроалюмоферритов, моносulfоалюмината кальция и  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ;

- полукристаллическая составляющая в виде тонких листков, скрученных и деформированных пластинок толщиной в несколько молекулярных слоев (фольга), по составу являющихся низкоосновными гидросиликатами кальция;
- аморфная фаза гидросиликатного состава (тоберморитовый гель), а также гели гидрата глинозема, кремниевой кислоты, гидроксида железа» [4].

Цементный камень в значительной мере зависит от степени дисперсности продуктов гидратации, что в свою очередь влияет на его клеящую способность. Повышение содержания гелеобразной фазы и степени гидратации продуктов гидратации увеличивает клеящую способность цементного камня. Согласно выражению Брунауэра, тоберморитовый гель является «сердцем цемента».

При высушивании цементного камня внутренняя удельная поверхность необратимо снижается, что в свою очередь снижает его прочностные и адгезионные свойства, кроме того, повышает хрупкость материала. Таким образом, специальный уход должен быть предпринят для твердеющего цементного камня, с целью предотвращения обезвоживания геля вследствие высушивания или миграции влаги во время замораживания и других неблагоприятных условий.

#### **1.4 Морозостойкость дорожного бетона**

Для расширения использования дорожного бетона и изделий из него морозостойкость бетона должна быть F<sub>2300</sub> или выше.

Морозостойкость является одним из важнейших показателей качества бетона и других строительных материалов и имеет особое значение для России в силу ее географических и климатических условий.

Проблемой морозостойкости бетона и методами ее определения занимались многие российские и зарубежные ученые. Большой вклад в

решение этих проблем внесли Р. Коллинз, В.И. Бабушкин, Г.И. Горчаков, О.В. Кунцевич, Б.Я. Трофимов, В.М. Москвин, А.М. Подбарный, В.В. Стольников, С.В. Шестоперов, А.Е.Шейкин, Л.М. Добшиц, О.Е. Власов, Т.К. Пауэрс и многие другие.

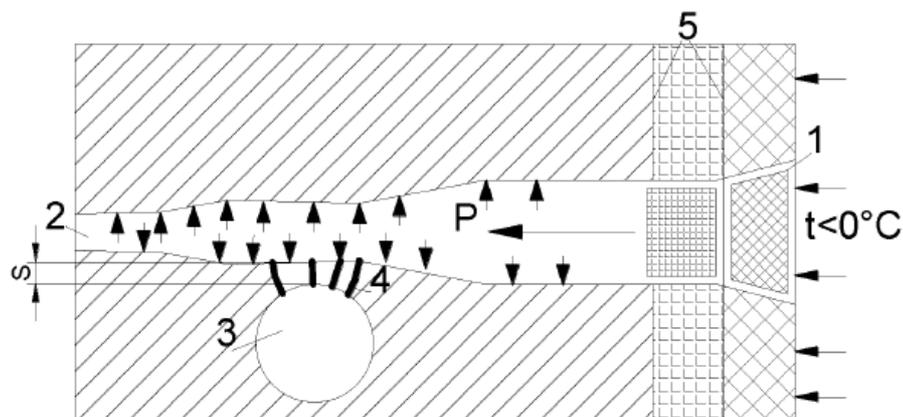
За марку морозостойкости бетона принимается максимальный цикл чередования замораживания и оттаивания, который может быть выдержан при снижении прочности на сжатие не более чем на 5% по сравнению с прочностью образцов, испытанных в сопоставимом возрасте на момент испытания, а для дорожного бетона – при снижении веса на 3% или менее.

Гипотеза, предложенная Р. Коллинзом в 1944 году, гласит, что разрушение бетона при замерзании происходит из-за накопления льда в его слоях и давления, оказываемого на стенки пор бетона растущими кристаллами льда. Кристаллы льда, образовавшиеся в более крупных порах, вступают в контакт с замерзшей водой в более мелких порах, заставляя их расти параллельно поверхности охлаждения. Образование льда создает растягивающие напряжения в бетоне, вызывая послойное разрушение.

В 1945 году Т.С. Пауэрс предложил гидравлическую теорию. Когда бетон, содержащий воду, замерзает, проникновение замерзания происходит от поверхности к внутренней части. По мере замерзания поверхностного слоя бетона в капиллярных отверстиях образуется лед, и наружу он попадает через ледяную пробку.

По мере того, как слой бетона, расположенный дальше от поверхности, охлаждается и новая порция воды замерзает, увеличивая свой объем на 9,07%, вода, которая еще не замерзла, оттесняется глубже в ненасыщенную область (рисунок 3). Когда движение воды встречает сопротивление тонкой, пористой структуры бетона, возникает давление воды, вызывающее внутренние напряжения в бетоне, который расширяется и разрушается. Вода из макроскопических капилляров медленно диффундирует через поры геля в пустоты, поэтому давление, необходимое для выталкивания воды из микроскопических капилляров, увеличивается по мере уменьшения диаметра

капилляра, увеличения длины капилляра и увеличения скорости замерзания. Медленное охлаждение может привести к росту кристаллов льда в крупных капиллярах из-за миграции не замерзшей жидкой фазы в порах геля.



1 – ледяная пробка; 2 – капилляр; 3 – воздушная пора; 4 – поры геля; 5 – фронт промерзания,  $s$  – фактор расстояния

Рисунок 3 – Схема возникновения гидравлического давления при замораживании

«В результате, гипотеза Т.С. Пауэрса предполагает две возможные причины разрушения бетона при замораживании:

- гидравлическое давление не замерзшей воды при быстром охлаждении;
- рост кристаллов льда в крупных капиллярах бетона при медленном охлаждении («сегрегация»)» [14].

Если в бетоне заключен воздух, то чем ближе пузырьки воздуха к опасным капиллярам, тем ниже давление воды и тем больше избыточной воды выталкивается из пор геля. Если пузырьки находятся достаточно близко к месту образования льда (по мнению Т.С. Пауэрса, этот «фактор расстояния»  $S$

недолжен превышать 0,0254 см), давление, необходимое для перемещения воды через поры геля, меньше прочности бетона на растяжение, и бетон не разрушится. Необходимый «фактор расстояния» достигается при захвате не менее 4–6% воздуха. Положительная роль захвата воздуха была подтверждена многими экспериментами: по данным Т.С. Пауэрса, морозостойкость бетона обычно основывается главным образом на степени насыщения водой порового пространства и капилляров (рисунок 4).

Критическое водонасыщение бетона считается равным 91,7% или менее, в зависимости от характера распределения воды в материале.

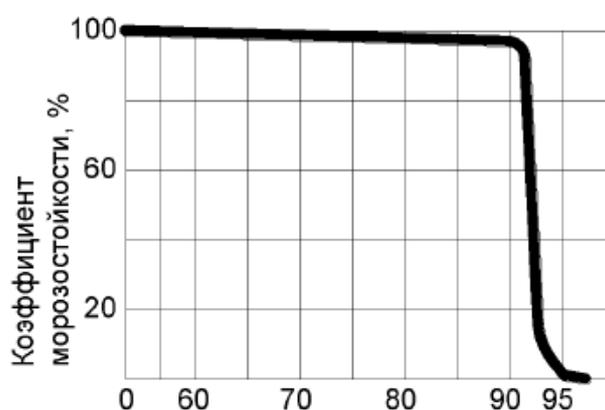


Рисунок 4 – Влияние степени насыщения пор бетона водой на его морозостойкость

В.М. Москвини, А.М. Подвальный интерпретировали разрушение бетона под давлением воды как развитие растягивающих касательных напряжений в стенках капилляров. Эти внутренние напряжения могут вызвать микротрещины в кристаллических гидратированных цементах и трещины в геле образных структурах при быстром охлаждении. Разрушение бетона – это постепенное накопление локальных микротрещин, которые коалесцируют и перерастают в крупные макротрещины, которые быстро развиваются, особенно когда резервные поры заполняются водой.

Гипотеза о гидростатическом давлении в замерзшей воде клеца была предложена П.Н. Кальтеревым и позднее развита Г.Г. Еремеевым. Лед,

образующийся в порах бетона, задерживает воду, которая не контактирует с наружным воздухом или другими порами. Когда часть попавшей в ловушку воды замерзает, ее объем увеличивается, а оставшаяся вода создает давление 150 – 170 МПа. Под таким давлением корпус, удерживающий воду, разрушается, вызывая трещины в прилегающих слоях бетона. Повторное замораживание приводит к образованию трещин и снижению прочности бетона.

«Ряд исследователей считают, что процесс разрушения бетона при циклическом замораживании в водонасыщенном состоянии усугубляется осмотическим давлением, возникающим в материале за счет разности концентрации ассоциированных молекул воды или солей. По данным О.Е. Власова, величина осмотического давления при – 10 °С составляет более 2 МПа» [33].

Г.Д. Дибров отметил, что бетон с наибольшим диапазоном изменения деформаций и внутреннего давления при многократном замораживании в сочетании с частичной сушкой и тепловым сжатием твердой фазы и льда, по-видимому, обладает наименьшей морозостойкостью.

Во время замораживания и оттаивания бетон испытывает термические напряжения и деформации, вызванные конденсацией и испарением воды и дальнейшей кристаллизацией льда в порах бетона.

При испарении воды из пористых материалов в капиллярах образуется мениск, который может возникать не только во время испарения, но и после достижения равновесного состояния. В последнем случае мениск удерживается только в капиллярах, кривизна поверхности которых соответствует упругости паров жидкости в воздухе. В структурных элементах поверхностного слоя возникают дополнительные растягивающие напряжения из-за капиллярных сил.

В зависимости от степени испарения воды капиллярное напряжение на поверхности конструкции может быть очень высоким. Если в бетоне остается большое количество воды, она может замерзнуть, и бетон может расширяться

под давлением, вызванным ростом кристаллов льда. Давление перераспределяется вовремя сушки и замораживания. Это давление почти полностью снижается вовремя смачивания.

Г.Г. Еремеев отметил, что в процессе замораживания в бетоне развиваются внутренние напряжения из-за разницы температур («тепловой удар», особенно при помещении замороженных образцов в горячую воду) и из-за большой разницы в коэффициентах теплового расширения цементной пасты ( $14\text{--}18 \cdot 10^{-6}$  1/град) и льда ( $50 \cdot 10^{-6}$  1/град). Кроме того, наиболее опасной фазой для бетона является фаза «оттаивания», когда лед, замерзший внутри материала, расширяется больше, чем окружающий его материал при нагревании до  $0^{\circ}\text{C}$ .

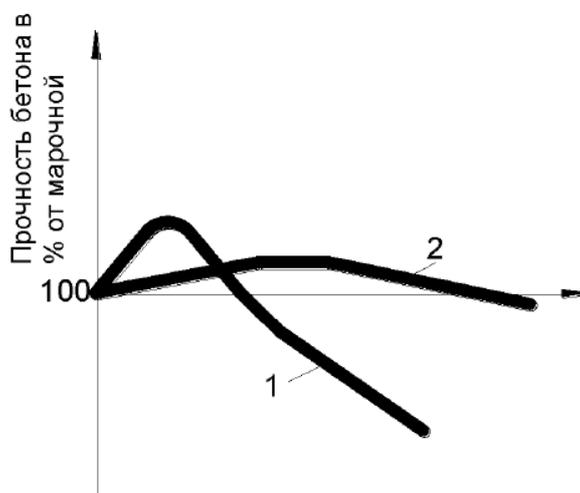
Замерзание жидкой фазы в зоне трещин действует как клин, одновременно образуя новую поверхность и снижая прочность бетонной пасты. При гидратации связующего выделяется новообразование с увеличением объема, которое предотвращает зажатие микротрещин при дегидратации и постепенно накапливает остаточную деформацию расширения при повторном замораживании. Положительный эффект равномерного распределения микропузырьков В.В. Стольников объясняет тем, что наличие сферических микрополостей на острых краях микротрещин снижает концентрацию напряжений.

«Дополнительными факторами, ускоряющими разрушение бетона при циклическом замораживании, являются:

- различие коэффициентов линейного термического расширения заполнителей, цементного камня и арматуры;
- кристаллизация при охлаждении растворенных в жидкой фазе соединений в виде кристаллогидратов с увеличением объема;
- наличие растягивающих напряжений, превышающих  $0,21$  предела прочности бетона на растяжение» [15].

При циклическом замораживании прочность бетона первоначально увеличивается и начинает снижаться через несколько циклов, и чем меньше

сопротивление бетона замораживанию, тем быстрее уменьшается момент набора прочности. График показан на рисунке 5.



1 – при высоком В/Ц; 2 – при низком В/Ц

Рисунок 5 – Характер изменение прочности бетона при циклическом замораживании

«По С.В. Шестоперову, бетоны будут в том случае высокой морозостойкости, если в них не протекают процессы замерзания вода или часть ее будет многократно превращаться в лед и вновь переходить в жидкое состояние без деструкции материала. Следовательно, для повышения морозостойкости бетона важно обеспечить минимальную капиллярную и определенную резервную пористость и сохранить в виде геля продукты гидратации цемента в процессе циклического замораживания. Последнее обеспечивается введением добавок ПАВ, режимом твердения, видом цемента и др. факторами» [32].

Таким образом, гидравлическая гипотеза Т.С. Пауэрса является наиболее обоснованной, ее современная форма позволяет объяснить многие экспериментальные данные и практически согласуется с другими гипотезами,

дополняющими ее Г.И. Горчаков, классифицирует виды разрушения от замораживания бетона следующим образом.

- Поверхностное расслаивание происходит в результате движения воды в бетоне к поверхности для охлаждения, что превращается в расслаивание.
- Разрыхление бетона сопровождается увеличением объема, водопоглощением и снижением прочности и модуля упругости. Быстрая (взрывная) релаксация бетона после 100–120 циклов замораживания-оттаивания может быть объяснена значительной усадкой мелкозернистого цементного раствора.
- Местное (локальное) разрушение бетона, вызванное расслоением бетонной смеси и попаданием в нее незамерзших заполнителей и комков глины.
- «Растрескивание бетона, сопровождающееся распадением его на отдельные куски. Происходит из-за дефектов, возникающих в бетоне при пропаривании при высоких В/Ц (более 0,55) у бетонов с высоким содержанием  $C_3A$  (10–14 %) в портландцементе или на ШПЦ с кислым граншлаком. Объясняется большой капиллярной пористостью бетона» [10].

«Одним из способов повышения морозостойкости бетона является целостный подход, который способствует направленному формированию структуры бетона и позволит получить бетон и изделия из него с лучшими эксплуатационными характеристиками. Все решения по предотвращению морозной деструкции бетона или ее существенному замедлению являются дорогостоящими, трудоемкими и поэтому, бетоны высокой морозостойкости можно получить, только решая задачу морозостойкости в комплексе и последовательно» [1].

## 1.5 Современные методики получения долговечного дорожного бетона

Одним из основных направлений технологического прогресса в строительном секторе является производство высококачественного и прочного бетона. Эта задача часто решается с помощью эффективных добавок с различными свойствами и механизмами действия. В развитых странах мира различные виды модификаторов используются в большинстве производимого бетона.

Терминология для бетона, модифицированного добавками, описана в действующем ГОСТ 24211–2008 и европейских стандартах EN 206–1 и EN 934–2 как объединение понятий и терминологии, необходимых для выбора наиболее подходящего состава и технического решения.

«Добавки, применяемые для модифицирования свойств бетонных смесей и бетонов:

- химическая добавка (admixture) компонент, добавляемый в процессе приготовления бетонной смеси в малых количествах — до 5 % по отношению к массе цемента с целью регулирования составов бетонной смеси или бетона;
- минеральная добавка (additive) тонкоизмельченный компонент, добавляемый в бетон в количестве до 30 % и выше от массы цемента с целью улучшения определенных или придания специальных свойств» [32].

«Химические добавки, обширны благодаря достижениям физической, коллоидной химии, химии высокомолекулярных соединений. фундаментальных наук номенклатура и области применения добавок. Как отмечено выше, прогресс в «химизации» бетона в значительной степени связан с использованием в качестве основного компонента добавок высокоэффективных пластифицирующего и водоредуцирующего действия. Возможные механизмы действия такого типа суперпластификаторов (СП)

обсуждены в работе. Анализ представлений о роли адсорбции ПАВ на зернах цемента и гидратных новообразованиях, сил электростатического и стерического отталкивания, взаимосвязи строения макромолекул со структурой и составом адсорбционных слоев не привел пока к однозначному толкованию достигаемых результатов.» [11] Вместе с тем можно признать общепринятой, хотя несколько виртуальной, схему действия СП, приведенную на рисунке 6.

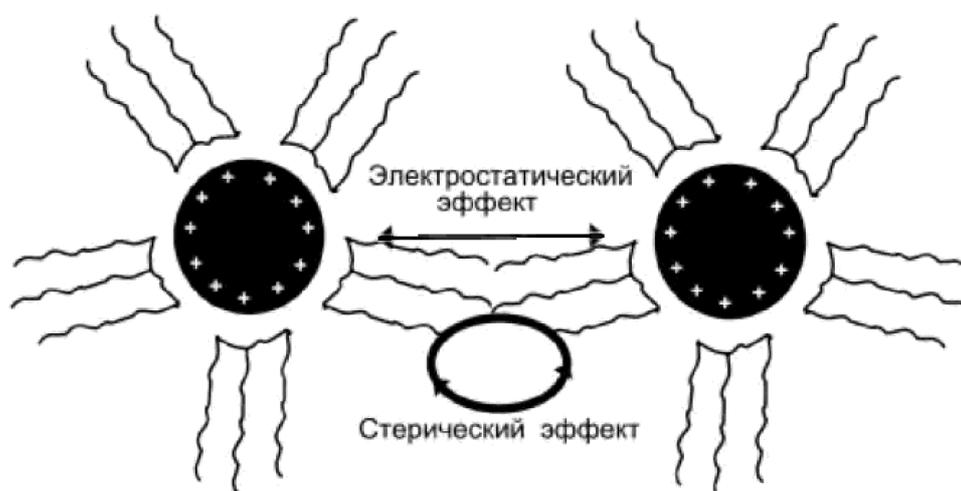


Рисунок 6 – Механизм действия суперпластификаторов

«Эффекты водоредуцирования, пластифицирования и сохранности показателей удобоукладываемости однозначно связываются с замедлением гидратации и низким темпом нарастания ранней прочности. Успешная попытка устранить или значительно ослабить замедляющее действие СП поликарбоксилатного типа реализована при решении задач технологии ЖБИ» [14].

На сегодняшний день наиболее эффективным является последнее поколение суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов, которое было разработано в 90-х годах 20 века и постоянно совершенствуется. Его отличие от разработанных до сих пор сверхтекучих жидкостей заключается в механизме действия. Нафталинформальдегид, меламинформальдегид и ЛСТМ характеризуются линейной формой своих молекул, которые адсорбируются в основном на гранулах

цемента и на водной фазе, которая имеет одинаковый электростатический заряд, отталкивает и диспергирует агрегаты цемента, тем самым оказывая значительный водоредуцирующий эффект. В этом случае молекулы полимера выравниваются вдоль гранул цемента, препятствуя доступу воды к минеральной поверхности клинкера, что приводит к значительно более медленной гидратации на ранних стадиях и отслоению цементно-водной суспензии.

«В отличие от вышеперечисленных модификаторов, суперпластификаторы на основе эфиров поликарбоксилатов (СЭП) прикрепляются к поверхности цементного зерна в основном точно и характеризуются пространственным строением молекулы с разветвленными боковыми цепями, что способствует более эффективной диспергации цементных флокул за счет стерического эффекта, а также позволяет обеспечить доступ воды к клинкерным минералам. Практически неограниченные возможности варьирования количества и длины боковых цепей позволяют создавать пластификаторы с контролируемой величиной адсорбции и пластифицирующего эффекта в зависимости от особенностей применяемого цемента и заполнителей, а также требований к бетонной смеси. Это делает суперпластификаторы на поликарбоксилатной основе наиболее перспективными модификаторами водоредуцирующего действия и открывает широкие горизонты их использования для получения высококачественных цементных композитов строительного назначения» [31].

«Эффективным способом повышения срока эксплуатации бетонных конструкций является гидрофобизация. Механизм действия гидрофобизирующих добавок состоит в том, что они при контакте с продуктами гидратации цемента осаждаются в виде мельчайших капелек на стенках мелких пор и капилляров, образуя гидрофобные покрытия. В результате этого возникает контакт, имеющий обратный угол, при котором силы поверхностного натяжения выталкивают воду из пор. Применение гидрофобизирующих добавок в цементных системах способствует формированию плотной и однородной структуры. Это выражается в уменьшении количества и размеров макропор (радиус пор менее 10 мкм), а

также в их более равномерном распределении в массе цементного камня. Количество макропор в цементных системах с добавками в 2–4 раза меньше, чем без добавочных систем» [15].

Гидрофобность достигается путем включения в бетон гидрофобных добавок. Однако разница между использованием гидрофобных и не гидрофобных добавок невелика.

Гидрофобные добавки включают в себя: парафин, стеариновую кислоту, соли кальция и соли нафтеновой кислоты. Когда эти вещества смешиваются с цементом, реакции не происходит, и они остаются механическими добавками.

Гидрофобные добавки включают различные нефтяные кислоты и не гидрофобные смолы. Поэтому они взаимодействуют с цементом, образуя гидрофобные вещества.

Гидрофобизация – распространенная техника в строительстве, которая имеет два основных вида: объемный и поверхностный. Объемная гидрофобизация отличается от поверхностной возможностью значительного повышения морозостойкости строительных материалов. Однако следует учитывать, что объемная гидрофобизация требует более высокого расхода дорогих гидрофобизаторов, чем поверхностная гидрофобизация – примерно на два порядка больше. Поэтому объемную гидрофобизацию следует проводить только для ответственных конструкций, эксплуатирующихся в тяжелых условиях агрессивного воздействия. Это могут быть различные строительные конструкции, такие как железобетонные мосты, бетонные конструкции тепловых электростанций, здания химических производств и другие объекты, которые подвергаются большим перепадам температур, повышенной кислотности и солевому воздействию.

Стоит отметить, что использование гидрофобизирующих добавок активно регулирует физико-технические свойства бетона на протяжении всего периода его эксплуатации. Добавки гидрофобного действия значительно улучшают характеристики бетона, делая его более прочным и долговечным. Это особенно важно для объектов, находящихся в условиях высокой

влажности и температурных перепадов, таких как мощения, фундаменты, стеновые панели и другие строительные элементы.

При использовании в сочетании с пластификаторами ингибиторы проникновения воздуха могут значительно повысить морозостойкость. Инфильтрация воздуха влияет на композиционные свойства раствора и бетона, а также растворо-бетонных смесей. Аэраторы, повышающие морозостойкость бетона, могут использоваться для эффективного и надежного производства бетона для автомагистралей, гидротехнических сооружений и других специализированных применений.

### **Выводы по первой главе**

Проведен анализ значения подбора составов бетонной смеси с маркой по морозостойкости F<sub>2300</sub>, ее актуальность, какие могут применяться материалы и способы повышения марки бетона. Данный анализ показал, что вопрос разработки методики подбора составов бетонных смесей является не новой, но не до конца изученной.

Благодаря литературному обзору подтверждена актуальность выбранной тематики, проведено сравнение различных методов повышения марки бетона по морозостойкости. Определена цель работы в оптимизации состава дорожного бетона для гибких бетонных плит ПБЗГУ-405 по морозостойкости с использованием высококачественных заполнителей и пластификаторов.

## Глава 2 Характеристики применяемых материалов и подбор состава бетонной смеси

### 2.1 Свойства и характеристики применяемых материалов

#### 2.1.1 Цемент

Портландцемент без минеральных добавок на основе клинкера нормированного состава ЦЕМ 0 42,5Н, производства ООО «Холсим (Рус)», Саратовская область, город Вольск, исследовался на выполнение требований ГОСТ 31108–2020 «Цементы общестроительные. Технические условия». Испытания образцов проводились согласно ГОСТ 30744–2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка». Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты испытаний цемента

Физико-механические показатели	Экспериментальное значение	Требования по ГОСТ 31108–2020 для ЦЕМ 0 42,5Н
Прочность образца в возрасте 2 суток: на растяжение, МПа на сжатие, МПа	4,3 24,7	Не нормируется Не менее 10
Прочность образца в возрасте 28 суток: на растяжение, МПа на сжатие, МПа	7,8 57,29	Не нормируется Не менее 42,5

Согласно исследованным показателям цемент отвечает классу по прочности 42,5Н в соответствии с требованиями ГОСТ 31108–2020.

Согласно протоколу лабораторных исследований производителя, содержание трех кальциевого алюмината  $C_3A$  в цементе составляет 7,3% от

массы, что соответствует требованиям ГОСТ 26633–2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия» для дорожных бетонов не более 8% от массы, активность цемента при пропаривании составляет 35 МПа, нормальная густота цементного теста – 29,2%.

### 2.1.2 Песок

Применяется камский речной песок, производства ООО «Казанские нерудные материалы», Республика Татарстан, г. Казань.

«Песок проверялся на соответствие требованиям ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия». Для песка определялись, модуль крупности, насыпная плотность, содержание пылевидных и глинистых частиц по методикам, представленным в ГОСТ 8735–88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний». Результаты испытаний приведены в таблицах 3–4.

Таблица 3 – Модуль крупности, полный остаток песка на сите 0,63 мм, содержание в песке гравия более 5 мм, содержание зерен крупностью свыше 10, 5 и менее 0,16 мм.

Наименование показателя	Фактическое значение	Требование ГОСТ 8736–2014	Вывод
Модуль крупности	2,7	Св.2,5 до 3,0	Группа песка – крупный
Полный остаток песка на сите 0,63 мм.	54,2%	45–65%	
Содержание гравия, более 5 мм.	4,3	Не более 10%	
Содержание зерен крупностью свыше 10 мм	3,5%	5%	
Содержание зерен крупностью свыше 5 мм	9,8%	15%	
Содержание зерен крупностью менее 0,16 мм	2,9%	15%	

Таблица 4 – Содержание пылевидных и глинистых частиц

Наименование показателя	Фактическое значение	Требование ГОСТ 8736–2014 п. 4.2.5	Вывод
Содержание пылевидных и глинистых частиц, в %	0,4	Не более 3%	Соответствует

Насыпная плотность песка в сухом состоянии  $Q_{\text{нас. сух.}} = 1669 \text{ кг/м}^3$ .

Согласно лабораторным протоколам испытания производителя истинная плотность песка составляет  $2,64 \text{ г/см}^3$ , влажность  $1,9 \%$ » [20].

Песок по исследованным показателям отвечает требованиям ГОСТ 8736–2014 «Песок для строительных работ. Технические условия».

### 2.1.3 Щебень

Применяется щебень смеси фракций от 5 до 20 мм из метаморфических горных пород (амфиболиты), производства ООО «Новокиевский щебеночный завод», Оренбургская область, поселок Новорудный.

Щебень проверялся на соответствие требованиям ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» по зерновому составу, марке по дробимости, содержанию пылевидных и глинистых частиц, содержанию зерен пластинчатой и игловатой формы, насыпной плотности. Также на соответствие требованиям ГОСТ 32703–2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Технические требования» по истираемости.

Методы испытаний представлены в ГОСТ 8269.0–97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний». Результаты испытаний приведены в таблицах 5–10.

Таблица 5 – Зерновой состав фракции от 5 до 20 мм

Наименование остатка	Остатки, % по массе, на ситах				
	25	20	12,5	5	Менее 5
Частный	0,4	8,54	66,44	24,38	0,24
Полный	0,4	8,94	75,38	99,76	100,0
Требования ГОСТ 8267–93 по полному остатку	До 0,5	До 10	От 30 до 80	От 90 до 100	100

Таблица 6 – Дробимость

Фракция, мм	Потеря массы, %		Марка по дробимости
	В щебне	Требование ГОСТ 8267–93 для осадочных и метаморфических пород	
Св. 5 до 20 мм	9,82	До 11 включительно	1200

Таблица 7 – Содержание пылевидных и глинистых частиц

Фракция, мм	Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	
	в щебне	Требование ГОСТ 8267–93
Св. 5 до 20 мм	1,00	Не более 1,00

Таблица 8 – Содержание глины в комках

Фракция, мм	Содержание глины в комках, %	
	в щебне	Требование ГОСТ 8267–93
Св. 5 до 20 мм	0	Не более 0,25

Таблица 9 – Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы

Фракция, мм	Содержание зёрен пластинчатой (лещадной) и игловатой форм, %		Группа щебня по ГОСТ 8267–93
	в щебне	Требование ГОСТ 8267–93	
Св. 5 до 20 мм	9,2	До 10 включительно	1

Таблица 10 – Марка по истираемости

Фракция, мм	Потеря массы, %		Марка по истираемости по ГОСТ 8267–93
	в щебне	Требование ГОСТ 8267–93	
Св. 5 до 20 мм	24,58	До 25	И1

Насыпная плотность щебня  $\rho_{\text{нас}} = 1500 \text{ кг/м}^3$ .

Щебень по исследованным показателям отвечает требованиям ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия».

Определение марки по морозостойкости щебня по ГОСТ 8269.0–97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний».

Результаты испытаний представлены в таблице 11.

Таблица 11 – Марка по морозостойкости (ускоренный метод)

Количество циклов ускоренным методом	Потеря массы, %		Марка по морозостойкости ГОСТ 8267–93
	в щебне	Требование ГОСТ 8267–93	
15	1,67	Не более 2	F300

«Щебень фракции св. 5 до 20 мм из метаморфических горных пород (амфиболиты) соответствует марке по морозостойкости F300 согласно требованиям ГОСТ 8267–93.

Устойчивость структуры щебня против распадов определялась на соответствие требованиям ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» проводилось по методике, представленной в ГОСТ 8269.0–97» [28]. Результаты испытаний представлены в таблице 12.

Таблица 12 – Устойчивость структуры щебня против распадов

Фракция, мм	Потеря массы при распаде, %	
	в щебне	Требование ГОСТ 8267–93 для щебня с маркой по дробимости 1000 и более
Св. 5 до 20 мм	1,49	Не более 3

Щебень из метаморфических горных пород (амфиболиты) отвечает требованиям ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» согласно испытаниям по устойчивости структуры.

Исследования крупного заполнителя на содержания вредных компонентов и органических примесей проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» применялись методики, представленные в ГОСТ 8269.1–97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы химического анализа». Результаты испытаний представлены в таблицах 13–14.

Таблица 13 – Вредные компоненты

Наименование вредных примесей	Содержание вредных примесей	
	Требования ГОСТ 8267–93, приложение А	Фактический показатель
Содержание аморфных разновидностей диоксида кремния, растворимых в щелочах, ммоль/л	Не более 50	43,56
Сера, сульфиды, кроме пирита (марказит, пирротин др.) и сульфаты (гипс, ангидрит и др.) в пересчете на SO <sub>3</sub> , % по массе:	Не более 1,5	0,15±0,10
Пирит в пересчете на SO <sub>3</sub> , % по массе	Не более 4	0,0
Слоистые силикаты (слюды, гидрослюды, хлориты и другие, являющиеся породообразующими минералами), % по объему:	Не более 15	10,2
Магнетит, гетит, гематит, апатит, нефелин, фосфорит, % по объему: – каждого из перечисленных породообразующих минералов – в сумме	Не более 10 Не более 15	0,0 0,0
Галоидные соединения (галит, сильвии и др., включая водорастворимые хлориды) в пересчете на ион хлора, % по массе:	Не более 0,1	0,072
Свободное волокно асбеста, % по массе	Не более 0,25	0,0
Уголь и древесные остатки, % по массе	Не более 1,0	0,0

Таблица 14 – Органические примеси

Наименование примесей	Содержание органических примесей	
	Допустимое по требованиям ГОСТ 33046–2014	Фактический показатель
Органические примеси	«Окраска раствора гидроксида натрия над пробой бесцветна или слабее эталонного раствора» [29]	Окраска слабее, чем у эталонного раствора

Щебень смеси фракций св. 5 до 20 мм из метаморфических горных пород соответствует требованиям ГОСТ 8267–93. Согласно лабораторным протоколам испытания производителя истинная плотность щебня составляет 2,8 г/см<sup>3</sup>, а содержание влаги – 3 %.

#### 2.1.4 Добавки

В исследованиях были применены суперпластификаторы:

- «ПОЛИПЛАСТ АЭРО»;
- «ПОЛИПЛАСТ ПК».

Воздухововлекающая добавка «ПОЛИПЛАСТ АЭРО» производства АО ГК «Полипласт», г. Москва, используется в тяжелых бетонах с целью получения бетона высокой морозостойкости. «В сочетании с суперпластификаторами добавку «ПОЛИПЛАСТ АЭРО» рекомендовано использовать при производстве бетонов дорожных, аэродромных покрытий и других бетонов, эксплуатирующихся в сложных условиях внешней среды.

Применение добавки в бетонных смесях позволяет: увеличить воздухововлечение в бетонную смесь на 2–6%; повысить удобоукладываемость бетонной смеси; получить бетоны с высокой морозостойкостью, в том числе в растворах солей. «ПОЛИПЛАСТ АЭРО» не содержит хлоридов и может применяться при изготовлении армированных и предварительно напряженных железобетонных конструкций, а также не содержит компонентов, приводящих к образованию аммиака в бетоне» [19].

Плотность раствора при 20°С 0,99 г/см<sup>3</sup>, концентрация 28 %. Согласно сертификату качества, соответствует ГОСТ 24211–2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия».

Универсальный суперпластификатор «ПОЛИПЛАСТ ПК» производства АО ГК «Полипласт», г. Москва. Химическая основа — поликарбоксилаты. «Добавка, применяемая в бетонах, способствует повышению прочности, морозостойкости и водонепроницаемости бетона, снижение времени предварительной выдержки перед термовлажностной обработкой, уменьшение длительности ТВО, снижение расхода цемента» [19].

Плотность раствора при 20°С 1,23 г/см<sup>3</sup>, концентрация 32 %. Согласно сертификату качества предприятия-изготовителя, добавка соответствует ГОСТ 24211–2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия».

## 2.2 Разработка состава бетонной смеси

Подбор состава бетонной смеси, на основе которого спланирован эксперимент, произведен согласно Методическому пособию «Рекомендации по подбору составов бетонных смесей для тяжелых и мелкозернистых бетонов».

Исходные данные для расчета состава бетонной смеси представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Исходные данные для расчета состава бетонной смеси

Показатель	Значение показателя	Нормативно–технический документ
1	2	3
Класс бетона по прочности на сжатие	B30	ГОСТ 26633–2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия»

Продолжение таблицы 15

1	2	3
Марка по водонепроницаемости	W10	ГОСТ 26633–2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия»
Марка по морозостойкости	F <sub>2300</sub>	ГОСТ 10060–2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости»

Расчет и подбор номинального состава.

«Цементно-водное (Ц/В)<sub>1</sub> отношение в начальном номинальном составе бетона, обеспечивающее получение заданного среднего уровня отпускной прочности:

$$(Ц/В)_1 = \frac{R_{\sigma}^{HЦ} + 0,37R_{ц}^{HЦ} + 3,22}{0,43R_{ц}^{HЦ} + 5,6}, \quad (1)$$

где  $R_{\sigma}^{HЦ}$  – прочность бетона после тепловой обработки, МПа;

$R_{ц}^{HЦ}$  – активность цемента при пропаривании,  $R_{ц}^{HЦ} = 35$  МПа.

$$R_{\sigma}^{HЦ} = 0,7 \cdot R_{тр}, \quad (2)$$

где  $R_{тр}$  – требуемая прочность бетона на сжатие, для класса бетона В30

при коэффициенте вариации  $v_{п} R_{тр} = 40$  МПа;

0,7 – отпускная прочность бетона после ТВО.

$$R_{\sigma}^{HЦ} = 0,7 \cdot 40 = 28 \text{ МПа.}$$

$$(Ц/В)_1 = \frac{28 + 0,37 \cdot 35 + 3,22}{0,43 \cdot 35 + 5,6} = 2,14.$$

Цементно-водное (Ц/В)<sub>2</sub> обеспечивающий заданный уровень прочности пропаренного бетона в проектном возрасте:

$$(Ц/В)_2 = \frac{R_{\sigma}^{28} - 0,06R_{ц}^{28} + 10}{0,24R_{ц}^{28} + 10}, \quad (3)$$

где  $R_{\sigma}^{28}$  – прочность бетона в возрасте 28 суток после тепловлажностной обработки,  $R_{\sigma}^{28} = 40$  МПа;

$R_{ц}^{28}$  – активность цемента после ТВО в возрасте 28 суток (принимают равной гарантированной марке цемента),  $R_{ц}^{28} = 42,5$  МПа.

$$(Ц/В)_2 = \frac{40 - 0,06 \cdot 42,5 + 10}{0,24 \cdot 42,5 + 10} = 2,35.$$

В последующих расчетах выбираем наибольшее значение (Ц/В), так как оно обеспечивает требуемую отпускную прочность и фактическую прочность бетона в возрасте 28 суток с завышением прочности до 10 %» [18].

Принимаем (Ц/В) = 2,35. Это значение соответствует минимальным требованиям (Ц/В) по ГОСТ 26633–2015.

При осадке конуса 10 см и более, необходимо использовать пластифицирующую добавку. Водопотребление бетонной смеси при осадке конуса 10–15 см и содержащих пластифицирующую добавку, составляет 170–185 л/м<sup>3</sup>. Примем значение  $V = 180$  л/м<sup>3</sup>.

Расход цемента (Ц) на 1 м<sup>3</sup> смеси:

$$Ц = \frac{Ц}{В} \cdot В, \quad (4)$$

$$Ц = 2,35 \cdot 180 = 423 \text{ кг/м}^3.$$

Абсолютный объем заполнителей:

$$V_3 = 1000 - \frac{В}{\rho_в} - \frac{Ц}{\rho_ц}, \quad (5)$$

где  $\rho_в, \rho_ц$  – плотность воды и цемента соответственно,  $\rho_в = 1$  кг/л,  $\rho_ц = 3,1$  кг/л.

$$V_3 = 1000 - \frac{180}{1} - \frac{423}{3,1} = 684 \text{ л.}$$

Количество мелкого заполнителя:

$$\Pi = V_3 \cdot r \cdot \rho_{\Pi}, \quad (6)$$

где  $\rho_{\Pi}$  – плотность зерен песка  $\rho_{\Pi} = 2,64 \text{ кг/л}$ ;

$r$  – доля песка в смеси заполнителей по абсолютному объему.

$$r = \frac{\Pi/\rho_{\Pi}}{\Pi/\rho_{\Pi} + \text{Щ}/\rho_{\text{Щ}}}, \quad (7)$$

где  $\text{Щ}$  – количество крупного заполнителя, кг;

$\rho_{\text{Щ}}$  – плотность зерен щебня,  $\rho_{\text{Щ}} = 2,8 \text{ кг/л}$ .

«Долю песка в начальном составе в зависимости от расхода цемента и наибольшей крупности заполнителя принимаем по таблице 4 методических рекомендаций к ГОСТ 27006 с учетом удобоукладываемости бетонной смеси и крупности щебня» [18]. Используя метод интерполяции, получаем значение  $r = 0,35$ .

При осадке конуса более 10 см доля песка увеличивается на 0,04, и еще на 0,03 при использовании пластификаторов. В результате доля песка в смеси заполнителей составит  $r = 0,42$ .

$$\Pi = 684 \cdot 0,42 \cdot 2,64 = 758 \text{ кг/м}^3.$$

Количество крупного заполнителя:

$$\text{Щ} = V_3 \cdot (1 - r) \cdot \rho_{\text{Щ}}, \quad (8)$$

$$\text{Щ} = 684 \cdot (1 - 0,42) \cdot 2,8 = 1111 \text{ кг/м}^3.$$

«Для придания дорожному бетону водоотталкивающих гидрофобных свойств и вовлечения воздуха для образования «резервных» пор введем воздухововлекающую добавку Полипласт АЭРО. Согласно рекомендациям предприятия-изготовителя вводится в количестве от 0,01% до 0,8% от массы цемента» [2]. Для начального состава примем значение 0,01%:

$$D_{вд} = 0,0001 \cdot 423 = 0,04 \text{ кг/м}^3.$$

Согласно рекомендациям производителя пластификатор на поликарбоксилатной основе Полипласт ПК вводится в количестве от 0,5% до 1,5% от массы цемента. Для начального состава примем значение 0,7%:

$$D_{пд} = 0,007 \cdot 423 = 2,96 \text{ кг/м}^3.$$

Абсолютный объем заполнителей пересчитывается по формуле:

$$V_{з1} = 1000 - \frac{В}{\rho_в} - \frac{Ц}{\rho_ц} - \frac{D_{вд}}{\rho_{вд}} - \frac{D_{пд}}{\rho_{пд}}, \quad (9)$$

где  $\rho_{вд}, \rho_{пд}$  – плотность растворов пластифицирующей и воздухововлекающей добавок соответственно,  $\rho_{вд} = 1,0 \text{ кг/л}$ ,  $\rho_{пд} = 1,05 \text{ кг/л}$ .

$$V_{з1} = 1000 - \frac{180}{1} - \frac{423}{3,1} - \frac{0,04}{1} - \frac{2,96}{1,05} = 680 \text{ л.}$$

Количество мелкого и крупного заполнителя пересчитывается по формулам (6) и (8) соответственно:

$$П_1 = 680 \cdot 0,42 \cdot 2,64 = 754 \text{ кг/м}^3.$$

$$\text{Щ}_1 = 680 \cdot (1 - 0,42) \cdot 2,8 = 1104 \text{ кг/м}^3.$$

Расчетная плотность бетонной смеси:

$$\rho_{\text{см}} = \text{Ц} + \text{П} + \text{Щ} + D_{\text{вд}} + D_{\text{пд}}, \quad (10)$$

$$\rho_{\text{см}} = 423 + 754 + 1104 + 0,04 + 2,96 = 2284 \text{ кг/м}^3.$$

Номинальный состав на м<sup>3</sup> бетонной смеси, кг:

$$\text{Ц} = 423;$$

$$\text{П} = 754;$$

$$\text{Щ} = 1104;$$

$$D_{\text{вд}} = 0,04;$$

$$D_{\text{пд}} = 2,96;$$

$$B = 180.$$

### 2.3 Выбор факторов и интервалов варьирования

«Для минимизации количества опытов необходимо подобрать такие факторы, с помощью которых возможно повлиять на свойства бетона и бетонной смеси. Для того чтобы выбрать факторы и интервалы варьирования эксперимента, необходимо определиться с исследуемыми свойствами бетона. Исследуемые свойства дорожного бетона представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Исследуемые свойства дорожного бетона

Исследуемое свойство	Обозначение исследуемого свойства
1	2
Прочность бетона при сжатии	Y <sub>1</sub>

Продолжение таблицы 16

1	2
Марка по морозостойкости	$Y_2$
Марка по водонепроницаемости	$Y_3$

Наиболее существенное влияние на исследуемые свойства бетона с пластифицирующими добавками оказывают следующие факторы: водоцементное отношение, количество цемента, соотношение по массе между песком и щебнем и количество пластифицирующей добавки.

Перечень факторов и интервалов варьирования приведен в таблице 17.

Таблица 17 – Факторы и интервалы варьирования

Фактор	Обозначение фактора	Основной уровень	Интервал варьирования
Масса цемента, кг	$X_1$	423	50
Соотношение воды к цементу бетонной смеси	$X_2$	0,43	0,03
Соотношение по массе между песком и щебнем	$X_3$	0,68	0,05
Количество пластифицирующей добавки, % от массы цемента	$X_4$	0,7	0,05

Интервалы варьирования устанавливают в зависимости от пределов рационального колебания факторов, а также с учетом границ, определяемых для выбранных факторов нормативно-технической документацией» [18].

## 2.4 Выбор плана и условий проведения эксперимента

«Согласно матрице планирования, представленной в таблице 18, предполагается четырехфакторный эксперимент с количеством опытов  $N=16$ .

Таблица 18 – Матрица планирования для четырехфакторного эксперимента

№ опыта		$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
N	1	+1	+1	+1	+1
	2	+1	+1	+1	-1
	3	+1	+1	-1	+1
	4	+1	+1	-1	-1
	5	+1	-1	+1	+1
	6	+1	-1	+1	-1
	7	+1	-1	-1	+1
	8	+1	-1	-1	-1
	9	-1	+1	+1	+1
	10	-1	+1	+1	-1
	11	-1	+1	-1	+1
	12	-1	+1	-1	-1
	13	-1	-1	+1	+1
	14	-1	-1	+1	-1
	15	-1	-1	-1	+1
	16	-1	-1	-1	-1
n <sub>0</sub>	17	0	0	0	0
	18	0	0	0	0
	19	0	0	0	0
	20	0	0	0	0

При проведении экспериментов в соответствии с выбранным планом опыты в нулевых точках, необходимые для вычисления ошибки воспроизводимости, были равномерно распределены между всеми остальными опытами» [23].

Матрица планирования для четырехфакторного эксперимента в натуральном выражении представлена в таблице 19.

Таблица 19 – Матрица планирования для четырехфакторного эксперимента в натуральном выражении

№ опыта		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>
N	1	473	0,46	0,73	0,75
	2	473	0,46	0,73	0,65
	3	473	0,46	0,63	0,75
	4	473	0,46	0,63	0,65
	5	473	0,40	0,73	0,75
	6	473	0,40	0,73	0,65
	7	473	0,40	0,63	0,75
	8	473	0,40	0,63	0,65
	9	373	0,46	0,73	0,75
	10	373	0,46	0,73	0,65
	11	373	0,46	0,63	0,75
	12	373	0,46	0,63	0,65
	13	373	0,40	0,73	0,75
	14	373	0,40	0,73	0,65
	15	373	0,40	0,63	0,75
	16	373	0,40	0,63	0,65
n <sub>0</sub>	17	423	0,43	0,68	0,7
	18	423	0,43	0,68	0,7
	19	423	0,43	0,68	0,7
	20	423	0,43	0,68	0,7

Таблица 20 – Методики испытания образцов по исследуемым свойствам

Исследуемое свойство	НТД с методикой испытания
1	2
Прочность бетона при сжатии (28 сут)	ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам»

## Продолжение таблицы 20

1	2
Марка по морозостойкости	Ускоренный метод по ГОСТ 10060–2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости»
Марка по водонепроницаемости	ГОСТ 12730.5–2018 «Бетоны методы определения водонепроницаемости»

Испытания проводились по каждому исследуемому свойству для каждого опыта в соответствии с методиками нормативно-технической документации (таблица 20).

### **Выводы по второй главе**

Были описаны применяемые инертные материалы, методы контроля качества и проведены исследования на соответствие их паспортам и сертификатам предприятий-изготовителей.

Были рассмотрены нормативные документы, по которым будет проведен эксперимент. В данной главе представлены расчеты и подбор номинального состава бетона. Также выбраны факторы и интервалы варьирования. Определены план и условия проведения эксперимента.

## Глава 3 Проведение и обработка результатов испытаний

### 3.1 Расчет всех составов бетонной смеси

Все номинальные составы бетонной смеси для проведения экспериментов указаны в таблице 21. Расчет воздухововлекающей добавки  $D_{вд}$  – 0,01 % от массы цемента. Перерасчет расхода песка и щебня произведен по формулам (6), (8), (9).

Таблица 21 – Номинальные составы для каждого опыта на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси

№ опыта	Ц, кг	П, кг	Щ, кг	$D_{пл}$ , кг	$D_{вд}$ , кг	В, л
1	473	694	1052	3,55	0,047	218
2	473	695	1053	3,07	0,047	218
3	473	694	1052	3,55	0,047	218
4	473	695	1053	3,07	0,047	218
5	473	726	1100	3,55	0,047	189
6	473	727	1101	3,07	0,047	189
7	473	726	1100	3,55	0,047	189
8	473	727	1101	3,07	0,047	189
9	373	782	1184	2,80	0,037	172
10	373	782	1185	2,42	0,037	172
11	373	782	1184	2,80	0,037	172
12	373	782	1185	2,42	0,037	172
13	373	807	1223	2,80	0,037	149
14	373	808	1224	2,42	0,037	149
15	373	807	1223	2,80	0,037	149
16	373	808	1224	2,42	0,037	149
17	423	754	1104	2,96	0,042	180
18	423	754	1104	2,96	0,042	180
19	423	754	1104	2,96	0,042	180
20	423	754	1104	2,96	0,042	180

«Для проведения эксперимента необходимо рассчитать рабочие составы бетонных смесей, это значит произвести перерасчет количества заполнителей с учетом их влажности, а также количество воды с учетом свойств вводимой химической добавки» [6]. Перерасчет произведен согласно Методическому пособию [18] по формулам (11) – (17). Результаты корректировки песка, щебня и воды представлены в таблице 22.

Содержание воды в заполнителях:

$$V_{\text{п}} = \text{П} \cdot \frac{\omega_{\text{п}}}{100}, \quad (11)$$

$$V_{\text{щ}} = \text{Щ} \cdot \frac{\omega_{\text{щ}}}{100}, \quad (12)$$

где  $\omega_{\text{п}}$ ,  $\omega_{\text{щ}}$  – влажность песка и щебня,  $\omega_{\text{п}} = 1,9\%$ ,  $\omega_{\text{щ}} = 3\%$ .

Действительный расход воды:

$$V_{\text{д}} = V - V_{\text{п}} - V_{\text{щ}}, \quad (13)$$

Корректировка расхода песка и щебня:

$$\text{П}_{\text{д}} = \text{П} + V_{\text{п}}, \quad (14)$$

$$\text{Щ}_{\text{д}} = \text{Щ} + V_{\text{щ}}, \quad (15)$$

Корректировка воды с учетом воды, находящаяся в растворе добавки:

$$D_{\text{д}} = \frac{\text{Ц} \cdot D}{C \cdot \rho}, \quad (16)$$

где  $C$  – концентрация раствора добавки, %;

$\rho$  – плотность добавки, г/см<sup>3</sup>.

Окончательное количество воды:

$$V_{\text{дд}} = V_{\text{д}} - D_{\text{д пл}} \cdot \left(1 - \frac{C_{\text{пл}}}{100}\right) - D_{\text{д воз}} \cdot \left(1 - \frac{C_{\text{воз}}}{100}\right), \quad (17)$$

Таблица 22 – Скорректированные значения расходов песка, щебня и воды на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси

№ опыта	V <sub>п</sub> , л	V <sub>щ</sub> , л	V <sub>д</sub> , л	П <sub>д</sub> , кг	Щ <sub>д</sub> , кг	D <sub>д пл</sub> , кг	D <sub>д воз</sub> , кг	V <sub>дд</sub> , л
1	13,2	31,6	173,3	707	1084	9,0	0,2	167
2	13,2	31,6	173,2	708	1085	7,8	0,2	168
3	13,2	31,6	173,3	707	1084	9,0	0,2	167
4	13,2	31,6	173,2	708	1085	7,8	0,2	168
5	13,8	33,0	142,2	740	1133	9,0	0,2	136
6	13,8	33,0	142,2	741	1134	7,8	0,2	137
7	13,8	33,0	142,2	740	1133	9,0	0,2	136
8	13,8	33,0	142,2	741	1134	7,8	0,2	137
9	14,9	35,5	121,6	797	1220	7,1	0,1	117
10	14,9	35,6	121,6	797	1221	6,2	0,1	117
11	14,9	35,5	121,6	797	1220	7,1	0,1	117
12	14,9	35,6	121,6	797	1221	6,2	0,1	117
13	15,3	36,7	97,0	822	1260	7,1	0,1	92
14	15,4	36,7	96,9	823	1261	6,2	0,1	93
15	15,3	36,7	97,0	822	1260	7,1	0,1	92
16	15,4	36,7	96,9	823	1261	6,2	0,1	93
17	14,3	33,1	132,6	768	1137	7,5	0,2	127
18	14,3	33,1	132,6	768	1137	7,5	0,2	127
19	14,3	33,1	132,6	768	1137	7,5	0,2	127
20	14,3	33,1	132,6	768	1137	7,5	0,2	127

Таблица 23 – Рабочие составы на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси для каждого опыта

№ опыта	Ц, кг	П, кг	Щ, кг	Д <sub>п</sub> , кг	Д <sub>в</sub> , кг	В <sub>дд</sub> , л	ρ <sub>см</sub> , кг/м <sup>3</sup>
1	473	707	1084	3,55	0,047	167	2435
2	473	708	1085	3,07	0,047	168	2437
3	473	707	1084	3,55	0,047	167	2435
4	473	708	1085	3,07	0,047	168	2437
5	473	740	1133	3,55	0,047	136	2486
6	473	741	1134	3,07	0,047	137	2488
7	473	740	1133	3,55	0,047	136	2486
8	473	741	1134	3,07	0,047	137	2488
9	373	797	1220	2,80	0,037	117	2510
10	373	797	1221	2,42	0,037	117	2510
11	373	797	1220	2,80	0,037	117	2510
12	373	797	1221	2,42	0,037	117	2510
13	373	822	1260	2,80	0,037	92	2550
14	373	823	1261	2,42	0,037	93	2552
15	373	822	1260	2,80	0,037	92	2550
16	373	823	1261	2,42	0,037	93	2552
17	423	768	1137	2,96	0,042	127	2458
18	423	768	1137	2,96	0,042	127	2458
19	423	768	1137	2,96	0,042	127	2458
20	423	768	1137	2,96	0,042	127	2458

После перерасчета расхода материалов рабочих составов, производят испытания образцов по каждому исследуемому свойству.

### 3.2 Проведение эксперимента

Испытания проводились в аттестованной лаборатории «Центральная строительная лаборатория» по каждому исследуемому свойству для каждого опыта в соответствии с методиками нормативно-технической документации.

Для проведения исследований на морозостойкость бетонных образцов был выбран третий ускоренный метод. «В соответствии с этим методом перед началом испытаний образцы были насыщены 5% водным раствором хлорида натрия, а процесс размораживания также проводился в этом растворе. Испытания проводились при использовании морозильной установки, которая была охлаждена до температуры  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Режим замораживания образцов в камере был установлен следующим образом: начальная температура загрузки образцов составляла  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , затем за 2-3 часа температура была понижена до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при этой температуре образцы находились в камере в течение 2-3 часов, после чего температура повышалась до  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 1-2 часов» [7]. Образцы оттаивали в течение 2-3 часов после окончания цикла замораживания.

«Хорошая морозостойкость бетона является важным фактором при выборе строительных материалов для использования в холодных климатических условиях. Проведение таких исследований позволяет установить насколько стойким является материал к поражению морозом и какие изменения происходят в его структуре и свойствах в холодных условиях. Выбранный третий ускоренный метод является достаточно распространенным и позволяет проводить анализ морозостойкости материала в условиях, близких к реальным, в короткие сроки» [5].

Экспериментальные исследования показали, что быстрое глубокое охлаждение образцов в растворе с последующим оттаиванием при температуре  $(18 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 2-3 часов приводит к быстрому разрушению бетонного камня. Также было установлено, что одинаковый уровень разрушения образцов с морозостойкостью F300 достигается после 300 циклов замораживания и оттаивания при использовании основного метода испытаний, в то время как для низкотемпературного метода достаточно 37 циклов.

В соответствии с принципами испытания на морозостойкость бетона, через 2-4 часа после определенного количества циклов замораживания-

оттаивания образцы извлекают из ванны для дальнейшей проверки. Они должны быть осмотрены, взвешены и подвергнуты испытанию на сжатие. «Для определения того, соответствует ли показатель морозостойкости бетона требуемому (проектному) показателю, средняя прочность серии образцов фундамента должна быть сравнена со средней прочностью на сжатие серии контрольных образцов.

В том случае, если среднее значение прочности серии основных образцов бетона после промежуточных циклов замораживания и оттаивания будет меньше среднего значения прочности на сжатие серии контрольных образцов более чем на 5%, то испытание следует прекратить марку строительного раствора по морозостойкости считать не соответствующей требуемой. Марку бетона по морозостойкости принимают за соответствующую требуемой, если среднее значение прочности на сжатие основных образцов, после установления для данной марки числа циклов замораживания и оттаивания уменьшилось менее чем на 5%, по сравнению со средним значением прочности на сжатие контрольных образцов» [7].

Результаты испытаний по всем исследуемым свойствам представлены в таблице 24.

Таблица 24 – Результаты испытаний по исследуемым свойствам

№ опыта	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>
1	2	3	4
1	35,6	26	12
2	35,3	32	12
3	34,3	34	12
4	35,1	29	12
5	36,7	30	12
6	39,2	37	12
7	40,8	37	12
8	41,2	41	12

Продолжение таблицы 24

1	2	3	4
9	36,4	25	10
10	35,7	28	10
11	36,1	37	8
12	33,8	37	8
13	33,9	34	10
14	34,5	35	10
15	35,0	29	10
16	33,7	31	10
17	35,7	29	10
18	35,9	30	10
19	37,1	28	10
20	36,5	29	10

Полученные результаты экспериментов по каждому исследуемому свойству подлежат статистической обработке, путем составлений уравнений зависимости исследуемых свойств в алгебраическом виде.

### 3.3 Статистическая обработка результатов эксперимента

«Результаты опытов обрабатывают методами математической статистики, получая уравнения в алгебраическом виде, выражающие зависимости исследуемых свойств бетона от исходных факторов» [18].

Для четырехфакторного эксперимента общее уравнение представляется в виде полинома:

$$Y_i = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{14}X_1X_4 + b_{23}X_2X_3 + b_{24}X_2X_4 + b_{34}X_3X_4, \quad (18)$$

где  $Y_i$  – исследуемое свойство бетона;

$X_i$  – исходные факторы;

$b_i, b_{ij}$  – коэффициенты, которые вычисляются по формулам (19) – (21);

$i, j = 1, 2, \dots$  – порядковые номера факторов.

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N \bar{y}_u}{N}, \quad (19)$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \cdot \bar{y}_u}{N}, \quad (20)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} \cdot X_{ju} \cdot \bar{y}_u}{N}, \quad (21)$$

где  $\bar{y}_u$  – среднее значение исследуемого свойства бетона в  $u$ -м опыте;

$X_{iu}$  – значение фактора  $X_i$  в  $u$ -м опыте;

$X_{ju}$  – значение фактора  $X_j$  в  $u$ -м опыте;

$N$  – количество опытов по плану,  $N = 16$ .

Рассчитаем коэффициенты  $b_i$  и  $b_{ij}$  для всех исследуемых свойств с учетом знаков факторов согласно матрице планирования (таблица 25).

Таблица 25 – Коэффициенты  $b_i$  и  $b_{ij}$  для исследуемых свойств

Коэффициенты	Исследуемые свойства		
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
1	2	3	4
$b_0$	36,081	32,625	10,75
$b_1$	1,194	0,625	1,25
$b_2$	-0,794	-1,625	-0,25
$b_3$	-0,169	-1,75	0,25
$b_4$	0,0188	-1,125	0
$b_{12}$	-1,406	-1,375	0,25
$b_{13}$	-0,406	-0,25	-0,25

Продолжение таблицы 25

1	2	3	4
$b_{14}$	-0,444	-0,375	0
$b_{23}$	0,631	-1,5	0,25
$b_{24}$	0,294	0,625	0
$b_{34}$	-0,281	-1	0

«Для каждого исследуемого свойства составим уравнение по формуле (18), описывающее его зависимость от выбранных факторов. Коэффициенты  $b_i$  и  $b_{ij}$  равные нулю в построении уравнения не участвуют» [18].

Уравнение прочности бетона на сжатие:

$$Y_1 = 36,081 + 1,194X_1 - 0,794X_2 - 0,169X_3 + 0,0188X_4 - 1,406X_1X_2 - 0,406X_1X_3 - 0,444X_1X_4 + 0,631X_2X_3 + 0,294X_2X_4 - 0,281X_3X_4, \quad (22)$$

Уравнение морозостойкости бетона:

$$Y_2 = 32,625 + 0,625X_1 - 1,625X_2 - 1,75X_3 - 1,125X_4 - 1,375X_1X_2 - 0,25X_1X_3 - 0,375X_1X_4 - 1,5X_2X_3 + 0,625X_2X_4 - X_3X_4, \quad (23)$$

Уравнение водонепроницаемости бетона:

$$Y_2 = 10,75 + 1,25X_1 - 0,25X_2 + 0,25X_3 + 0,25X_1X_2 - 0,25X_1X_3 + 0,25X_2X_3, \quad (24)$$

После составления уравнений, описывающих зависимости от выбранных факторов, производят оценку полученных результатов.

### 3.4 Оценка достоверности полученных результатов

«Для оценки достоверности полученных результатов необходимо произвести проверку пригодности уравнений (22) – (24) для описания исследуемых зависимостей по критериям Стьюдента и Фишера.

По результатам опытов в нулевых точках вычисляется ошибка воспроизводимости, т.е. когда все факторы удерживаются на одних и тех же уровнях, но имеют различные величины в силу статистической обусловленности эксперимента. Для этого определим следующие показатели.

Среднее арифметическое значение:

$$\bar{Y}_0 = \frac{\sum_1^{n_0} Y_{0u}}{n_0}, \quad (25)$$

Дисперсия ошибки:

$$S_{\bar{y}}^2 = S_0^2 = \frac{\sum_1^{n_0} (\bar{Y}_0 - Y_{0u})^2}{n_0 - 1}, \quad (26)$$

Среднее квадратическое отклонение, характеризующее ошибку опыта:

$$S_{\bar{y}} = S_0 = \sqrt{S_0^2}, \quad (27)$$

Средняя квадратическая ошибка коэффициентов:

$$S\{b_i\} = \frac{S_{\bar{y}}}{\sqrt{N}}, \quad (28)$$

где  $Y_{0u}$  – значение исследуемого свойства бетона в нулевой точке в  $u$ -м опыте;

$n_0$  – число опытов в нулевой точке (число повторных опытов);

$N$  – число опытов в плане, за исключением опытов в нулевых точках (повторных опытов)» [18].

Таблица 26 – Показатели, определяемые по формулам (25) – (28)

Показатели	Исследуемые свойства		
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
$\bar{Y}_0$	36,3	29	10
$S_y^2$	0,4	0,6667	0,0000001
$S_{\bar{y}}$	0,6325	0,8165	0,00316
$S\{b_i\}$	0,1581	0,2041	0,0001

Далее определим расчетное значение критерия Стьюдента для каждого  $b_i$  и  $b_{ij}$ ;

$$t_p = \frac{|b_i|}{s\{b_i\}}, \quad (29)$$

Таблица 27 – Значения критерия Стьюдента для каждого  $b_i$  и  $b_{ij}$

Коэффициенты	Критерий Стьюдента $t_p$ для Исследуемых свойства		
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
$b_0$	228,216	159,848	107500
$b_1$	7,552	3,062	12500
$b_2$	-5,022	-7,962	-2500
$b_3$	-1,069	-8,574	2500
$b_4$	0,119	-5,512	0
$b_{12}$	-8,893	-6,737	2500
$b_{13}$	-2,568	-1,225	-2500
$b_{14}$	-2,808	-1,837	0
$b_{23}$	3,991	-7,349	2500
$b_{24}$	1,8596	2,567	0
$b_{34}$	-1,777	-4,8996	0

«Далее сравним полученные значения  $t_p$  с табличным  $t$ , при числе степеней свободы  $n_0 - 1$ . Получаем  $n_0 - 1 = 4 - 1 = 3$  степеней свободы, при которых табличное значение критерия Стьюдента составляет  $t = 2,86$ .

Если  $t_p \leq t$ , то коэффициент считается равным нулю – незначимый коэффициент, а соответствующий ему член уравнения отбрасывается. По результатам сравнения определяем значимые коэффициенты.

Уточним уравнения исследуемых свойств (22) – (24), оставляя только члены уравнения со значимыми коэффициентами» [6].

Уравнение прочности бетона на сжатие в возрасте 28 суток:

$$R = Y_1 = 36,081 + 1,194X_1 + 0,631X_2X_3, \quad (30)$$

Уравнение морозостойкости бетона:

$$F = Y_2 = 32,625 + 0,625X_1, \quad (31)$$

Уравнение водонепроницаемости бетона:

$$W = Y_2 = 10,75 + 1,25X_1 + 0,25X_3 + 0,25X_1X_2 + 0,25X_2X_3, \quad (32)$$

«Далее полученные уравнения (30) – (32) следует проверить на пригодность (адекватность).

Для этого вычислим остаточную дисперсию и расчетное значение критерия Фишера.

Остаточная дисперсия:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_1^N (Y_u - \widehat{Y}_u)^2}{N - m}, \quad (33)$$

где  $Y_u$  – значение исследуемого свойства бетона в  $u$ -м опыте;

$\widehat{Y}_u$  – значение исследуемого свойства бетона в  $u$ -м опыте, вычисленное по уточненному уравнению;

$m$  – число значимых коэффициентов, включая  $b_0$ » [18].

Расчетное значение критерия Фишера:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_y^2}, \quad (34)$$

Таблица 28 – Показатели, определяемые по формулам (33), (34)

Коэффициенты	Исследуемые свойства		
	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
$\widehat{Y}_u$	36,32	34	14
$S_{ад}^2$	3,53	3,18	0,11
$F_p$	6,31	6,14	6,01

«Табличное значение критерия Фишера с учетом степеней свободы, с которыми определялись  $S_{ад}^2$  и  $S_y^2$ , составляет  $f = 6,59$ .

При условии  $F_p < f$  уравнение признается пригодным. Следовательно, все уравнения пригодны для описания исследуемых свойств дорожного бетона.

Таблица 29 – Область действия уравнения

Фактор	Обозначение фактора	Область действия уравнения
1	2	3
Масса цемента, кг	$X_1$	373–473
Соотношение воды к цементу бетонной смеси	$X_2$	0,40–0,46

Продолжение таблицы 29

1	2	3
Соотношение по массе между песком и щебнем	$X_3$	0,63–0,73
Количество пластифицирующей добавки, % от массы цемента	$X_4$	0,65–0,75

При помощи полученных уравнений можно спрогнозировать исследуемые в данной работе свойства бетона в области варьирования выбранных факторов в рамках, представленных в таблице 29» [5].

### 3.5 Определение оптимального состава бетонной смеси

«По уравнениям (30) – (32) определим оптимальный состав для получения дорожного бетона с требуемой прочностью на сжатие 38,4 МПа, маркой по морозостойкости  $F_{2300}$  (37 циклов), маркой по водонепроницаемости  $W_{10}$ » [4]:

$$38,4 = 36,081 + 1,194X_1 + 0,631X_2X_3, \quad (35)$$

$$37 = 32,625 + 0,625X_1, \quad (36)$$

$$10 = 10,75 + 1,25X_1 + 0,25X_3 + 0,25X_1X_2 + 0,25X_2X_3, \quad (37)$$

В результате решения системы уравнений получаем следующие корни:

$$X_1 = 450,41$$

$$X_2 = 0,356$$

$$X_3 = 0,565$$

«Следовательно, оптимальный расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси, на основе которого будет проводиться дальнейшее исследование, выглядит следующим образом» [6]:

$$Ц = 450;$$

$$П = 650;$$

$$Щ = 1150;$$

$$D_{вд} = 0,045;$$

$$D_{пд} = 3,15;$$

$$В = 160.$$

Заполнители рассчитаны с учетом их влажности, вода – с учетом воды в растворе добавки и влажности заполнителей.

### 3.6 Физико-механические испытания дорожного бетона

«После получения оптимального состава бетонной смеси при помощи уравнений прогнозирования свойств бетона и проверки образцов бетона, необходимо провести испытания бетонных образцов по методикам» [13], указанным в таблице 30.

Таблица 30 – Методики испытания бетонных образцов по исследуемым свойствам

Исследуемое свойство	НТД с методикой испытания
Прочность бетона при сжатии (28 сут)	ГОСТ 10180–2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам»
Марка по морозостойкости	Ускоренный метод по ГОСТ 10060–2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости»
Марка по водонепроницаемости	ГОСТ 12730.5–2018 «Бетоны методы определения водонепроницаемости»

Результаты испытаний бетонных образцов представлены в таблицах (31) – (33).

Таблица 31 – Прочность на сжатие бетонных образцов

№ о б р а з ц а	Прочность на сжатие образца	Прочность, приведен. к прочности базового образца	Среднее значение прочности, приведенной к прочности базового образца	Требуемая прочность на сжатие для класса В30 при коэф. вариации прочности 13,5% по ГОСТ 18105–2018	Вывод
	МПа	МПа	МПа	МПа	
1	47,8	45,41	44,27	38,4	соответствует классу по прочности на сжатие В30
2	45,4	43,13			

Таблица 32 – Марка по морозостойкости

№ п/п	Класс по прочности на сжатие	Масса образца, г		Количество циклов		Марка по морозос- тойкости
		до испытания	после испытания	образца	средняя по серии (3 шт.)	
1	В30	2345	2227	41	39	F <sub>2</sub> 300
2		2313	2196	37		
3		2337	2222	39		

Таблица 33 – Марка по водонепроницаемости

№ образца в партии	Класс прочности	Максимальное давление воды, МПа	Среднее значение давление воды, МПа	Марка по водонепроницаемости
1	В30	1,0	1,07	W10
2		1,2		
3		1,2		
4		1,0		
5		1,0		
6		1,0		

Согласно результатам испытания, дорожный бетон удовлетворяет предъявляемым к нему требованиям.

### 3.7 Исследование влияния химических добавок на структуру бетона

«Исследования влияния добавки-пластификатора на поликарбоксилатной основе и воздухововлекающей добавки на структуру бетона проводились при помощи метода электронной микроскопии. Для этого исследовались сколы бетонных образцов без добавок, с добавками пластификатором и гидрофобизатором.

Структура бетона без добавок является неоднородной, и в разных объемах значительно отличается друг от друга, т.е. имеет блочный характер, а значит, отличается по свойствам, что оказывает значительное влияние на суммарные свойства и характеристики бетона. В контактной зоне имеются дефектные участки: зерна цемента, которые не прореагировали во время процесса гидратации, а также микротрещины.

Для исследования влияния добавки-гидрофобизатора на морозостойкости бетона, т.е. на количество вовлеченного воздуха, определим пористость бетонной смеси объемным методом, с помощью объемомера согласно ГОСТ 10181–2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний» для бетонной смеси без воздухововлекающей добавки и с ней» [2].

Таблица 34 – Результаты испытания бетонной смеси на пористость без воздухововлекающей добавки

Масса навески бетонной смеси, г	Масса вливаемой воды, г	Масса отобранной пены, г	Пористость бетонной смеси, %	Средняя пористость бетонной смеси, %
149	250	1,9	1,4	1,5
155	250	2,0	1,6	

Таблица 35 – Результаты испытания бетонной смеси на пористость с воздухововлекающей добавкой

Масса навески бетонной смеси, г	Масса вливаемой воды, г	Масса отобранной пены, г	Пористость бетонной смеси, %	Средняя пористость бетонной смеси, %
151	250	5,0	5,6	5,4
157	250	5,3	5,2	

При анализе таблиц 34 – 35 можно сделать вывод о том, что введение воздухововлекающей добавки «Полипласт АЭРО» способствует повышению содержания воздуха в бетонной смеси – до 5,6 %, а значит образованию «резервных» пор, которые необходимы для получения высокой морозостойкости дорожного бетона.

#### **Выводы по третьей главе**

Был произведен расчет всех составов бетонной смеси и проведен эксперимент по выбранному плану, согласно нормативно-технической документации. Описана методика проведения эксперимента по морозостойкости по третьему ускоренному методу.

В данной главе представлена статистическая обработка результатов эксперимента с оценкой достоверности полученных результатов, благодаря чему был подобран оптимальный состав бетонной смеси с проведением физико-механических испытаний. Произведены исследования влияния химических добавок на структуру бетона.

## Заключение

1. Разработан состав бетонной смеси с использованием химических добавок: пластификатора на поликарбоксилатной основе и воздухововлекающей добавки. Бетон, изготовленный по карте разработанного состава, прошел все физико-механические испытания и является пригодным для дорожного бетона.

2. Произведено исследование разработанного состава бетона на морозостойкость по третьему ускоренному методу. Состав бетонной смеси соответствует марке по морозостойкости F<sub>2300</sub>.

3. Осуществлена оценка влияния комплекса вводимых добавок на структуру бетона при помощи метода электронной микроскопии. Бетон с комплексом добавок обладает плотной структурой с равномерно распределенными закрытыми порами.

4. Расход цемента в разработанном составе бетонной смеси составляет 450 килограмм на 1 м<sup>3</sup> бетона.

## Список используемой литературы и используемых источников

1. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны / Ассоциация строительных вузов. Москва; 2006, 368 с.
2. Бетоны. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия ГОСТ 24211–2008. [Электронный ресурс] : URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200078983> (дата обращения: 12.05.2023).
3. Бетоны. Метод определения водопоглощения [Электронный ресурс] : ГОСТ 12730.3–2020 URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200177301> (дата обращения: 11.04.2023).
4. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам [Электронный ресурс] : ГОСТ 10180–2012. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200100908> (дата обращения: 17.01.2023).
5. Бетоны. Методы определения морозостойкости [Электронный ресурс] : ГОСТ 10060–2012. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200100906> (дата обращения: 28.04.2023).
6. Бетоны. Правила подбора состава [Электронный ресурс] : ГОСТ 27006–2019 URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200165762> (дата обращения: 15.05.2023).
7. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения [Электронный ресурс] : СП 63.13330.2018 от 20–06–2019. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082> (дата обращения: 05.04.2023).
8. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 26633–2015. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200133282> (дата обращения: 15.05.2023).
9. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. [Электронный ресурс] : ГОСТ 23732–2011. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093835> (дата обращения: 22.01.2023).
10. Грушко И.М., Ильин А.Г., Чехладзе Э.Д. Повышение прочности

и выносливости бетона / Вища школа. Харьков; 1986. 152 с.

11. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы бетоноведения / Стройбетон. Москва; 2006. 692 с.

12. Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Технические требования [Электронный ресурс] : ГОСТ 32703–2014. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200114285> (дата обращения: 13.05.2023).

13. Захаров С.А., Калачик Б.С. Высокоактивный метакаолин современный минеральный модификатор цементных систем // Строительные материалы ежемесячный научно-технический и производственный журнал. 2007. №5. С. 2-3.

14. Зиновьев А.А., Кудряков А.И., Дворянинова Н.В. Кладочные растворы повышенной высоло- и морозостойкости с добавками микрокремнезема и омыленного таллового пека: Монография / ФГБОУ ВО "БрГУ". Братск; 2011. 159 с.

15. Кирсанова А.А., Крамар Л.Я. Органоминеральные модификаторы на основе метакаолина для цементных бетонов // Строительные материалы ежемесячный научно-технический и производственный журнал. 2013. № 11. С. 54-57

16. Крамар Л.Я., Трофимов Б.Я., Гамалий Е.А., Черных Т.Н., Зимич В.В. Модификаторы цементных бетонов и растворов (технические характеристики и механизм действия). / ООО «Искра Профи». Челябинск; 2012, 202 с.

17. Маты бетонные защитные гибкие универсальные ПБЗГУ. Технические условия. ТУ 5859-001-59565714-2012. Введ. 2017–06–01. – Воронеж: ООО «Спецпром 1», 2012. С. 17

18. Методическое пособие. Рекомендации по подбору составов бетонных смесей для тяжелых и мелкозернистых бетонов / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации. М., 2016.

19. Официальный сайт компании АО ГК «Полипласт». [Электронный ресурс]. URL: <https://polyplast-un.ru> (дата обращения: 30.04.2023).

20. Песок для строительных работ. Методы испытаний [Электронный ресурс] : ГОСТ 8735–88. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003348> (дата обращения: 05.05.2023).

21. Песок для строительных работ. Технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 8736–2014. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/58789> (дата обращения: 28.04.2023).

22. Смеси бетонные. Методы испытаний [Электронный ресурс] : ГОСТ 10181–2014. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115733> (дата обращения: 17.12.2022).

23. Смеси бетонные. Технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 7473–2010. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200085075> (дата обращения: 17.12.2022).

24. Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка [Электронный ресурс] : ГОСТ 30744–2001. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200011363> (дата обращения: 16.05.2023).

25. Цементы для транспортного строительства. Технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ Р 55224–2012. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200096456> (дата обращения: 16.05.2023).

26. Цементы общестроительные. Технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 31108–2020. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200140199> (дата обращения: 16.05.2023).

27. Чухланов В.Ю., Никонова Н.Ю., Алексеенко А.Н. Гидрофобизирующая жидкость для бетонных и железобетонных конструкций. // Строительные материалы ежемесячный научно-технический и производственный журнал. 2003. № 12. С. 38-40.

28. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия [Электронный ресурс] : ГОСТ 8267–93. URL:

<https://docs.cntd.ru/document/1200000314> (дата обращения: 04.05.2023).

29. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико–механических испытаний [Электронный ресурс] : ГОСТ 8269.0-97. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003066> (дата обращения: 10.02.2023).

30. Abramovich L.A. The efficiency potential of organizational, technological and managerial solutions for non-destructive quality control methods in the construction of monolithic reinforced concrete structures // International journal of applied engineering research. 2018. С. 90 – 111.

31. Ahuja H.N. Project Management: Techniques in Planning and Controlling Construction Project. // 2-nd ed. New York: John Wiley & Sons. 2019. С. 140 – 145.

32. Koval S.B. Analysis of various media concrete penetrating ability depending on different factors affecting water absorption // International conference on industrial engineering. 2017. С. 132 – 138.

33. Pilcher R. Principles of Construction Management // London: McGraw-Hill International (UK). 2020. С. 79 – 95.

34. Geddes D., Provis J.L., Bernal S.A. Effect of calcination method and clay purity on the performance of metakaolin-based geopolymers // International conference on alkali activated materials and geopolymers: versatile materials offering high performance and low emissions. 2018. С. 53 – 57.