

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
Политехнический институт  
кафедра «Техносферная и экологическая безопасность»

## **Научно-исследовательская работа**

## «Обоснование использования в матрице строительных конструкций золы-уноса энергетического предприятия»

Научный руководитель к.т.н, доцент Л. В. Кулагина

Аспирант И. В. Кириллова

Красноярск 2020

## **ВВЕДЕНИЕ**

*Цель:* исследование воздействия золы-уноса ТЭЦ в качестве добавки на структуру и свойства цементных бетонов.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- сделать литературный обзор в области применения золы-уноса в строительных материалах;
- изучить механизм воздействия золы-уноса на физико-механические свойства бетона при замене части песка высококальциевый золой-уноса;
- определить механизм твердения и свойства наполненного золой бетона;
- исследовать полученные бетонные смеси на реологические свойства, прочность и водоотделение в лабораторных условиях.

### *Актуальность*

Развитие бетонной промышленности в различных странах мира предусматривает применение бетона как основного строительного материала, при этом повышение экологической безопасности предполагает снижение расхода природного сырья при изготовлении бетона и сокращение промышленных отходов.

Эффективность применения золы-уноса в матрице строительных конструкций определяется ее низкой стоимостью и свойствами.

### *Научная новизна результатов исследований работы:*

Состоит в уточнении механизма воздействия высококальциевых зол на структуру цементного бетона при замене в нем части заполнителя. Полученные бетонные смеси соответствуют требованиям, также применение золы-уноса в качестве добавки частично решает проблему накопления отходов производства.

*Практическая значимость* работы заключается в возможности применения исследуемой цементной смеси в бетонной промышленности, поскольку растворы тестировались по международным методикам и стандартам American Petroleum Institut, которых придерживаются многие компании.

Применения золы-уноса в цементных смесях частично решает проблему накопления отходов производства, а также удешевляет процесс производства бетона.

# 1 Общие сведения

## 1.1 Опыт применения техногенных отходов

Существует 5 основных направлений переработки золошлакоматериалов:

- строительные материалы (цемент, кирпич, блоки);
- дорожное строительство (наполнители для дорожного полотна);
- строительные проекты (стеновой материал);
- производство различных наполнителей;
- сельское хозяйство (стабилизаторы почвы).

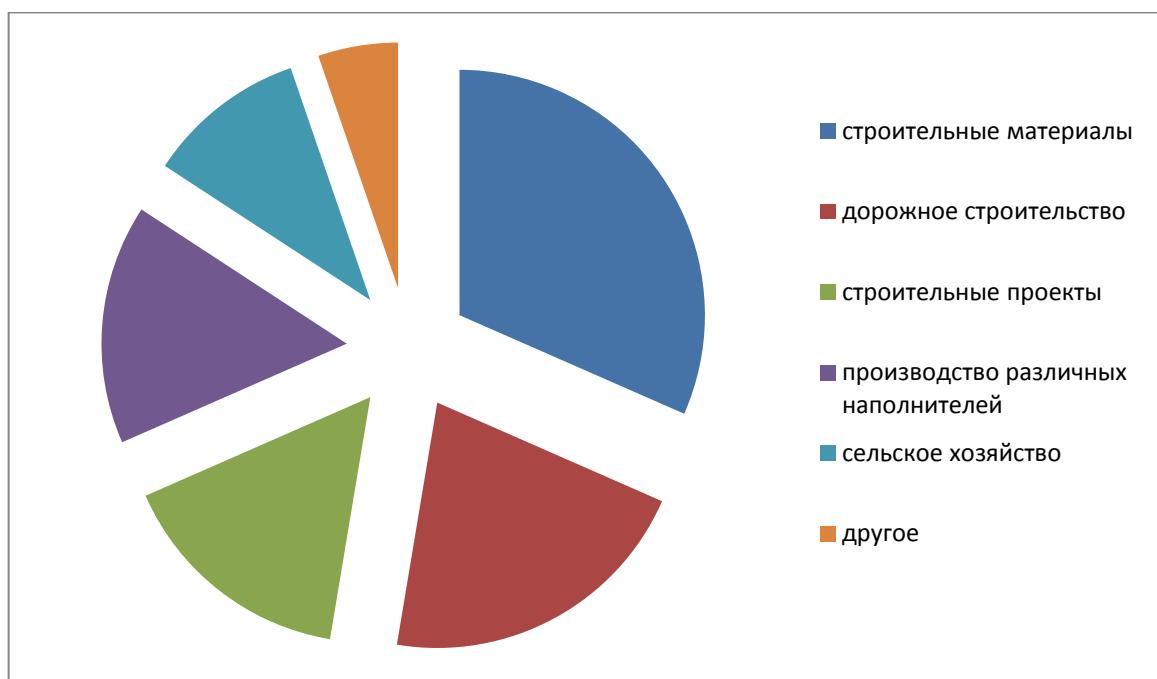


Рисунок 1 – Направления переработки золошлакоматериалов

Патент (RU1802808C) в области использования золы уноса в строительных конструкциях был получен в 1985 году, автор изобретения Лотерс Хендрик. Целью изобретения является повышение прочности на сжатие и трещиностойкости. Это достигается тем, что в способе изготовления строительного изделия, включающем приготовление сырьевой смеси путем перемешивания золы-уноса, извести и воды и формование изделия, после перемешивания часть смеси гранулируют, полученные гранулы выдерживают при 100°C в паровой камере и атмосферном давлении и выдержаные гранулы

смешивают с остальной смесью, после чего формованное изделие выдерживают в паровой камере при атмосферном давлении и температуре 100°C.

Уловленная зола и пыль ТЭЦ широко используется в технологическом процессе при изготовлении строительных материалов – кирпич, бетонные камни, аглопорит и керамзит, зольный гравий, заполнители для бетона и асфальтобетона.

В 1985 г. в цементной промышленности СССР было использовано около 1 млн. тонн золы ТЭЦ, к 1985 г объем утилизации золы достиг 1,4 млн. тонн.

Около 350 тыс. тонн золы в год применяют на Ангарском горном комбинате в качестве алюмо-силикатного компонента сырьевой смеси, полностью заменяющего глину. Кроме этого, около 100 тыс. тонн золы применяют в качестве активной минеральной добавки, в результате этого удельный расход топлива на обжиг 1 тонны клинкера снижается на 30 кг.

Также известен опыт применения золы-уноса и золошлаковой смеси отвалов станции на цементном заводе в городе Новороссийске, золошлаковые отходы ГРЭС применяли в качестве составной части сырьевой смеси клинкера в печах с конвейерными кальцинаторами.

На Здолбуновском цементно-шиферном комбинате в 1981 г. в качестве активной минеральной добавки было использовано 22 тыс. т золы Бурштынской ГРЭС, экономия составила 38 тыс. руб. и 0,7 млн. кВт ч электроэнергии.

На заводе железобетонных изделий в Московской области работает первый в СССР цех зольного гравия производительностью 30 тыс. м<sup>3</sup> в год. В качестве исходного сырья используется золошлаковая смесь отвалов Каширской ГРЭС-4.

В последние годы в связи с увеличением объемов золы значительное развитие получили исследования эффективных способов ее утилизации. В настоящее время основным потребителем золы по разработанным технологическим процессам является строительная индустрия.

В таких странах как Канада, США, Англия исследуются процессы комплексного применения золы. Исследование проводится на разделение золы на различные продукты и материалы такие как магнезин, алюминий в виде криолита и глинозема и углерод.

## **1.2 Классификация зол и их свойства**

Зола-уноса – это отбираемый в электрофильтре несгораемый остаток минерального происхождения, который образуется в процессе горения твердого топлива на тепловых электростанциях.

Классификация золы приведена в ГОСТ 25818-91 [1]. Золы по виду сжигаемого угля подразделяют на антрацитовые, каменноугольные и буроугольные. В зависимости от химического состава золы подразделяют на кислые, проявляющие пуццоланические свойства и основные, проявляющие гидравлические свойства. Также все золы подразделяются на высококальцевые (общее содержание оксида кальция ( $\text{CaO}$ ) более 10%) и низкокальциевые ( $\text{CaO}$  менее 10 %). В зависимости от активности золы классифицируют на активные, обладающие самостоятельными вяжущими свойствами, скрытые активные, требующие активаторов для затвердевания, и инертные (золы с высоким содержанием кальция).

Высококальцевые золы имеют вяжущие свойства и являются многофазными материалами. Влияние на вяжущие свойства оказывают состав и соотношение фаз золы. Качественный баланс фаз позволяет получать предельную гидравлическую активность и улучшать химические и физические свойства материала. Получение оптимального содержания вяжущих материалов возможно в случае хорошего изучения гидравлической активности фаз и механизма их взаимодействия.

Группы объединения фаз высококальцевых зол:

- клинкерные материалы (ферриты кальция, силикаты, алюминаты);
- воздушные вяжущие материалы (свободная окись магния, кальция, безводный и полуводный сульфат кальция);
- стекловидная вата (основное и кислое стекло);
- нерастворимый остаток.

По химическому составу золы и шлаки от сжигания каменных углей и антрацитов представлены в основном диоксидом кремния и оксидом аллюминия. Содержание оксида кальция не превышает 5 %.

Соотношения главных оксидов в золах ТЭС :

- $\text{SiO}_2$  – 40-58%,
- $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 21-27%,
- $\text{CaO}$  – 4-6%,
- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 4-17%,
- $\text{Na}_2\text{O}$  – 0,4-1,4%,
- $\text{K}_2\text{O}$  – 0,4-4,7%.

Помимо этого в состав зол входят  $\text{SO}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$  и др.

Высококальциевые золы и шлаки образуются при сжигании углей Канско-Ачинского бассейна ( $\text{CaO}$  – 25-40 %) бурых углей месторождений Украины и Урала, каменных углей некоторых месторождений Средней Азии и Дальнего Востока ( $\text{CaO} > 10\%$ ), а также горючих сланцев ( $\text{CaO}$  до 45%).

В зависимости от вида углей и условий их сжигания в золах может содержаться 1-20% и более несгоревших органических частиц топлива. Содержание остатков топлива оценивается по потерям при прокаливании пробы золы при 1000° С. Стандарты устанавливают допустимое содержание органических остатков в золах в зависимости от вида исходного угля (антрацит, каменный или бурый уголь), вида бетона (тяжелый, легкий), вида бетонной конструкции (армированная, неармированная). По этим признакам допустимое содержание органических остатков колеблется в буроугольных золах в пределах 1,5-5 %, в каменноугольных – 2-10, в антрацитовых – 6-20 %.

*Физические свойства.* Основными физическими свойствами зол и шлаков энергетических предприятий являются их гранулометрический состав, насыпная и истинная плотность.

Гранулометрический (зерновой) состав пылевидных зол зависит от условий подготовки топлива, его вида, режима сжигания, метода улавливания золы и места ее отбора. Более крупные частицы золы улавливаются циклонами,

мелкие – электрофильтрами, стоит отметить, что на каждом поле электрофильтра собирается определенная фракция золы. Например, зола из циклонов Троицкая ГРЭС содержит лишь 52-70% мельчайших частиц размером менее 50 мкм, тогда как электрофильтровая зола со второго поля содержит 59-88% таких частиц, с третьего поля – 76-98%, при этом фракция золы с четвертого поля электрофильтра практически целиком состоит из мельчайших частиц. Наряду с этим происходит разделение по крупности и по химическому и фазовому составу. Максимальное содержание сферических стекловидных частиц имеют мельчайшие фракции золы. Чем крупнее фракция, тем выше в ней содержание агрегированных, шероховатых, пористых частиц.

Системы совместного гидроудаления золы и шлака направляют в отвалы полидисперсные шлакозольные смеси. Рядом с местом выпуска пульпы образуется шлаковая зона отвала с преобладанием частиц крупнее 0,3 мм, в отдалении – зольная зона с частицами менее 0,25 мм.

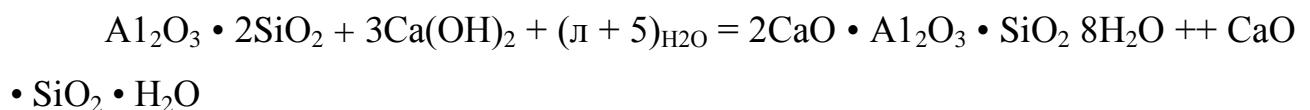
В стандартах разных стран используется характеристика дисперсности золы, оцениваемая по удельной поверхности, которая должна быть не менее 2700-4000 см<sup>2</sup>/г. Этим подчеркивается желательность использования мелких фракций золы.

От гранулометрического, химического и фазового состава золы зависит ее насыпная плотность, которая для различных зол находится в пределах 650-1400 кг/м<sup>3</sup>. Истинная плотность золы различных углей может колебаться от 1,75 до 3,5 г/см<sup>3</sup> и в среднем составляет 2,1-2,4 г/см<sup>3</sup>. Топливные гранулированные шлаки имеют крупность зерен 12-17 мм, истинную плотность 2,91-3,28 г/см<sup>3</sup>, насыпную плотность 1200-1350 кг/м<sup>3</sup>.

Химическая активность является наиболее важным свойством зол и шлаков ТЭС, обуславливающим возможность их применения в составе вяжущих веществ и бетонов. Способностью к непосредственному взаимодействию с водой топливные золы и шлаки, как правило, не обладают. Это характерно лишь для высококальциевых зол, содержащих свободные оксиды кальция и магния. В то же время аморфные компоненты зол и шлаков

обладают так называемой пущолановой активностью, т.е. способностью при обычных температурах связывать гидроксид кальция с образованием нерастворимых соединений. Это характерно и для вулканических горных пород – пущоланов, которые и дали название данному явлению. Накопление нерастворимых новообразований дает возможность гидравлического (сначала на воздухе, а затем и в воде) твердения вяжущих из смесей извести или портландцемента с золой или шлаком.

Пущолановой активностью в составе зол и шлаков обладают продукты обжига глин: аморфизованное глинистое вещество типа метакаолинита, аморфные  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и алюмосиликатное стекло. Реакционная способность по отношению к гидроксиду кальция у них различна и связана с рассмотренными ранее температурными превращениями каолиновых глин при сжигании топлива. Обладающий большой удельной поверхностью метакаолинит  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  активно реагирует с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при обычных температурах с образованием гидросиликатов кальция и гидрогеленита по следующей реакции:



Активность образующихся при более высоких температурах аморфных  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  заметно меньше, что объясняется резким снижением удельной поверхности вследствие спекания и кристаллизации новообразований (муллита, кристобалита).

Высокотемпературное спекание и плавление глинистых минералов резко снижает их удельную поверхность и соответственно активность, поэтому стеклофаза зол и шлаков малоактивна при обычных температурах. Установлено, что повышение температуры сжигания топлива сверх допустимого предела приводит к падению активности большинства топливных зол.

Водотепловая обработка (пропаривание при нормальном давлении, автоклавирование) резко увеличивает активность всех аморфных фаз зол и

шлаков, в особенности спекшихся и остеклованных. Продуктами взаимодействия пущоланового компонента с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при повышенных температурах являются гидросиликаты кальция состава  $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$  и гидроалюмосиликаты кальция (гидрогранаты).

При повышенных давлении и температуре проявляют активность и некоторые кристаллические компоненты зол и шлаков (кварц, полевые шпаты, алюмосиликаты кальция).

Пущолановая реакция золы в бетоне начинается с адсорбции на поверхности частиц золы гидроксида кальция, выделяющегося при гидролизе минералов-силикатов портландцемента. Причем между покрытием из гидроксида кальция и частицами золы возникают тонкие водные слои толщиной 0,5-2 мкм. Через них ионы кальция поступают к поверхности частиц золы и взаимодействуют с ее активными компонентами.

Скорость заполнения водных промежутков зависит от химического и фазового состава золы, ее дисперсности и условий твердения бетона.

Считается, что пущолановая реакция золы в бетоне начинается не сразу, а по истечении определенного времени после приготовления бетона. Разные исследователи называют разные сроки: от 6 до 40 дней. Этот срок, во время которого зола инертна, также зависит от качества золы и условий твердения бетона. При использовании золы или шлака в качестве добавки в цемент и бетон (активной минеральной добавки) возникает необходимость количественного определения их пущолановой активности. С повышением активности золы и шлака возрастает степень их использования в бетоне. [1]

### **1.3 Бетоны с применением зол и шлаков ТЭЦ**

1.3.1 Влияние золы ТЭЦ на свойства бетонной смеси и структуру затвердевшего бетона

Тяжелый бетон является основным видом бетона для изготовления строительных конструкций. Золу ТЭС используют для замены части заполнителя в обычных тяжелых бетонах для изготовления строительных изделий и в бетонах естественного твердения, в частности гидротехнических.

Введение золы ТЭЦ в бетон сказывается прежде всего на изменении водопотребности и подвижности бетонной смеси. Влияние золы на водопотребность бетонной смеси определяется ее дисперсностью, формой и характером поверхности частиц, минерально-фазовым составом.

При введении в бетон взамен части цемента золы ТЭЦ, состоящей из сферических частиц с гладкой остеклованной фактурой поверхности, подвижность бетонной смеси возрастает, благодаря уменьшению внутреннего трения бетонной смеси. Причем, чем дисперснее зола, а следовательно, чем больше в ней остеклованных шарообразных частиц, тем большее пластифицирующее действие оказывает она на бетонную смесь.

Существует следующее объяснение повышения подвижности бетонной смеси при замене части заполнителя золой-уноса энергетического предприятия. При добавлении золы-уноса объем бленда вяжущего в смеси увеличивается, это объясняется тем, что замена заполнителя (цемента) золой-уноса производится по массе, тем временем плотность золы-уноса меньше плотности заполнителя (цемента). Стоит отметить, что увеличение объема бленда вяжущего (цементно-зольного) при других равных условиях приводит к повышению подвижности бетонной смеси.

При добавлении золы-уноса энергетического предприятия, которая содержит большое количество крупных агрегированных частиц и имеющих неправильную форму, количество воды в бетонной смеси увеличивается. Такое явление можно объяснить тем, что такие частицы имеют высокое водопоглощение. Размельчение таких частиц золы приводит к снижению пористости и как следствие, к уменьшению водопоглощению золы-уноса. Например, измельчение крупнодисперсной золы-уноса Архангельской тепловой электростанции, имеющей удельную поверхность  $1410 \text{ см}^2/\text{г}$ , до  $2800$

и  $5700 \text{ см}^2/\text{г}$ , привело к уменьшению водовяжущего отношения в бетоне с 0,67 до соответственно 0,58 и 0,54.

Изменение водопоглощения золы при помоле зависит от нескольких факторов: повышение удельной поверхности и снижение количества крупных пор. В первое время в большей степени оказывается снижение пористости, поэтому водопоглощение уменьшается. Следующее увеличение времени помола приводит к преобладающему влиянию повышения удельной поверхности, и водопоглощение вновь будет возрастать. Поэтому важным является установить оптимальный предел измельчения крупнодисперсных зол.

Водопотребность золы-уноса обычно возрастает с увеличением содержания в ней остатков несгоревшего топлива, которые способны в значительной степени поглощать воду. Несгоревшее топливо обычно преобладает в крупной фракции золы, отсев которой приводит к снижению водопотребности.

Использование золы-уноса тепловой электростанции для замены заполнителя (песка) в бетонах приводит к увеличению водопотребности бетонных смесей. Такое явление связано с тем, что даже высококачественные золы имеют значительную водопотребность (около 46%) по сравнению с заполнителем (песком) (12%).

Уменьшению водопотребности бетонных смесей с применением золы-уноса тепловой электростанции способствует использование пластифицирующих добавок, например лигносульфонаты (ЛСТ).

Снижение водопотребности бетонной смеси при замене части заполнителя (цемента) золой-уноса тепловой электростанции определяется снижением водовяжущего отношения (вязущее: цемент + зола). Действительное значение водоцементного отношения при этом увеличивается. Такое явление связано с тем, что зола-уноса непосредственно с водой вступает в реакцию и, как следствие, большое количество воды приходится на единицу массы заполнителя (цемента). Чем больше водопотребность золы, тем в большей степени увеличивается водоцементное отношение.

Повышенное значение водоцементного отношения в бетонах, содержащих золу-уноса ухудшает структуру бетона, особенно в раннем возрасте. Образование водных пленок толщиной 0,5-2 мкм вокруг частиц золы повышает капиллярную пористость бетона, которая отрицательно воздействует на прочность, морозостойкость и прочие главные строительно-технические свойства бетона. Капиллярные поры, которые образуются капиллярной испаряющейся водой, благоприятно влияют на впитывание и миграцию влаги, которая замерзает в них, начиная с -5 до -9°C.

Отрицательное влияние увеличения водоцементного отношения компенсируется усиленной гидратацией цемента в присутствии золы, в результате чего поры интенсивно заполняются продуктами гидратации цемента. Повышение степени гидратации цемента можно объяснить эффектом мелкодисперсных порошков, суть которого состоит в том, что частицы золы расширяют свободное пространство, в котором осаждаются продукты гидратации цемента. Помимо этого, зола, связывая выделяющийся при твердении цемента гидроксид кальция в нерастворимые соединения, снижает его концентрацию в водном растворе твердеющей цементной массы и тем ускоряет гидролиз содержащихся в клинкере силикатов кальция. Таким образом, в присутствии золы повышается степень использования цемента в бетоне.

Взаимодействие золы с гидроксидом кальция приводит к застанию водных пленок вокруг частиц золы продуктами пущолановой реакции в результате чего капиллярная пористость уменьшается. Чем активнее зола, тем быстрее идет этот процесс. Со временем образуются прочные связи между частицами золы и окружающим бетонным камнем, происходит уплотнение структуры бетонов с золой-уносом, это приводит к улучшению физико-механических свойств таких бетонов.

Стоит отметить, что ни вовлечение золы в пущолановую реакцию, ни более активная гидратация цемента в присутствии золы-уноса не могут преодолеть не благоприятных последствий увеличения водоцементного

отношения. Даже в позднем возрасте капиллярная пористость в цементно-зольных составах выше, чем в составах без золы-уноса, это влечет за собой и более низкие физико-механические свойства бетонов нормального твердения с добавками золы-уноса.

Для повышения свойств поровой структуры бетона с золой-уноса необходимо вводить добавки, которые будут снижать водопотребность бетонной смеси, активизировать золу измельчением и использовать другие технологические приемы уменьшения водоцементного отношения и увеличения активности золы.

### 1.3.2 Применение золы-уноса энергетического предприятия в бетонах естественного твердения

В бетонах естественного твердения, в частности гидротехнических, золы-уноса тепловой электростанции используется в основном для замены части цемента. Гидротехническое строительство потребляет значительные объемы бетона, ежегодно подсчитываемые миллионами кубометров. Поэтому применение золы-уноса в таких бетонах экономическую эффективность цемента.

При замещении части цемента золой-уноса тепловой электростанции для бетонов нормального твердения характерна более низкая прочность в раннем возрасте по сравнению с бетонами без золы. Так, даже при замене 10% заполнителя (цемента) различными золями прочность бетона в возрасте 14 суток снижается на 15-25% (в зависимости от качества золы). С течением времени разница в прочности бетонов с золой и без золы постепенно сокращается, а в более поздние сроки твердения (160-360 суток) бетоны с умеренным содержанием золы приобретают прочность, равную прочности бетона без золы и даже превышающую ее.

Это явление можно объяснить тем, что становление прочности бетонов с золой происходит под влиянием двух основных факторов. Первый связан с снижением расхода цемента и увеличением водоцементного отношения при

добавлении золы-уноса и приводит к уменьшению прочности. Второй фактор связан с выражением пущолановой активности золы. Первый фактор применим для ранних сроков твердения бетона, второй – в поздние сроки.

В случае гидротехнических бетонных сооружений, вступающих в эксплуатацию в достаточно позднем возрасте, замедленное нарастание прочности бетонов с золой не является недостатком. К шестимесячному возрасту бетона, в котором определяются марки по прочности и водонепроницаемости, положительное влияние активности золы на эти свойства оказывается в достаточной степени и его следует учитывать при подборе состава бетона, снижая соответственно расход цемента на 1 м<sup>3</sup> бетона.

Для конструкций, быстро вводимых в эксплуатацию, прочность бетона с золой в раннем возрасте может быть повышена применением цемента более высокой марки, использованием добавок-ускорителей твердения бетона, повышением активности золы помолом (без цемента или совместно с цементом).

При замене части цемента золой в бетонах нормального твердения необходимо установить оптимальную добавку золы, не вызывающую снижения прочности бетона в требуемые сроки, а в случае использования крупнодисперсной золы – оптимальный предел ее измельчения.

Домол золы может осуществляться в шаровых мельницах, а также в вибромельницах. Затраты энергии на помол невелики ввиду малой прочности частиц – агрегатов золы. Для отвальных зол, имеющих влажность 20-50%, целесообразнее применять мокрый помол и вводить золу в бетон в виде шлама.

Положительной особенностью бетонов с золой является их повышенная прочность на растяжение по сравнению с бетонами без золы. Увеличение отношения прочности на растяжение к прочности на сжатие (на 30% и более) свидетельствует об улучшении деформативных характеристик бетона с золой.

При бетонировании массивных конструкций (плотины, шлюзы и т.п.) внутри бетонного массива за счет тепловыделения при гидратации цемента развиваются высокие температуры, что вызывает опасность термического

растрескивания бетона. Поэтому проводятся специальные мероприятия по охлаждению бетонного массива. Существенным преимуществом бетона с золой является его пониженное тепловыделение при твердении. Замена 25-30% цемента золой снижает тепловыделение на 15-20%. При этом помимо экономии цемента и улучшения температурного режима внутри массива достигается существенная экономия за счет отказа от искусственного охлаждения бетона. Введение золы ТЭЦ практически не изменяет усадку бетона.

Для бетона гидротехнических сооружений важным требованием является стойкость против коррозии в различных агрессивных средах. Под действием мягкой проточной воды, например речной, из бетона вымывается  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , образовавшийся при твердении портландцемента. Выщелачивание  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в количестве 15-30% от общего содержания в цементном камне вызывает понижение его прочности на 40-50% и более. Зола ТЭЦ связывает  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в нерастворимые соединения и тем самым повышает стойкость бетона к данному виду коррозии. Связывание  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  золой приводит также к повышению стойкости бетона против действия кислот, содержащихся, например, в сточных водах промышленных предприятий. Повышается также стойкость против действия солей магния, которые встречаются в грунтовых водах и в большом количестве содержатся в морской воде, а также против солей – сульфатов.

Долговечность бетонов в конструкциях, подвергающихся совместному действию атмосферных факторов и воды, зависит от морозостойкости, т.е. способности материала выдерживать многократное попеременное замораживание и оттаивание в водонасыщенном состоянии. Замена части цемента золой, как правило, приводит к снижению морозостойкости. Это объясняется, во-первых, увеличением фактического водоцементного отношения и образованием дополнительного объема капиллярных пор. Снижению морозостойкости способствует также уменьшение содержания вовлеченного воздуха при введении золы и присутствие в золе органических остатков, которые набухают в воде, плохо сцепляются с вяжущим, способны образовывать соединения, разрушающие вяжущее.

Органические остатки содержатся обычно в крупной фракции золы. Помол золы приводит к разрушению органических частиц и их равномерному распределению во всем материале, что положительно влияет на морозостойкость бетона.

Существенно повысить морозостойкость бетонов с золой можно введением в бетон поверхностно-активных добавок гидрофобно-пластифицирующего типа. Пластифицирующий компонент таких добавок снижает водопотребность бетонной смеси, а следовательно, и объем капиллярных пор. Гидрофобизирующий (отталкивающий воду) компонент воздействует на стенки пор и капилляров в бетоне и тем самым препятствует впитыванию в них воды. Так, после 150 циклов замораживания и оттаивания бетоны с заменой 20% цемента молотой отвальной золой в сочетании с комплексной гидрофобно-пластифицирующей добавкой повысили прочность на 10% по сравнению с бетоном без золы. Использование гидрофобно-пластифицирующей добавки при замене 25% цемента мелкодисперсной золой позволило получить бетон, не уступающий поморозостойкости бетону без золы и выдерживающий 200 циклов замораживания и оттаивания.

Важной характеристикой гидротехнических бетонов является их водонепроницаемость. Бетоны, содержащие золу, обычно характеризуются повышенной водонепроницаемостью, что объясняется набуханием гелеобразных продуктов твердения цемента с золой в водном растворе  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Кроме того, зола часто улучшает гранулометрический состав бетонной смеси, в результате чего получается более плотный бетон. Так, замена 20% цемента молотой золой в сочетании с гидрофобно-пластифицирующей добавкой позволила получить бетон, имеющий в возрасте 40 суток марку по водонепроницаемости W12, т.е. выдерживающий одностороннее гидростатическое давление 1,2 МПа.

Если требования к бетону ограничиваются его классом (маркой) по прочности, то зола может вводиться во всех случаях, когда активность цемента

превышает рекомендуемую для данного класса бетона. Количество добавки золы  $a$ , %, при этом определяют по формуле:

,

где  $\sigma_c$  – марка цемента;

– требуемая для данного класса бетона активность смешанного вяжущего (цемент + зола).

Расчетное количество золы является приблизительным, в частности, по той причине, что водопотребность золы в чистом виде не всегда соответствует влиянию ее на водопотребность бетонной смеси.

Для установления окончательной дозировки золы следует подобрать четыре состава бетона с заданной прочностью: без золы, с расчетным количеством золы, с количеством золы на 5% меньше расчетного и с количеством золы на 5% больше расчетного. Например, если расчетное количество золы получилось равным 20% (от суммарной массы цемента и золы), то кроме 20% нужно взять еще 15 и 25%. Та дозировка золы, при которой получение заданной прочности бетона (при заданной подвижности бетонной смеси) требует наименьшего расхода цемента, принимается за наилучшую. Если требуемая прочность бетона обеспечивалась при всех дозировках золы, то желательно испытать еще один или два состава, увеличив содержание золы на 5-10% по сравнению с максимальным.

В тех случаях, когда цемент не обладает излишней активностью для данного класса бетона, целесообразность введения золы устанавливают подбором аналогичным образом.

Опыты по установлению оптимальной дозировки золы необходимо проводить на заполнителях и цементе, которые будут использоваться на строительстве. Также в лабораторных испытаниях должен учитываться способ введения золы в бетон.

Золу можно вводить в бетон следующими способами:

1. сухую золу в бетоносмеситель через отдельный дозатор;
2. в бетоносмеситель в виде водно-зольной суспензии, приготовляемой отдельно;
3. предварительно смешивают всухую с цементом;
4. предварительно смешивают в отдельной мешалке с цементом и водой и вводят в бетоносмеситель в виде цементно-зольной суспензии.

Чтобы выбрать наиболее удобный для строительства способ введения золы в бетон, следует сопоставить технико-экономические показатели отдельных вариантов с учетом имеющегося на строительстве оборудования. Наиболее простым является первый способ. С точки зрения равномерного распределения золы в бетонной смеси наиболее надежны третий и четвертый способы.

Необходимо помнить, что для гидротехнических бетонов оптимальную дозировку золы помимо требований по прочности нужно устанавливать с учетом ее влияния на морозостойкость, водонепроницаемость, коррозионную стойкость и другие описанные выше свойства.

### 1.3.3 Использование золы ТЭЦ в тяжелых бетонах для изготовления строительных изделий

В тяжелый бетон для изготовления различных строительных изделий золу можно вводить взамен части цемента и части заполнителя. В условиях пропаривания добавка золы оказывается более эффективной, чем при нормальном твердении. Для пропаренного бетона установлена оптимальная добавка золы: 150 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона. При этом достигается экономия цемента 50-70 кг/м<sup>3</sup> бетона. Зола в бетоне выполняет роль активной минеральной добавки и микронаполнителя, улучшающего свойства смеси. При введении золы в оптимальном количестве водопотребность бетонной смеси практически не изменяется. Поэтому для корректировки состава смеси, подобранного общепринятыми способами, следует сократить расход цемента в

рекомендуемом количестве и уменьшить расход песка и щебня (гравия) в принятой пропорции на величину, равную разности между массой введенной золы и сокращаемого цемента.

Особенно рационально использовать тяжелые бетоны с добавкой золы при изготовлении плоских крупных элементов (панелей для стен, перекрытий и др.) в кассетных установках.

При производстве изделий из тяжелого бетона в кассетах на их поверхности образуются многочисленные поры и раковины, обусловленные вовлечением воздуха в бетонную смесь при ее укладке в кассеты и при вибрации. Введение золы повышает подвижность бетонной смеси и уменьшает воздухововлечение, в результате чего число дефектов на поверхности изделий уменьшается. При оптимальном содержании золы в бетонной смеси наряду с уменьшением расхода цемента уменьшается ее водоотделение и расслоение.

Содержание золы в смеси может быть увеличено при использовании высокоактивных портландцементов, ускорителей твердения и добавок, повышающих морозостойкость и водонепроницаемость бетона. В ряде случаев возможна замена 50% по массе и более цемента золой, что очень важно с точки зрения повышения степени утилизации золы.

Частичная замена кварцевого песка золой в пропаренном бетоне повышает жесткость бетонной смеси. При этом уменьшается средняя плотность бетона и растет его прочность на сжатие. Сохранение постоянной подвижности бетонной смеси за счет увеличения водосодержания при умеренных дозировках золы (замена кварцевого песка золой до 200 кг/м<sup>3</sup>) также сопровождается ростом прочности. При увеличении содержания золы прочность падает.

При частичной замене цемента золой ТЭЦ при постоянном расходе воды жесткость смеси уменьшается и улучшается ее удобоукладываемость. Замена цемента золой до 100 кг/м<sup>3</sup> мало сказывается на прочности бетона. Дальнейшее увеличение дозировки золы приводит к падению прочности бетона.

При среднем расходе цемента с повышенным содержанием золы достигается подвижность смеси ОК (осадка конуса или подвижность бетона) =

20-22 см при неизменном расходе воды, в то время как без золы она не превышает 2-4 см. Прочность же остается на одинаковом уровне. Это очень важно при изготовлении изделий в кассетах, так как появляется возможность улучшить качество поверхности изделий, снизить уровень шума при вибрации, повысить производительность труда при формировании и последующей отделке изделий.

Введение в бетонную смесь, содержащую золу, добавок поверхностно-активных веществ, например J1СТ (0,1-0,3% от массы цемента), позволяет снизить начальное водосодержание смеси на 5-16 л/м<sup>3</sup> при сохранении требуемой подвижности смеси. Это приводит к повышению прочности бетона на 5-10% как после пропаривания, так и в возрасте 28 суток. Введение ЛСТ (лигносульфонат) способствует снижению воздухововлечения и поверхностной пористости изделий, а также уменьшению размеров пор.

Деформативные характеристики бетонов с золой соответствуют нормам. Для расчетов конструкций из бетона с повышенной дозировкой золы ТЭЦ можно пользоваться данными, приведенными в СНиП 2.03.01 – 84 для тяжелого бетона.

Добавка золы 200 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона из смеси подвижностью 20-24 см с 0,2 % ЛСТ не уменьшает сцепления бетона с арматурой, не увеличивает усадочные деформации и ползучесть бетона, поэтому такие бетоны можно применять в несущих конструкциях крупнопанельного домостроения.

Введение золы, обладающей высокой пуццолановой активностью, приводит к снижению концентрации Ca(OH)<sub>2</sub>, выделяющегося при гидратации цемента. При этом снижается щелочность водной среды в бетоне и возникают условия для коррозии стальной арматуры. Испытания бетонов с золой показали, что щелочность с течением времени изменяется незначительно и остается достаточно высокой.

Для обеспечения защиты арматуры от коррозии в бетоне с золой минимальный расход цемента Ц, кг, на 1 м<sup>3</sup> бетона в зависимости от количества

в смеси золы Р, кг, и содержания несгоревшего угля в ней А, %, определяется по формуле:

Расчеты по этой формуле показали, что рекомендуемые составы тяжелого бетона с золой обеспечивают сохранность арматуры в бетоне при содержании несгоревшего топлива в золе до 20-25%.

Основными слагаемыми экономической эффективности бетонов с золой в заводских условиях являются: снижение расхода цемента на 20-25 % и песка на 20-30%, снижение стоимости отделки (шпатлевки) панелей, увеличений срока службы кассетного оборудования и навесных вибраторов, сокращение времени формования изделий.

В зависимости от способа отбора золы на электростанциях и их удаленности от заводов ЖБИ выбирают необходимые мероприятия и оборудование по приему и переработке золы. При использовании сухой золы вблизи электростанции ее можно подавать по пневматическому трубопроводу прямо в бункера бетоносмесительной установки.

На заводах прием, хранение, подачу к бетоносмесителям, дозирование сухой золы осуществляют аналогично цементу. Вместе с тем емкости для хранения целесообразно оборудовать пневмоустройствами для усреднения золы и предотвращения слеживания с возможной перекачкой из одного силоса в другой.

Если применяют золошлаковые смеси из отвалов, можно использовать технологический комплекс по приготовлению и применению гидроудаленной золы в виде шлама усредненного состава и определенной влажности.

По физико-механическим характеристикам золошлаковые и золошлакопесчаные бетоны оптимальных составов практически не уступают обычному тяжелому бетону.

Средняя плотность золошлаковых и золопесчаных бетонов оптимальных составов на 10-15% ниже, чем у тяжелых бетонов, а прочностные показатели несколько выше. Твердение таких бетонов наиболее интенсивно протекает в водной среде.

Разновидностями мелкозернистых бетонов на золошлаковых смесях являются бетоны на шлакопесчаном заполнителе и на золопесчаном заполнителе.

Мелкозернистый бетон на шлакопесчаном заполнителе готовится из шлака раздельного гидроудаления и природного кварцевого песка. Расход цемента в таком бетоне на 20-25% ниже, чем в обычном мелкозернистом бетоне на двухфракционном кварцевом песке. Такой бетон эффективен при изготовлении густоармированных и тонкостенных конструкций.

Золопесчаные бетоны получают путем введения в тощие цементнопесчаные смеси золы ТЭЦ. Расход цемента в таких бетонах классов В15 и В25 практически не превышает норм для обычного тяжелого бетона с крупным заполнителем, в то время как мелкозернистые цементнопесчаные бетоны характеризуются повышенным на 20-40% расходом цемента по сравнению с тяжелым бетоном. Оптимальные составы золопесчаных бетонов достигаются при соотношении компонентов по массе

цемент: зола: песок = (1:0,2:3,8)-(1:0,8:5,4).

Зола в песчаном бетоне выполняет роль микронаполнителя и пущолановой добавки. Она заполняет пустоты между песчинками, увеличивает содержание теста вяжущего (цементнозольного теста) и объемную концентрацию твердой фазы в бетонной смеси. Для повышения активности золы используют ее мокрый помол до дисперсности 2500-3000 см<sup>2</sup>/г – для буроугольных зол и до 4000-4500 см<sup>2</sup>/г – для каменноугольных. Введение золы увеличивает прочность песчаных бетонов на 20-50% по сравнению с прочностью бетонов при тех же расходах цемента, но без золы.

Золопесчаные бетоны имеют мелкозернистую структуру с высокой однородностью пор, что обуславливает их высокую морозостойкость (более 150 циклов) и водонепроницаемость (более 0,8 МПа).

Золопесчаные бетоны нашли применение при изготовлении элементов железобетонных колодцев, стен подвалов и т.д.

При изготовлении тяжелого бетона золошлаковая смесь может заменить песок частично или полностью. Особенно выгодно вводить золошлаковую смесь вместо мелкозернистого песка, требующего повышенного расхода цемента. Бетон, в котором золошлаковая смесь сочетается со щебнем, по прочности не уступает бетону на высококачественных заполнителях. Золошлаковая смесь или шлак, применяемые в сочетании с обычными заполнителями, улучшают зерновой состав и удобоукладываемость бетонной смеси при экономии дорогостоящих заполнителей, а в отдельных случаях и цемента.

Составы бетонов на комбинированных заполнителях устанавливают строительные лаборатории с учетом вида и качества местных материалов, условий производства и требований к бетону. Бетоны на комбинированных заполнителях можно применять наравне с обычными тяжелыми бетонами, за исключением напряженно-армированных, специальных и особо ответственных конструкций.

Эффективно сочетать золошлаковые смеси с легкими пористыми заполнителями, особенно шлаковой пемзой, получаемой путем быстрого охлаждения шлакового расплава. Шлакопемзозолобетоны, отвечающие по своим свойствам требованиям стандартов, получают классов В15, В25, В30. Они рекомендуются для изготовления предварительно напряженных пустотных панелей перекрытий. Выпускаемые шлакопемзозолобетонные панели на Енакиевском заводе позволили снизить трудоемкость на 0,75 чел-ч и себестоимость 1м<sup>3</sup> бетона на 1,67 руб. по сравнению с изделиями из обычного тяжелого бетона.

В г. Красноармейске из шлакопемзозолобетона производят комплекты железобетонных изделий для 5-9-этажных домов, включая лестничные марши и площадки, сантехкабины и пр. Использование шлакопемзозолобетона вместо обычного тяжелого бетона позволило уменьшить массу конструкций на 5-18%, расход цемента и стали в среднем на 9-10%, стоимость изготовления и монтажа на 9-10,6 %.

## **1.4 Анализ литературных источников в области применения золы-уноса в строительных конструкциях**

В настоящее время перспективным является применения золы уноса в цементных смесях, это обусловлено тем, что частицы золы равномерно распределяются в объёме цемента. Кроме этого при производстве бетонных смесей предлагается часть портландцемента заменять золой. В целом использование золы уноса в тяжелых бетонах рекомендуется при применении цемента более высоких марок или классов это необходимо для получения проектного класса бетона по прочности на сжатие.

Результаты применения кислой золы уноса в бетонных смесях показали в Дальневосточном государственном университете путей и сообщений в городе Хабаровск. В данном исследовании было выявлено, что зола-уноса выполняет роль подложки, на которой активизируется формирование кристаллогидратов при гидратации цемента. Также было установлено, что при оптимальной замене песка золой-уноса прирост прочности бетона составил 70-150 %.

В Московском институте коммунального хозяйства и строительства исследовали влияние высокоосновной золы-уноса на свойства бетона. Результаты исследования показали, что применение высокоосновной золы-уноса в составной части бетона имеют морозостойкость и деформативные свойства на уровне обычных портландцементных бетонов.

В научно-исследовательском институте транспортного строительства были проведены исследования на тему «Бетонные смеси высокой подвижности с золой-уноса для транспортного строительства». Разработана технология производства высокоподвижных бетонных смесей с применением золы-уноса для условий современного бетонного завода. Введение золы-уноса как компонента бетонной смеси позволило снизить коэффициент вариации прочности бетона с 7,9 до 5,7%. Результаты исследований внедрены при производстве бетонных смесей на бетонном заводе ООО «Дельта Строй»,

которые нашли широкое практическое применение при строительстве транспортных сооружений.

В Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова были проведены исследования в области разработки технологии золопортландцемента из высококальциевых зол ТЭЦ с обеспечением деструктивной безопасности материалов. В данной работе было произведено сравнение прочностных свойств цементно-зольных вяжущих, изготовленных по разным технологическим схемам и найдены оптимальные параметры технологии ЗПЦ. По результатам работы было определено, что наиболее эффективным является получение золопортландцемента совместным помолом ПЦ и 30-35 % высококальциевой золы с затратами энергии на помол 75-100 % от энергии на стандартный помол клинкера и двуводного гипса для получения портландцемента. Также в работе определили, что введение в состав золопортландцемента минеральной добавки, связывающей известь, в частности, микрокремнезема, позволяет не только устраниить избыточные деформации расширения, но и повысить прочность вяжущего и тяжелого бетона на его основе в среднем на 15-20 %.

## **2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

### **2.1 Исходные данные к лабораторному эксперименту**

Лабораторные исследования проводились в лаборатории Schlumberger по стандарту API. API стандарты – система стандартов разработанная некомерческой организацией American Petroleum Institute (Американский Институт Нефти) призванная упорядочить процессы в добыче и переработке нефти. API акредитованна Американским Национальным Институтом Стандартов (American National Standards Institute (ANSI). Стандарты API способствуют повышению безопасности, взаимозаменяемости оборудования и процессов. Благодаря использованию проверенных, одобренных специалистами решений, API стандарты позволяют уменьшить затраты на обеспечение совместимости систем. Совместно с Программой Качества API множество этих стандартов формирует базу для системы сертификации API.

Для исследования была принята зола-уноса энергетического комплекса Красноярска и строительная зола. Красноярская электростанция работает на буром угле Ирша-Бородинского разреза Канско-Ачинского угольного бассейна. Канско-Ачинский угольный бассейн расположился в нескольких сотнях километров к востоку от Кузбасса на территории Красноярского края и частично в Кемеровской и Иркутской областях. Добываемые бурые угли относятся к группе 2Б. Зольность бурых углей 6-12 %, средняя влажность 35 %, плотность около 1,5 т/м<sup>3</sup>, теплотворная способность 2800-3800 ккал/кг, содержание общей серы 0,3-1,0 %. В золе преобладает CaO в концентрациях 25-61 %, концентрации токсичных и радиоактивных малых элементов незначительны. Показатели качества бурых углей: содержание влаги 21-44%, зольность 7-14%, серы 0,2-0,8%; выход летучих веществ 46-49%; теплота сгорания рабочего топлива 11,7-15,7 МДж/кг (2800-3750 ккал/кг), горючей массы 27,2-28,2 МДж/кг (6500-6750 ккал/кг).

Золоотвалы тепловых электрических станций являются серьезными источниками загрязнения окружающей среды, в первую очередь – атмосферного воздуха.

В засушливые периоды года происходит загрязнение атмосферного воздуха в результате ветровой эрозии поверхности золоотвала. Решением проблемы накопления отходов производства является разработка новых, альтернативных способов применения золы. Одним из способов является применение золы-уноса при производстве бетона путем замены части заполнителя в цементных растворах.

## **2.2 Описание и состав тестируемых цементных растворов**

Для исследования были приняты цементные растворы со следующим составом:

- бленд 1:
- бленд 2

Портландцемент – гидравлическое вяжущее вещество, получаемое путём совместного помола цементного клинкера, гипса и добавок, в составе которого преобладают силикаты кальция (до 80 %).

Портландцемент получают путем соединения мелкоизмельченного клинкера с небольшим объемом гипса, который ускоряет процесс схватывания смеси. При производстве, в зависимости от предъявляемых к смеси требований, добавляются различные добавки, повышающие устойчивость материала к воздействиям негативных факторов.

Основными характеристиками портландцемента являются:

- удельный вес, зависящий от степени уплотнения состава. Для насыпных смесей составляет 1100 кг/м<sup>3</sup>, для уплотненных достигает величины 1600 кг/м<sup>3</sup>;
- гранулометрический состав, характеризующий тонкость цементной фракции и качество помола. Параметры влияют на эксплуатационные

характеристики, интенсивность твердения раствора. Усредненный размер частиц цемента составляет порядка 40 микрон, что обеспечивает необходимую прочность и время твердения;

- потребление воды, влияющее на способность массива впитывать определенный объем жидкости. Недостаток влаги снижает прочность, а излишек – вызывает расслоение цементной массы. Согласно проверенной рецептуре, для замеса вводится 25-28 процентов воды от общего объема смеси;

- продолжительность схватывания, регламентированная стандартом, составляющая до 45 минут после смешивания с водой. Продолжительность окончательного твердения зависит от температурного режима и замедляется в зимний период;

- высокие прочностные характеристики, позволяющие воспринимать сжимающие нагрузки, что отражается в обозначении портландцемента.



Рисунок 2 – Используемый портландцемент

Песок - это скопление частиц горных пород и минералов, от 0,05 мм до 1-2 мм в диаметре, лишенных цементирующего вещества и потому не связанных, рыхлых, обладающих минимальными силами внутреннего сцепления. К

Химическим свойствам песка можно отнести устойчивость данного материала к большинству видов внешнего агрессивного воздействия.

*Кислотоупорность.* Песок достаточно инертно относится к воздействию кислот, щелочей и других подобных веществ

*Огнеупорность.* Вплоть до температуры +550 градусов по Цельсию он никак не изменяется.

*Морозоустойчивость.* Вещество очень хорошо показывает себя при низких температурах. Свойства его не изменяются.



Рисунок 3 – Используемый для эксперимента песок

Гидроксиэтилцеллюлоза (НЕС) – моногликоловый эфир целлюлозы. Поскольку этот полимер неионогенный, он эффективно снижает фильтрацию и повышает вязкость растворов.

НЕС это порошок, имеющий практически белый цвет, не имеющий запаха и вкуса, растворим в воде разных температур, при этом образует гелиевую консистенцию. Образующийся вязкий раствор не вступает в реакцию с анионами и катионами, а также является стабильным ( $\text{pH}=2-12$ ).

НЕС получают взаимодействием очищенной целлюлозы с гидроксидом натрия. Атомы водорода заменены гидроксиэтил группами, что приводит к водорастворимости полимера. НЕС широко применяется в строительстве, входит в состав гипса, цемента, извести, органической штукатурки, плиточного клея, и других строительных растворов.



Рисунок 4 – Используемая для эксперимента гидроксиэтилцеллюлоза

Строительная зола (В436) – тонкодисперсный материал с небольшими размерами частиц. В ней находится до 6 % несгоревшего до конца вещества и железо.

Зола-уноса – это несгораемый остаток минерального происхождения, который образуется в процессе горения твердого топлива на тепловых электростанциях. Для исследования была принята зола-уноса энергетического комплекса города Красноярска, которая является высококальциевой (общее содержание оксида кальция ( $\text{CaO}$ ) более 10%).

Высококальциевые золы имеют вяжущие свойства и являются многофазными материалами. Влияние на вяжущие свойства оказывают состав и соотношение фаз золы. Качественный баланс фаз позволяет получать

пределенную гидравлическую активность и улучшать химические и физические свойства материала. Получение оптимального содержания вяжущих материалов возможно в случае хорошего изучения гидравлической активности фаз и механизма их взаимодействия.



Рисунок 5 – Высококальциевая зола уноса ТЭЦ

### 2.3 Генерирование блендов

Для проведения эксперимента и получения растворов использовалась программа LabDB – это лицензионная программа помогает не только рассчитать бленд, но и позволяет заполнять всё проведенные тесты для последующего включения их в отчёт, дополнительно показывает содержание твердых частиц (насколько раствор будет текучим).

Таблица 1 – Основные характеристики используемых материалов

Основные характеристики	Портландцемент G	Песок	НЕС	Зола-уноса ТЭЦ	Строительная зола
Плотность кг/л	3.20	1,25	1.38	3.38	2.20
Основное свойство	Наполнитель	Наполнитель	Контроль водоотдачи	Наполнитель	Наполнитель Стабилизация р-ра
Рабочая температура	10-100 C°	10-150 C°	10-100 C°	0-120 C°	0-120 C°
Совместимость	Совместим со всеми добавками				
Вид добавки	Специально получаемый	Специально получаемый	Специально получаемый	Отход	Отход
Плотность насыпная кг/м <sup>3</sup>	1500	1250	350	1380	680
Плотность абсолютная кг/л	3.20	1,35	1.38	3,37	2.20
Активность	Химически активный				
Рекомендуемые концентрации	0-100%	20-30%	0.1-1.5%	20-30%	2-20%
Цвет	Серый	Желтый	Белый	Серый	Серый
Запах	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет

В исследовании было рассчитано четыре бленда, для того чтобы сравнить прочностные характеристики получаемого бетона. Бетон, содержащий золу-уноса ТЭЦ должен отвечать требованиям установленными стандартами ГОСТ 7473-2010 Смеси бетонные. Технические условия. Настоящий стандарт

распространяется на готовые для применения бетонные смеси тяжелых, мелкозернистых и легких бетонов на цементных вяжущих (далее - бетонные смеси), отпускаемые потребителю для возведения монолитных и сборно-монолитных конструкций или используемые на предприятиях для изготовления изделий и сборных бетонных и железобетонных конструкций.

Стандарт содержит требования к технологическим характеристикам бетонных смесей, процедурам контроля их приготовления, оценке соответствия показателей их качества, а также количеству бетонной смеси, отпускаемой потребителю.

Состав первого и второго блендов содержит строительную золу и получаемый бетон отвечает всем требованиям стандартов (Таблицы 2, 3).

Таблица 2 – Состав первого бленда

Компонент	Количество на 600 мл, в граммах
Цемент G	295,64
Строительная зола	37,12
HEC	2,40
Вода	420,36

Таблица 3 – Состав второго бленда

Компонент	Количество на 600 мл, в граммах
Песок	115,34
Цемент G	192,54
Строительная зола	37,12
HEC	2,40
Вода	420,36

В составе третьего и четвертого блендов присутствует высококальциевая зола-уноса энергетического предприятия, остальные компоненты остались прежними (Таблицы 4, 5).

Таблица 4 – Состав бленда, содержащего золу-уноса ТЭЦ

Компонент	Количество на 600 мл, в граммах
Цемент G	294,76
Зола-уноса ТЭЦ	38,22
HEC	2,36
Вода с месторождения	434,725

Таблица 5 – Состав бленда, содержащего золу-уноса ТЭЦ

Компонент	Количество на 600 мл, в граммах
Песок	110,54
Цемент G	196,78
Зола-уноса ТЭЦ	38,22
HEC	2,36
Вода с месторождения	434,725

Для замешивания растворов применялся миксер постоянной скорости Chandler Engineering (модель 3260), который обеспечивает все необходимые функции для затворения цементного раствора в соответствии со стандартом API.

Замешивание блендов происходило на 12000 оборотах в минуту, а перед этим закидыванием за 15 секунд на 4000 оборотах.



Рисунок 6 – Миксер постоянной скорости Chandler Engineering  
(модель 3260)

## 2.4 Реологические испытания образцов

Бетонной смесью называют рационально составленную и тщательно перемешанную смесь компонентов бетона (вяжущее, вода, мелкий и крупный заполнители) до начала процессов схватывания и твердения.

Каждый из этих компонентов влияет на реологические свойства смеси. По своим свойствам бетонная смесь занимает промежуточное положение между вязкими жидкостями и твердыми телами.

Бетонную смесь удобно рассматривать как систему, состоящую из двух компонентов: цементного теста и заполнителя. Цементное тесто является основным структурообразующим компонентом в составе, которого входят цемент, вода и в ряде случаев тонкомолотые минеральные добавки. Чем больше в цементном тесте воды, тем пластичнее тесто и соответственно пластичнее бетонная смесь. При введении заполнителя в цементное тесто слои теста прилегающие к поверхности заполнителя теряют свою подвижность, смесь

становится менее пластичной. Влияние заполнителя возрастает с увеличением его содержания.

Одно из основных свойств бетонной смеси — тиксотропия — способность разжижаться (т. е. приобретать свойства жидкого тела) при периодически повторяющихся механических воздействиях (например, вибрации) и вновь загустевать при прекращении этого воздействия. Механизм тиксотропного разжижения заключается в том, что при вибрации силы внутреннего трения и сцепления между частицами уменьшаются и бетонная смесь становится текучей. Это свойство широко используют при укладке и уплотнении бетонной смеси.

Целью данного испытания являлась исследования реологии двух образцов при различных условиях течения.

Для определения вязкости использовался вискозиметр прямой индикации Модели 3500.



Рисунок 7 – Вискозиметр прямой индикации Модели 3500

Принцип действия вискозиметра основан на определении напряжения сдвига при различных скоростях сдвига. Данные вискозиметр, соответствует спецификации 10 стандарта API. Прибор универсален для применения в исследовательских, промысловых и мобильных лабораториях, осуществляющих исследование и контроль качества продукции.

Вискозиметры моделей 3500 измеряют вязкость, создавая заданную скорость сдвига в растворе в рамках затрубного пространства между бобом и ротором. Величина сдвига, создаваемого в контролируемой среде, измеряется путём углового смещения боба. Угловое смещение позволяет определить по шкале показание, соответствующее вязкости раствора.

Напряженно-деформированное состояние тела в общем случае является трехмерным и описать его свойства с использованием простых моделей нереально. Однако в тех редких случаях, когда деформируются одноосные тела, поведение материала наглядно и просто можно смоделировать простейшими структурными элементами. Реологическими моделями пользуются также при изучении механических свойств полимеров, внутреннего трения в твердых телах и других свойств реальных тел.

Основные реологические модели:

- идеально-вязкая жидкость Ньютона. Идеально-вязкая жидкость характеризуется тем, что в ней напряжения пропорциональны скорости деформации. Вязкое течение происходит под действием любых сил, как бы малы они не были; однако скорость деформации снижается при уменьшении сил, а при их исчезновении обращается в ноль. Для таких жидкостей вязкость, являющаяся константой, пропорциональна напряжению сдвига. Закон Ньютона описывает поведение многих низкомолекулярных жидкостей при сдвиге и продольном течении. Механическая модель ньютоновской жидкости представляет собой демпфер, состоящий из поршня, который перемещается в цилиндре с жидкостью. При перемещении поршня жидкость через зазоры между поршнем и цилиндром протекает из одной части цилиндра в другую. При этом сопротивление перемещению поршня пропорционально его скорости;

- Бингамовская модель вязкопластичной жидкости. Это одна из наиболее старых моделей, которая используется до сих пор. Модель Бингама описывает реологические свойства жидкости, в которой требуется конечная сила для инициации потока (ДНС) и которая затем имеет постоянную вязкость при увеличивающейся скорости сдвига (пластическая вязкость);

- модифицированный степенной закон (модель Гершеля-Балкли). Применяется для учета напряжения, необходимого для инициации движения жидкости (предела текучести). Модель не в полной мере описывает реологические свойства цементных растворов при низких скоростях сдвига, прежде всего потому, что не предсказывает существование характерного для цементных растворов предела текучести;

- псевдопластичные модели. Такие жидкости характеризуются тем, что они не обнаруживают предела текучести. Псевдопластичность – свойство, при котором вязкость жидкости уменьшается при увеличении напряжений сдвига.

Формулы рассчитывающие пластическую вязкость и динамическое напряжение сдвига были рассчитаны автоматически в программе LabDB. При стандартном наборе, скорость сдвига  $170 \text{ c}^{-1}$  соответствует  $100 \text{ мин}^{-1}$ , и соответственно пластическая вязкость считается по формуле:

(1)

где  $P_v$  – пластическая вязкость [ $\text{cP}$ ];

– скорость сдвига [ $\text{c}^{-1}$ ];

- константа пружины, табличное значение.

Раствор, содержащий строительную золу:

Раствор, содержащий строительную золу (с песком):

Раствор, содержащий золу-уноса ТЭЦ:

Раствор, содержащий золу-уноса ТЭЦ (с песком):

Формула расчёта динамического напряжения сдвига:

(2)

Раствор, содержащий строительную золу:

\_\_\_\_\_

Раствор, содержащий строительную золу (с песком):

\_\_\_\_\_

Раствор, содержащий золу-уноса ТЭЦ:

\_\_\_\_\_

Раствор, содержащий золу-уноса ТЭЦ (с песком):

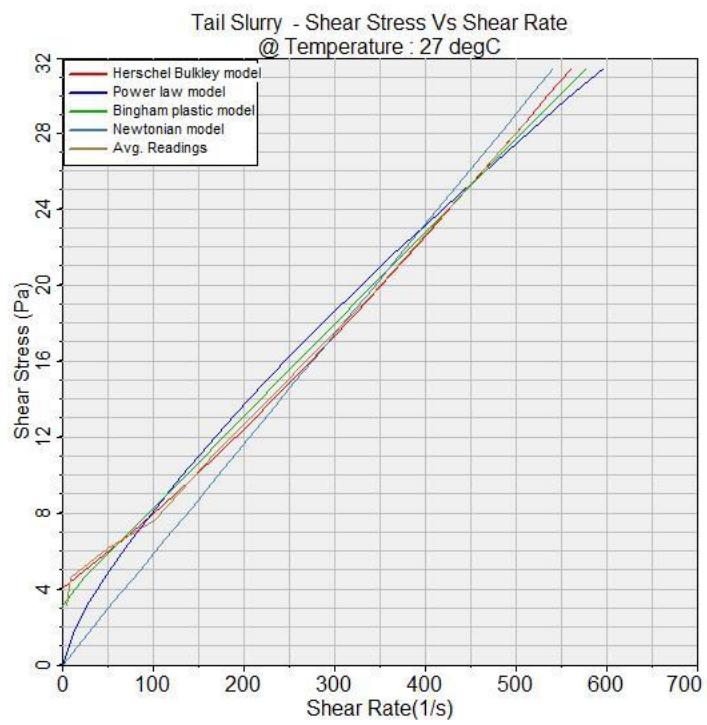


Рисунок 8 – Реологические модели раствора, содержащего строительную золу

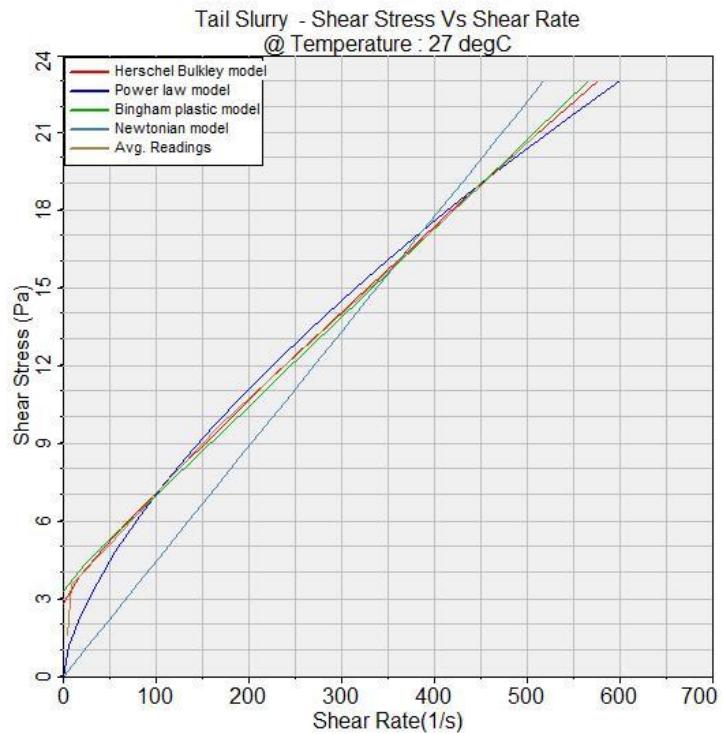


Рисунок 9 – Реологические модели раствора, содержащего строительную золу (с песком)

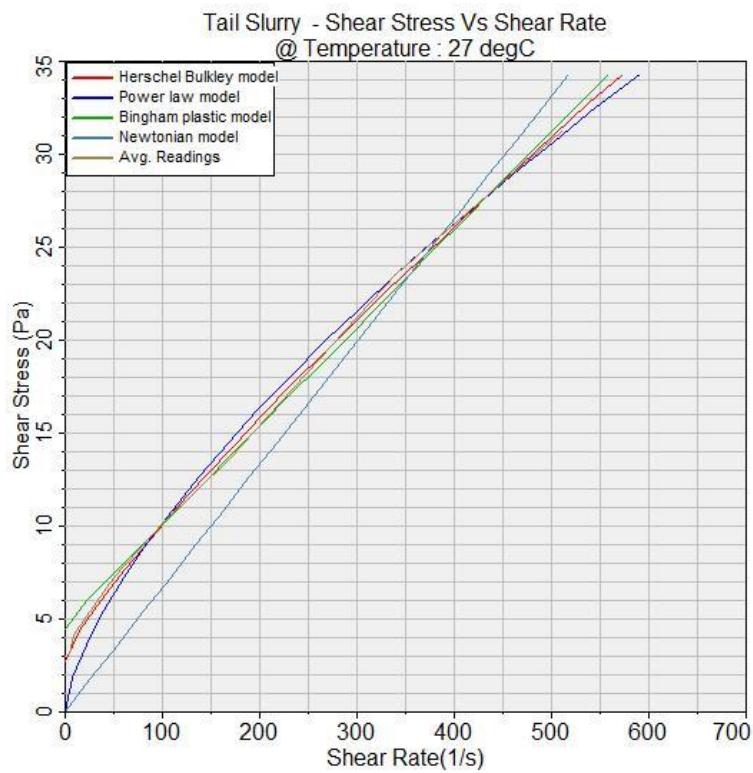


Рисунок 10 – Реологические модели раствора, содержащего золу-уноса ТЭЦ

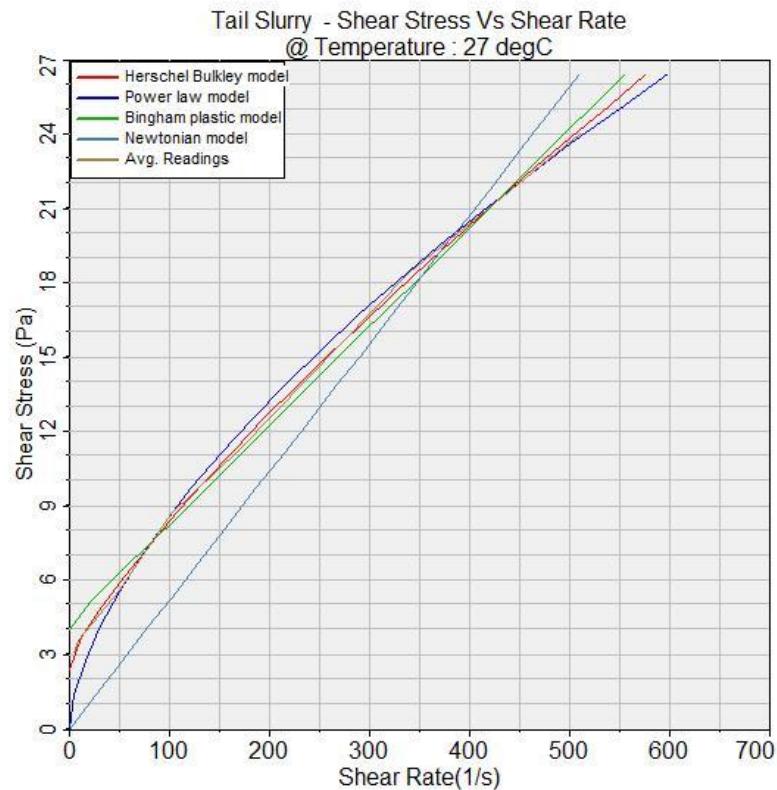


Рисунок 11 – Реологические модели раствора, содержащего золу-уноса ТЭЦ (с песком)

Таблица 6 – Результаты испытаний реологии.

Скорость Rpm	Раствор, содержащий строительную золу Па	Раствор, содержащий строительную золу (с песком) Па	Раствор, содержащий золу-уноса ТЭЦ, Па	Раствор, содержащий золу-уноса ТЭЦ (с песком), Па
300	47,0	61,0	41,0	56,0
200	36,0	46,0	30,0	38,0
100	22,0	29,0	19,0	22,0
60	17,0	20,0	14,0	15,0
30	11,0	14,0	10,0	12,0
6	7,0	8,0	7,0	9,0
3	6,0	6,0	3,0	6,0
Пластическая вязкость сП	37,5	48,0	33,0	51,0
Динамическое напряжение сдвига Па	9,5	13,5	5,0	8,0

## 2.5 Определение прочности на сжатие

Определение прочности при сжатии в соответствии с требованиями стандартов API/ISO предполагает испытание образцов цемента кубической формы (размером 5 на 5), выдержаных в воде в заданных условиях (температура и давление) в течение определенного периода времени.

Стандарты регламентируют применение двух типов ванн или резервуаров для обработки образцов цемента, помещенных в специальные формы, в воде:

- ванна (термостат) для обработки при атмосферном давлении (без приложения давления) и температурах до 66°C (150°F), оснащенная мешалкой или системой циркуляции;

- ванна (автоклав) для обработки под давлением (рисунок 12), способная поддерживать давление  $20,7 \text{ МПа} \pm 0,345 \text{ МПа}$  при соответствующей конечной температуре испытания.

После извлечения из охлаждающей ванны с водой (при температуре  $27^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$  ( $80^\circ\text{F} \pm 5^\circ\text{F}$ )) образцы цементного камня сразу же помещают в испытательную машину для определения прочности при сжатии.

Скорость нагружения образцов прочностью выше 3,5 МПа (500 фунтов на кв.дюйм) должна быть  $71,7 \text{ кН} \pm 7,2 \text{ кН}$  в минуту. Для образцов прочностью 3,5 МПа и ниже скорость нагружения должна быть  $17,9 \text{ кН} \pm 1,8 \text{ кН}$  в минуту.

Давление в камерах всех моделей создается водой при помощи насоса высокого давления с пневматическим приводом.

В исследовании, 2 образца, содержащие золу-уноса ТЭЦ и 2 образца, содержащие строительную золу помещались в ванну (автоклав) для обработки под давлением на 48 часов, с конечной температурой  $27^\circ\text{C}$ , 2 образца, содержащие строительную золу и 2 образца, содержащие золу-уноса ТЭЦ в холодильную камеру до конечной температуры  $13^\circ\text{C}$ .

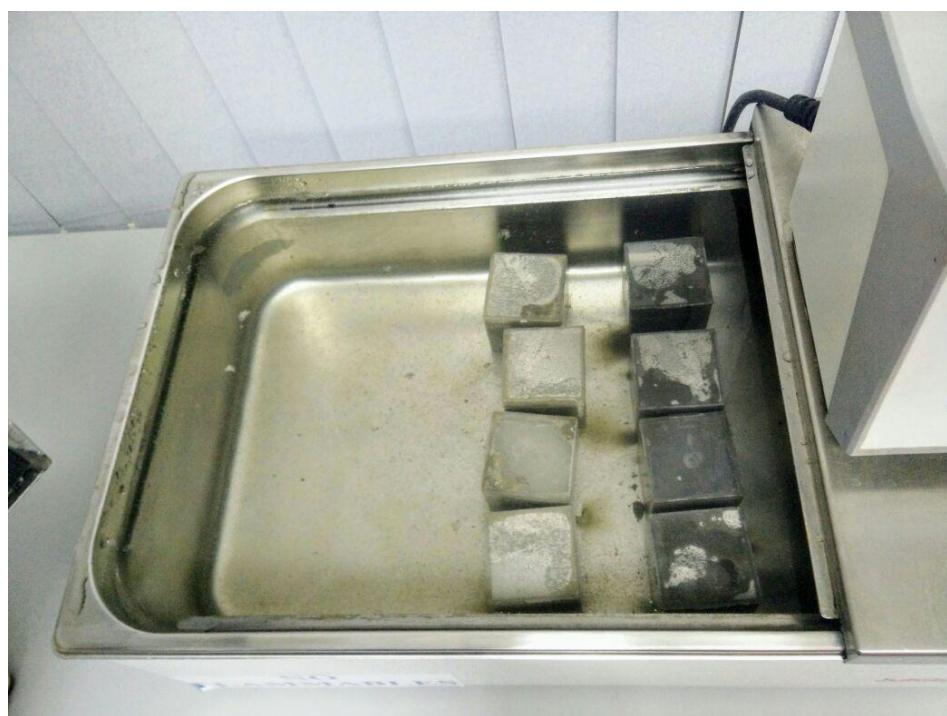


Рисунок 12 – Ванна (автоклав), для обработки образцов под давлением Тестер прочности на сжатие Chandler Engineering Модель 4207D (рисунок 13) с цифровым управлением незаменим при испытании цемента на прочность.

Данный прибор представляет собой автоматический гидравлический пресс с цифровым управлением предназначенный для испытания предела прочности при сжатии стандартных цементных кубиков размером 2 дюйма в точном соответствии с требованиями Спецификации 10A стандарта API или ISO10426-1.

Модель тестера прочности на сжатие 4207D включает силовую раму в сборе и отдельную электронную систему управления – гидроэнергетическую систему. Размеры прибора позволяют использовать его в лаборатории в виде напольного измерительного прибора. Разделение двух базовых компонентов тестера позволяет устанавливать силовую раму в безопасном месте и на безопасном расстоянии от сотрудников лаборатории. Силовая рама оборудована защитным стеклом из поликарбоната и защитной блокировкой дверцы. Данная модель тестера также имеет цепь аварийной защиты от избыточного нагрева гидравлического масла.

Прибор для испытания предела прочности при сжатии Chandler Engineering Модель 4207D отличается простотой в эксплуатации благодаря удобному расположению рабочих органов управления на электронном блоке управления. Простота управления и дополнительная возможность автоматической регистрации данных теста возможны благодаря совместимости тестера прочности на сжатие Модель 4207D с программным обеспечением Chandler Engineering - Система сбора данных и управления Модель 5270.

Испытания цемента на сжатие необходимо по ряду причин: для установления прочности по программе качества цементного завода, определение прочности в соответствии с руководящими документами, обеспечение контроля требуемой прочности для применения в скважинных работах, и тестов качества для присвоения монограммы API произведенного цемента.

В прошлом многие измерения прочности на сжатие производились с помощью ручного насоса для создания нагрузки на образец. Нагрузка, производимая ручным насосом нестабильна, неоднородна, и как результат

давала широкий разброс результатов – создавая трудности получения точных измерений истинной прочности на сжатие. Тестер прочности на сжатие Chandler Engineering Модель 4207D.

Ошибки оператора минимизированы простотой панели и удобным расположением средств управления. Работа очень проста. Когда прибор включен переключателем с панели, он находится в безопасном рабочем режиме, потому что для начала любой работы необходимо нажать кнопки управления на панели. Тест начинается с помещения образца в пресс. Затем, когда запущена программа, пресс, зажмет образец с очень малым усилием. Далее, гидравлическая система автоматически будет нагружать образец с выбранным усилием до тех пор, пока Оператор не отпустит кнопку RUN или до разрушения образца. Прочность на сжатие образца считывается с цифрового дисплея датчика по принципу «задержки пикового показания».



Рисунок 13 – Прибор для испытания предела прочности при сжатии Chandler Engineering Модель 4207D

В таблице 7 и 8 приведены результаты испытания прочности при сжатии, с конечными температурами 27°C и 13°C

Таблица 7 – Результаты испытания прочность при сжатии при температуре 27°C

	Строительная зола	Строительная зола (с песком)	Зола-уноса ТЭЦ	Зола-уноса ТЭЦ (с песком)
Площадь куба см <sup>2</sup>	26,01	25,5	25	25,5
Прочность МПа	28,45	27,48	30,1	31,46

Таблица 8 – Результаты испытания прочность при сжатии при температуре 13°C

	Строительная зола	Строительная зола (с песком)	Зола-уноса ТЭЦ	Зола-уноса ТЭЦ (с песком)
Площадь куба см <sup>2</sup>	24,5	25	24,5	25
Прочность МПа	18,61	19,31	20,55	21,72

## 2.6 Определение процента несвязной воды

В соответствии с требованиями стандартов API 10B-2 для определения процента несвязной воды необходимо использовать цилиндр вместимостью 250 мл. Перед заполнением цилиндра приготовленный цементный раствор перемешивают в консистометре в течение заданного времени, при этом поддерживают температуру ванны в течение всего периода перемешивания.

Атмосферный консистометр модель 165AT (рисунок 14) разработан для приготовления цементных растворов и дальнейшего тестирования на различные параметры в строгом соответствии со Спецификацией API 10A/ISO 10426-1:2000. Испытания цементных смесей представляют собой измерения времени загустевания, вязкости, реологических параметров, водоотдачи, содержания свободной воды и других параметров.



Рисунок 14 – Атмосферный консистометр модель 165АТ

Консистометр 165АТ обеспечивает простой метод приготовления цементных смесей для проведения подобных тестов. Консистометр 165АТ используется в лабораториях, участвующих в программах исследования цементирования скважин, тестирования цементных добавок, программах контроля качества цемента, в исследованиях по заказу нефтяных компаний и в полевых лабораториях.

Консистометр атмосферного давления состоит из вращающегося со скоростью  $150 \text{ об/мин} \pm 15 \text{ об/мин}$  ( $2,5 \text{ об/с} \pm 0,25 \text{ об/с}$ ) контейнера с цементным раствором, оснащенного стационарным лопастным устройством и механизмом потенциометра, жидкостной ванны с контролируемой температурой. Лопасти и все части контейнера, контактирующего с цементным раствором, должны быть изготовлены из коррозионно-стойкого материала.

После кондиционирования раствор помещают в цилиндр, затем накрывают верх, что бы предотвратить испарения флюида. Тест стоит в течении 2 часов, после, выделившаяся свободная вода собирается шприцом и рассчитывается по формуле:

где — коэффициент водоотделения;

$V_F$  — объём свободной воды мл;

$V_S$  — начальный объём суспензии мл.

Раствор, содержащий строительную золу:

—

Раствор, содержащий золу-уноса ТЭЦ:

K=—

### **3 РАСЧЕТ СОСТАВА БЕТОНА И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВВЕДЕНИЯ ЗОЛЫ-УНОСА**

#### **3.1 Порядок расчета состава бетона**

Состав бетонной смеси выражают двумя способами:

1 способ – соотношение по массе между цементом, песком, гравием (или щебнем) с обязательным указанием водоцементного отношения и активности цемента. Количество цемента принимает за 1, поэтому соотношение между составными частями бетона записывают в виде 1:х:у с указанием В/Ц (например, 1:2:4 по массе при В/Ц=0,6);

2 способ – расход материалов по массе (кг) на 1м<sup>3</sup> уложенной и уплотненной бетонной смеси, например: цемента – 260; песка – 700; щебня – 1200; воды – 160; итого 2320 кг.

Существует экспериментальный состав бетона, который устанавливается для сухих материалов, и производственный (полевой), такой состав определяется для материалов в естественно-влажном состоянии. Экспериментальный состав бетона устанавливают расчетно-экспериментальным путем. Состав бетона предварительно рассчитывают по абсолютным объемам, применяя формулы для определения расхода воды, цемента, песка, щебня (гравия), после – уточняют пробными затворениями.

Рекомендуется следующий порядок расчета состава бетона.

1. Определение водоцементного или цементно-водного отношения в зависимости от необходимой прочности, времени и условия затвердевания бетона. Водоцементное или цементно-водное отношение устанавливают путем предварительных испытаний, которые определяют зависимость прочности бетона от данного фактора и активности цемента (с использованием заполнителей) или ориентировочно по формулам:

для обычного бетона при  $B/C > 0,4$  ( $C/B < 2,5$ )

---

(4)

для высокопрочного бетона при  $B/C < 0,4$  ( $C/B > 2,5$ )

---

(5)

Значения коэффициентов и определяют из таблицы 9.

Таблица 9 – Значения коэффициентов и

Материалы для бетона		
Высококачественные	0,65	0,43
Рядовые	0,60	0,40
Пониженного качества	0,55	0,37

Формулы (4) и (5) получены в результате аппроксимации экспериментальной зависимости, показанной на рисунке 15:

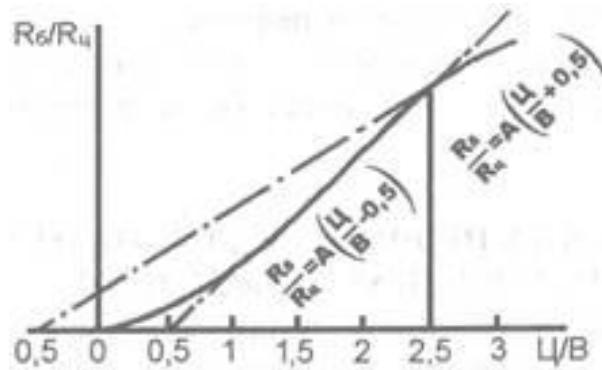


Рисунок 15 – График аппроксимации экспериментальной зависимости

При расчете состава бетона иногда необходимо учитывать требования к нему по морозостойкости, водонепроницаемости, прочности на растяжение при изгибе и пр. в этом случае для назначения  $B/C$  используют соответствующие зависимости, но способ определения состава бетона в принципе сохраняется.

2. Определение расхода воды в зависимости от требуемой подвижности бетонной смеси на основании результатов предварительных испытаний или ориентировочно по графикам на рисунке 15. При этом необходимо учитывать водопоглощение крупного заполнителя, если оно более 0,5% по массе. Кроме того, графики на рисунке 15 составлены для расхода цемента до 400 кг/м<sup>3</sup> с применением гравия и песка средней крупности с водопотребностью 7%. В случае использования других заполнителей необходимо вносить соответствующие поправки, указанные в примечании к графикам.

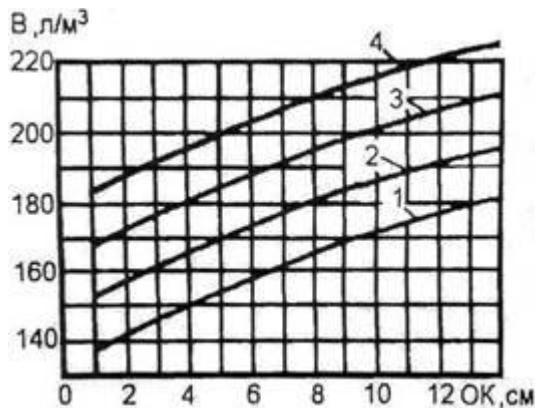


Рисунок 16 – Графики для определения водопотребности в пластичной бетонной смеси, изготовленной с применением портландцемента, песка средней крупности (водопотребность 7%) и гравия наибольшей крупности: 1 - 80 мм; 2 - 40 мм; 3 - 20 мм; 4 - 10 мм;

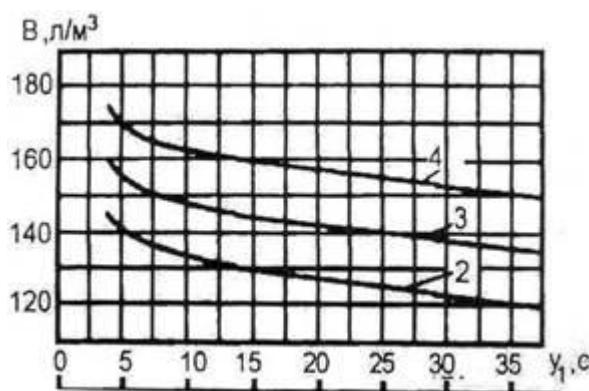


Рисунок 17 – График для определения водопотребности в жесткой бетонной смеси, изготовленной с применением портландцемента, песка средней крупности (водопотребность 7%) и гравия наибольшей крупности: 1 - 80 мм; 2 - 40 мм; 3 - 20 мм; 4 - 10 мм;

– удобоукладываемость по стандартному вискозиметру.

Примечания: Если применяют мелкий песок с водопотребностью выше 7%, то расход воды увеличивают на 5л на каждый процент увеличения водопотребности; при применении крупного песка с водопотребностью ниже 7% расход воды уменьшают на 5л на каждый процент уменьшения водопотребности. При применении щебня расход воды увеличивают на 10л. При применении пущолановых цементов расход воды увеличивают на 15-20л. При расходе цемента выше 400 кг расход воды увеличивают на 10л на каждые 100кг цемента)

3. Определение расхода цемента:

(6)

Если расход цемента на 1м<sup>3</sup> бетона окажется ниже допускаемого по СНиПу (таблица 10), то следует увеличить его до требуемой нормы или ввести тонкомолотую добавку. Последнюю применяют в случае, если активность цемента слишком высока для бетона данной марки.

4. Определение коэффициента раздвижки  $\alpha$  для пластичных бетонных смесей по таблице 10.

Таблица 10 – Оптимальные значения коэффициента  $\alpha$  для пластичных бетонных смесей ( )

Расход цемента, кг/м <sup>3</sup>	Оптимальные значения коэффициента $\alpha$ при В/Ц				
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
250	-	-	1,26	1,32	1,38
300	-	1,3	1,36	1,42	-
350	1,32	1,38	1,44	-	-

400	1,4	1,46	-	-	-
500	1,5	1,56	-	-	-

При других значениях Ц и В/Ц коэффициент  $\alpha$  находят интерполяцией. При использовании мелкого песка с водопотребностью более 7% коэффициент  $\alpha$  уменьшают на 0,03 на каждый процент увеличения водопотребности песка. Если применяется крупный песок с меньше 7%, коэффициент  $\alpha$  увеличивают на 0,03 на каждый процент уменьшения .

Проведенные результаты исследований, установившие влияние различных факторов на коэффициент  $\alpha$ , показывают, что для жестких бетонных смесей при расходе цемента Ц менее 400 кг/м<sup>3</sup>  $\alpha$  следует принимать равным 1,05-1,15 (в среднем 1,1). Меньшее значение принимают в случае использования мелких песков.

Расход цементного теста вычисляя по формуле:

(7)

где      плотность цемента

5. Определение расхода щебня Щ или гравия по формуле:

— — (8)

6. Определение расхода песка по формуле:

— — (9)

Формулы (8), (9) получены на основании решения системы уравнений, составленной из условий абсолютных объемов

— — — (10)

и обеспечения требуемой раздвижки зерен щебня

— — — (11)

где  $\rho_c$ ,  $\rho_s$ ,  $\rho_g$ ,  $\rho_{sh}$  - соответственно расходы цемента, воды, песка, щебня,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\rho_c^*$ ,  $\rho_s^*$ ,  $\rho_g^*$  - истинные плотности цемента, песка, щебня,  $\text{кг}/\text{l}$ ;

$\phi$  - пустотность щебня;

$\alpha$  - коэффициент раздвижки зерен щебня раствором;

$\gamma$  - насыпная плотность щебня,  $\text{кг}/\text{l}$ .

Первое уравнение выведено из условия, что сумма абсолютных объемов компонентов бетона равна  $1\text{м}^3$  плотного бетона без вовлеченного воздуха, а второе - из условия, что цементно-песчаный раствор должен заполнить все пустоты между щебнем (в стандартно-рыхлом состоянии) с некоторой раздвижкой его зерен, что необходимо для получения удобообрабатываемой бетонной смеси и хорошего связывания зерен заполнителя в единый прочный монолит).

7. Проверка на пробных замесах подвижности (осадки конуса) или жесткость бетонной смеси, при необходимости вносят поправки в расчет состава бетона. Если применяют воздухововлекающие добавки, то количество вовлеченного воздуха учитывают при подсчете расхода песка.

### **3.2 Экспериментальная проверка состава бетона**

Для экспериментальной проверки состава бетона изготавливают пробную порцию бетонной смеси и определяют ее подвижность. Вследствие

особенностей свойств применяемого цемента и местного заполнителя осадка конуса или жесткость бетонной смеси может отличаться от заданной.

Для увеличения подвижности повышают расход воды на 5-10 %. Одновременно прибавляют 5-10 % цемента для того, чтобы не изменилось водоцементное отношение. Снова перемешивают бетонную смесь, измеряют осадку конуса и так до тех пор, пока не получат требуемых показателей подвижности.

Если при первом измерении подвижность бетонной смеси превышает заданную (например, ОК = 8 см вместо 4-5 см), то добавляют небольшое количество песка и щебня (по 5-10 %). Затем уточняют состав бетона, так как первоначальный объем порции бетонной смеси увеличивается. Для этого определяют фактическую плотность бетонной смеси при способе уплотнения, принятом в производственных условиях. Испытание проводят следующим образом: пустую форму взвешивают, проверяют ее внутренние размеры, заполняют смесью, уплотняют и вновь взвешивают.

Плотность уплотненной бетонной смеси (кг/л):

(12)

где  $m_f$  и  $m_0$  – масса формы с бетоном и пустой формы, кг;

$V_f$  – внутренний объем формы, л.

Полученное значение плотности бетонной смеси должно совпадать с расчетным (допускаемое отклонение  $\pm 2 \%$ ).

Далее устанавливают фактический объем полученной бетонной смеси в пробном замесе:

(13)

где  $\sum m_i$  – сумма масс материалов, израсходованных на пробный замес, кг;  
 $\rho_f$  – фактическая плотность уплотненной бетонной смеси, кг/л.

Зная объем полученной бетонной смеси и расход материалов на пробный замес, определяют фактический объем материалов на 1м<sup>3</sup> бетона.

Объем пробного замеса зависит от числа образцов. Если для определения прочности бетона готовят по три образца, то минимальный объем замеса принимают по таблице 11

Таблица 11 – Объемы замесов бетонной смеси в зависимости от ребер образца

Размер ребер образца, см	30	20	15	10
Объем пробного замеса, л	85	25	12	6

Из откорректированной бетонной смеси готовят контрольные образцы и затем их испытывают. На каждый срок испытания изготавливают не менее 3 образцов. Образцы формуют в разборных стальных (строганных) формах. Размеры их необходимо строго выдерживать не допуская отклонения более  $\pm 1\%$  по граням. Углы между гранями должны составлять  $(90 \pm 2^\circ)$ . Приемы укладки и уплотнения образцов должны соответствовать принятым на производстве. Укладку бетонной смеси в формы следует заканчивать не позднее, чем через 30 минут после ее приготовления.

При уплотнении бетонной смеси вибрированием форму заполняют с некоторым избытком, после чего ее вибрируют на лабораторной площадке (частота колебаний 50 Гц, амплитуда колебаний вибратора под нагрузкой 0,5 мм). Лабораторную виброплощадку можно заменить поверхностным вибратором. Продолжительность вибрирования должна определяться в соответствии с показателем жесткости , но не менее  $J + 30$ с.

Образцы в течение 2 суток хранят в формах в помещении с температурой 15-20°C, затем освобождают из форм, маркируют и до момента испытания хранят в камере с влажностью около 100% или в периодически смачиваемых

песке, опилках и т.д. перед испытанием тщательно осматривают образцы, измеряют грани, взвешивают.

При испытании прочности образец укладывают на нижнюю опорную плиту боковыми гранями. Предел прочности при сжатии бетона вычисляют с точностью до 0,1 МПа, как среднее арифметическое результатов испытания трех образцов.

Если действительная прочность бетона при сжатии отличается от заданной более чем на  $\pm 15\%$ , то следует внести корректировки в состав бетона: для повышения прочности увеличивают расход цемента (т.е. Ц/В), для снижения прочности уменьшают его.

На производстве часто применяют при приготовлении бетона влажные заполнители. Количество влаги, содержащейся в заполнителях, должно учитываться при определении действительного расхода воды. В этом случае производят корректировку состава.

Вначале определяют содержание воды в заполнителях по формулам:

(14)

(15)

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  - влажность песка и щебня (гравия).

Затем устанавливают действительный расход воды:

(16)

Поскольку часть массы влажных заполнителей составляет вода, необходимо увеличить их массу, чтобы обеспечить поступление в бетон полученной расчетом массы твердого материала. Расход песка и щебня увеличивают на массу воды, которая в них содержится, т.е. их расход в производственном составе будет соответственно равен

(17)

(18)

Расход цемента при данной корректировке состава сохраняется неизменным.

При загрузке цемента и заполнителя в бетоносмеситель их первоначальный объем больше объема получаемой бетонной смеси, т.к. при перемешивании происходит как бы уплотнение массы: зерна цемента располагаются в пустотах между зернами песка, зерна песка – между зернами щебня. Для оценки объема получаемой бетонной смеси используют так называемый коэффициент выхода бетона :

— — — (19)

где , и - насыпные плотности цемента, песка, щебня.

Влияние воды при определении коэффициента выхода бетона не учитывают, т.к. вода сразу же проливается в пустоты твердых материалов и на них первоначальный объем не влияет. Однако при определении коэффициента

для производственного состава используют плотности влажных заполнителей, т.к. последние могут заметно отличаться, особенно для песка, от плотности сухих заполнителей. Коэффициент выхода бетона зависит от состава бетона и свойств используемых материалов и колеблется от 0,55 до 0,75.

При расчете расхода материалов на 1 замес бетоносмесителя принимают, что сумма объемов цемента, песка и щебня (в рыхлом состоянии) соответствует емкости барабана бетоносмесителя. Тогда объем бетона , получаемый из одного замеса, будет равен:

(20)

где  $\gamma$  – емкость бетоносмесителя.

Расход материалов на замес бетоносмесителя определяют с учетом получаемого объема бетона.

### 3.3 Прочность бетона при сжатии

В рабочих чертежах конструкции или в стандартах на изделия обычно указывают требования прочности бетона, его класс или марку. При проектировании конструкции прочность бетона на сжатие характеризуется классами. Класс бетона определяется величиной гарантированной прочности на сжатие с обеспеченностью 0,95. Бетоны подразделяют на классы: В1, В1.5, В2, В2.5, В3.5, В5, В7.5, В10, В12.5, В15, В20, В25, В30, В35, В40, В50, В55, В60.

На производстве контролируют среднюю прочность или марку бетона. Между классами бетона и его средней прочностью имеется зависимость:

(21)

где  $f_c$  – класс бетона по прочности, МПа;

– средняя прочность, которую следует обеспечить при производстве конструкции, МПа;

– коэффициент характеризующий принятый при проектирование обеспеченность класса бетона;

– коэффициент вариации прочности бетона.

Для перехода от класса бетона В к средней прочности бетона (МПа), контролируемой на производстве для образцов 15x15x15 см (при нормативном коэффициенте вариации 13,5% и  $k_v = 1,05$ ) следует применять формулу:

(22)

Средняя прочность или марка тяжелого бетона определяется пределом прочности (МПа) при сжатии стандартных бетонных кубов 15x15x15 см, изготовленных из рабочей бетонной смеси в металлических формах и испытанных в возрасте 28 суток после твердения в нормальных условиях (температура 15-20°C, относительная влажность окружающего воздуха 90-100%). В строительстве используют следующие марки: M50, M75, M100, M150, M200, M250, M300, M350, M400, M450, M500, M600 и выше (через M 100). На производстве необходимо обеспечить среднюю прочность или заданную марку бетона. Превышения заданной прочности допускается не более чем на 15%, т.к. это ведет к перерасходу цемента.

Кубы размером 15x15x15 см применяют в том случае, когда наибольшее крупность зерен заполнителя 40 мм. При другой крупности заполнителя можно использовать кубы иных размеров, однако размер ребра контрольного образца должен быть примерно в 3 раза больше максимальной крупности зерен заполнителя. Для определения марки бетона на кубах с другими размерами вводят переходные коэффициенты, на которые умножают полученную в опытах прочность бетона (таблица 12).

Таблица 12 – Переходные коэффициенты в зависимости от размера куба бетона.

Размер куба, см	7x7x7	10x10x10	15x15x15	20x20x20
Коэффициент	0,85	0,85	1	1,05

Колебания активности цемента, его нормальной густоты, минералогического состава, свойств заполнителей, дозировки материалов, режимов перемешивания и твердения – все это приводит к неоднородности структуры бетона. Вследствие этого отдельные объемы бетона могут отличаться друг от друга в большей или меньшей степени, что зависит от свойств используемых материалов и отложенности технологического процесса. Соответственно будут и колебаться показатели свойств бетона: прочность, плотность, проницаемость, морозоустойчивость и др. для оценки однородности

бетона используют статические методы. Качество бетона определяется главным образом его средней прочностью (или соответствующим комплексом показателей) и однородностью, которая оценивается по коэффициенту вариации прочности (или др. показателей).

При контроле качества бетона по прочности с учетом его однородности проводят статистическую обработку результатов испытаний бетона за определенный период и определяют характеристики его прочности и однородности. В проектах указываются значения нормируемой прочности бетона (в проектном и промежуточном возрасте, отпускные и передаточные).

Требуемая прочность представляет собой минимально допустимое значение фактической прочности бетона в партии, при котором будет обеспечена нормируемая прочность с заданной степенью гарантии. Она устанавливается лабораториями заводов и строек в соответствии с достигнутой однородностью бетонов партии.

Фактическая прочность бетона в партии определяется как среднее значение прочности, определенные по результатам испытаний контрольных образцов или не разрушающими методами не посредственно в конструкции.

Одновременно с требуемой прочностью определяют средней уровень прочности (заданную прочность), представляющий собой среднее значение прочности бетона, устанавливаемое лабораториями заводов и строек на определенный контролируемый период в соответствии с достигнутой однородностью бетона по прочности, по которому подбирается состав бетона и которое поддерживается в производстве.

В качестве характеристике однородности бетона используют средней коэффициент вариации прочности  $u_p$  по всем партиям за анализируемый период.

Прочность бетона в партии (МПа):

(23)

где  $\bar{f}$  - единичное значение прочности бетона, МПа;

- общее число единичных значений прочности бетонов в партии.

За единичные значения принимают среднюю прочность бетона в одной серии образцов или применении не разрушающих методов контроля.

Продолжительность анализируемого периода для определения характеристик однородности устанавливают от одной недели до двух месяцев. Число единичных значений прочности бетона за этот период должно быть более 30. по результатам испытания вычисляют среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации прочности для всех видов нормируемой прочности бетона.

Для сборных конструкций допускается коэффициент для прочности бетона в проектном возрасте не вычислять, а принимать меньше на 15% по сравнению с отпускной прочности.

При числе единичных значений прочности в партии  $n > 6$ , (МПа) вычисляют по формуле:

(24)

Если , то ,

где  $\Delta f$  - размах единичных значений прочности в контролируемой партии, МПа, определяемый как разность между максимальным и минимальным единичными значениями прочности;

- коэффициент, зависящий от (таблица 13)

Таблица 13 – Значения коэффициента в зависимости от значения

Значение	2	3	4	5	6
Значение	1,13	1,69	2,06	2,33	2,50

Коэффициент вариации прочности бетона (%) в партии

(25)

Средний коэффициент вариации прочности бетона за анализируемый период

(26)

где  $\sigma_v$  - коэффициент вариации прочности в каждой  $i$ -й из проконтролированных в течение анализируемого периода партий бетона;  $n_i$  – число единичных значений прочности бетона в каждой  $i$ -й из партий бетона должно быть более 30.

Требуемую прочность бетона (отпускную, передаточную, в промежуточном и проектном возрастах) при нормировании прочности по классам вычисляют по формуле:

(27)

где  $\alpha_f$  - коэффициент требуемой прочности, принимаемый по табл. 7.5 в зависимости от коэффициента вариации  $\sigma_v$ ;  $f_{ck}$  – нормированное значение прочности бетона, МПа (отпускной, передаточной, в промежуточном и проектном возрастах), для бетона данного класса.

Средний для контролируемого периода уровень прочности  $f_{cm}$ , МПа (отпускной, передаточной, в промежуточном и проектном возрастах):

(28)

где  $\beta_f$  - коэффициент, принимаемый в зависимости от  $\sigma_v$ :

Таблица 14 – Значения коэффициента в зависимости от коэффициента вариации прочности бетона

Значения	для всех видов бетона (кроме ячеистых) и конструкций (кроме массивных гидротехнических)
6 и ниже	1.07
7	1.08
8	1.09
9	1.11
10	1.14
11	1.18
12	1.23

Средний для контролируемого периода уровень прочности , МПа (отпускной, передаточной, в промежуточном и проектном возрастах):

(28)

где – коэффициент, принимаемый в зависимости от :

Таблица 15 – Значения коэффициента в зависимости от коэффициента вариации прочности бетона

%	<6	6...7	7...8	8...10	10...12	12...14	14 >14
	1.03	1.04	1.05	1.07	1.09	1.12	1.15

Для тяжелого и легкого бетона должен приниматься не более 1,1, для плотного силикатного бетона – не более 1,13.

В начальный период до накопления необходимого для ведения статистического контроля числа результатов испытаний требуемая прочность определяется по формуле:

.

(29)

где – коэффициент, принимаемый для всех бетонов (кроме ячеистого и плотного силикатного) 0,78, для ячеистого – 0,7, для плотного силикатного – 0,75.

### **3.4 Расчёт экономической эффективности введения золы-уноса энергетического предприятия в клинкер при производстве портландцемента**

Использование золы-уноса энергетического предприятия в качестве добавки к цементному раствору позволит существенно улучшить технико-экономические показатели: увеличить производительность мельницы, снизить энергозатраты и расход мелющих тел. Для расчета применим непрерывный режим работ.

Таблица 16 – Исходные данные для расчета:

№ п/п	Показатели	До ввода золы- уноса	После ввода золы- уноса
1	Объём выпуска цемента, тыс.т.	500	
2	Полная себестоимость	330	
3	Расход электроэнергии на помол 1т. цемента, кВт ч	37	Снижение на 8%
4	Стоимость 1 кВт ч электроэнергии, руб	1,66	1,66
5	Условно-постоянные расходы на единицу выпускаемой продукции, руб.	100	
6	РСЭО на единицу продукции, руб	50	
7	Заготовительная цена за 1т мелющих тел, руб/т	100	100
8	Расход мелющих тел, кг/т	0,677	Снижение на 12%
9	Производительность мельницы, т/ч.	46	48
10	Отпускная цена устройства, тыс. руб		460
11	Коэффициент использования оборудования		0,9
12	Затраты на транспортировку и монтаж устройства, тыс.руб		10% от отпускной цены
13	Норма амортизационных отчислений на установку, %		5
14	Затраты на ремонт и эксплуатацию установки, %		10
15	Добавка зол ТЭС, в % от общего выпуска цемента		10
16	Отпускная цена 1т. цемента, руб.	350	350
17	Производительность рабочей смены, ч.	8	8

### *Расчёт изменения объёма производства продукции*

Объём производства продукции рассчитывается как в натуральном, так и в стоимостном выражении по товарной продукции.

Проектируемый выпуск продукции в натуральном выражении:

(30)

(31)

(32)

где  $-$  выпуск продукции до внедрения мероприятия, в натуральном выражении;

$-$  дополнительный выпуск продукции в результате внедрения мероприятия;

$-$  добавка золы, в %;

$-$  базовый коэффициент экстенсивного использования печи;

8760 – календарный фонд рабочего времени;

и  $-$  часовая производительность печи до и после внедрения, в т/ч.

$-$

т. клинкера

т. цемента

### *Расчёт потребностей в инвестициях на осуществление мероприятия.*

Для расчёта экономической эффективности внедряемого мероприятия необходимо определить инвестиции на его осуществление.

С финансовой и экономической точек зрения инвестиции могут быть определены как долгосрочные вложения экономических ресурсов с целью создания и получения чистой прибыли в будущем, превышающей общую начальную величину инвестиций.

Различают финансовые (портфельные) инвестиции, реальные инвестиции (инвестиции в физические активы), инвестиции в нематериальные активы.

Расчет эффективности реальных (капитальных) вложений – вложения в основной капитал и на прирост материально-производственных запасов.

Дополнительные капитальные вложения в мероприятие - определяются по формуле:

(33)

где – стоимость нового приобретённого оборудования, тыс.руб.,  
– затраты на монтаж оборудования, в % от ,  
– специальные расходы, стоимость производственных площадей, зданий, сооружений и других основных фондов, тыс.руб.,  
руб.

*Расчёт изменения себестоимости продукции по технико-экономическим факторам*

В результате внедрения мероприятия снижаются удельные нормы расхода сырья, материалов, топлива и энергии.

Экономия по электроэнергии и материалам определяется по формуле:

– (34)

где  $\Delta$ ,  $\Delta_e$  – удельные нормы расхода материалов и электроэнергии на единицу продукции до и после внедрения мероприятия соответственно;  $p_s$  – заготовительная цена на соответствующий вид сырья до внедрения мероприятия.

Экономия по электроэнергии:

Экономия по материалам:

Для определения экономии по материальным ресурсам на весь объём выпускаемой продукции необходимо рассчитанную экономию на единицу продукции умножить на весь объём выпускаемой продукции после внедрения мероприятия в натуральном выражении:

Расход материалов на 1 т. цемента:

(35)

руб.

Экономия материалов на весь выпуск:

(36)

руб.

Изменение объёма и структуры выпускаемой продукции приводит к изменению условно-постоянных расходов. К ним относятся общепроизводственные расходы, состоящие из расходов на содержание и

эксплуатацию оборудования и цеховых расходов, а также общехозяйственные расходы.

Изменение затрат по условно-постоянным расходам на единицу продукции определяется по формуле:

- (37)

где – условно-постоянные расходы в себестоимости единицы продукции по базовому варианту;

, — индексы изменения условно-постоянных расходов объёма производства соответственно.

Индекс объёма производства определяется по формуле:

(38)

Изменение (рост) текущих затрат на содержание и эксплуатацию оборудования, определяется по формуле:

(39)

где  $\alpha$  – норма амортизации на реновацию, в %;

– размер отчислений на текущий ремонт, в %;

– размер отчислений на эксплуатацию, в %.

руб.

Величина РСЭО на весь объём выпускаемой продукции после внедрения мероприятия:

(40)

руб.

Индекс изменения РСЭО определяется по формуле:

(41)

Определение изменения затрат по условно-постоянным расходам на единицу продукции:

-

(42)

-

Общее изменение себестоимости единицы продукции составит:

(43)

-

руб.

Определение общей экономии на условно-постоянных расходах:

(44)

руб.

Величина себестоимости единицы продукции после внедрения мероприятия равна:

– руб.

Расчёт изменения себестоимости продукции представлен в таблице 17.

Таблица 17 – Расчёт изменения себестоимости продукции представлен в таблице

Наименование статей затрат	Базовая		После осуществления мероприятия		Изменение затрат	
	на единицу продукци и	на весь объём продукции	на единицу продукции	на весь объём продукции	на единицу продукци и	на весь объём продукци и
Расход электроэнерги и на помол	17,02	8 305 760	15,66	7950738,6	-4,82	-690 485,6
Расход мелющих тел	67,70	33037600	59,70	30 310 287	-8,00	- 4061680,0
Условно- постоянные расходы	99,00	48312000	95,53	48501536	-8,37	- 1761753,7
РСЭО	50,00	24 400 000	50,18	24543750	0,18	+86 250

### *Оценка экономической эффективности мероприятия*

При определении экономической эффективности мероприятия необходимо рассчитать следующие показатели:

Условно-годовую экономию от внедрения мероприятия:

— (45)

— руб.

Прирост прибыли от внедрения мероприятия:

— (46)

— руб.

Период возврата дополнительных капитальных вложений – это период времени, в течение которого капитальные вложения будут возвращены за счёт доходов, полученных от реализации мероприятия:

(47)

лет

Себестоимость выпуска товарной продукции:

руб.

руб.

Рентабельность единицы продукции:

—

Таблица 18 – Основные технико-экономические показатели проекта

Наименование показателей	Условные обозначения	Значения показателей		Отклонение, +, -
		База	Проект	
Годовой выпуск продукции в натуральном выражении		488000	507710	+19710
Объём дополнительных капитальных вложений, руб.		-	+575000	-
Себестоимость единицы продукции, руб		295	289,11	- 5,89
Себестоимость годового выпуска продукции, руб.		143960000	146784030	+282 403
РСЭО на единицу прц., руб.		50	50,18	+0,18
РСЭО на весь объём, руб.		24400000	2486250	+46250
Условно-годовая экономия, руб.		-	-	-2990411,9
Период возврата дополнительных капитальных вложений, год.		-	-	0,20

Таким образом, из приведённых расчётов видно, что применение зол тепловых электростанций в производстве цемента делает данное производство более экономически выгодным. При этом достигается выпуск большего объёма цемента при меньших относительных затратах на производство. Цена за единицу продукции, т.е. за 1 тонну золоцемента, снижается на 5,89 руб., за счёт чего общая условно-годовая экономия составляет 2 9900411,9 руб.

Применение отходов энергетических предприятий в производстве строительных материалов не только стабилизирует экологическую обстановку в стране, но и делает промышленное производство более рентабельным, а значит в совокупности положительно влияет на общую экономическую обстановку в стране.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Целью научно-исследовательской работы являлась исследование воздействия золы-уноса ТЭЦ в качестве добавки на структуру и свойства цементных бетонов.

В результате выполнения работы были выполнены следующие этапы:

- выполнен литературный обзор в области использования отходов энергетического комплекса в бетонных смесях;
- изучен механизм воздействия золы-уноса энергетического предприятия на свойства бетона при замене части заполнителя высококальциевой золой-уноса;
- проведены исследования полученных клинкеров на реологические свойства, водоотделение, также определена прочность полученного образца на сжатие.

В результате сравнительного анализа была предложена композиция с отходами производства энергетического комплекса. Затем были произведены тестирование полученного бетонного раствора. Исследованы полученные образцы бетона на прочность при сжатии, время загустевания, реологические свойства, водоотделение, в соответствии с требованиями. На основании произведенных исследований можно сделать вывод, что предлагаемый образец бетона является экономически выгодным, соответствует необходимым характеристикам, а также не уступает по свойствам сопоставляемому образцу бетона.