

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Новиков Николай Владиславович



**КОМПОЗИЦИОННЫЙ БАРИТСОДЕРЖАЩИЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ  
ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ С РЕГУЛИРУЕМОЙ  
ВАРИОТРОПНОЙ ЯЧЕИСТОЙ СТРУКТУРОЙ**

2.6.17. Материаловедение

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Самченко Светлана Васильевна

Москва – 2023

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ .....  | 4  |
| ГЛАВА 1 Опыт применения баритсодержащих материалов .....  | 11 |
| 1.1 Современное состояние ядерных технологий в России и в мире .....                                    | 11 |
| 1.2 Воздействие ионизирующих излучений на материал .....  | 12 |
| 1.3 Принципы проектирования радиационно-защитных материалов .....                                       | 15 |
| 1.4 Промышленные сферы применения баритсодержащих материалов .....                                      | 18 |
| 1.5 Бетоны на основе минерального сырья барита .....  | 20 |
| 1.6 Минерально-сырьевая база барита в России и в мире .....   | 25 |
| 1.7 Цели и задачи исследования .....  | 27 |
| ГЛАВА 2 Материалы и методы исследования .....   | 29 |
| 2.1 Характеристики используемых материалов .....  | 29 |
| 2.2 Методы исследования .....   | 33 |
| 2.3 Выводы по главе 2 .....   | 42 |
| ГЛАВА 3 Влияние тонкомолотой баритсодержащей добавки на свойства<br>цементной матрицы .....             | 43 |
| 3.1 Закономерности изменения гранулометрического состава тонкомолотой<br>баритсодержащей добавки .....  | 43 |
| 3.2 Влияние тонкости помола и количества баритсодержащей добавки на<br>свойства цементной матрицы ..... | 51 |
| 3.3 Влияние состава раствора пенообразователя на свойства пены для поризации<br>цементного камня .....  | 67 |
| 3.4 Формирование микроструктуры поризованного цементно-баритового камня<br>.....                        | 69 |
| 3.5 Выводы по главе 3 .....   | 79 |
| ГЛАВА 4 Структура и свойства поризованного баритсодержащего бетона .....                                | 81 |
| 4.1 Свойства баритсодержащего пенобетона монотропной структуры .....                                    | 81 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.2 Свойства баритсодержащего пеногазобетона вариотропной структуры.....  | 96  |
| 4.3 Макро и микроструктура баритсодержащего пеногазобетона .....  | 102 |
| 4.4 Выводы по главе 4.....  | 114 |
| ГЛАВА 5 Технологические и эксплуатационные свойства изделий из баритсодержащего пеногазобетона.....                   | 116 |
| 5.1 Технология производства баритсодержащего пеногазобетона.....  | 116 |
| 5.2 Радиационно-защитные свойства баритсодержащего пеногазобетона.....  | 118 |
| 5.3 Экономическая эффективность использования радиационно-защитных баритсодержащих блоков вариотропной структуры..... | 129 |
| 5.4 Выводы по главе 5.....  | 134 |
| Заключение .....  | 135 |
| Список литературы .....   | 140 |
| Приложение А. Рекомендации.....   | 156 |
| Приложение Б. Акт о проведении опытно-промышленных испытаний.....   | 160 |
| Приложение В. Акт о внедрении результатов диссертационной работы .....  | 162 |
| Приложение Г. Патент.....   | 164 |

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования.**

Использование ядерных технологий в различных отраслях, начиная от производства энергии и заканчивая медицинским применением, требует надежной защиты от опасных последствий для человека и окружающей среды. Поэтому разработка высокоэффективных радиационно-защитных материалов является важной задачей с практическим значением.

Для создания новых радиационно-защитных строительных материалов перспективным может быть применение специально полученных облегченных материалов, включающих баритовый концентрат в качестве наполнителя. Такой подход может обеспечить необходимую эффективность защиты материалов при сохранении экономической эффективности производства.

Использование баритового концентрата в качестве наполнителя, позволяет получать бетоны, обеспечивающие эффективную радиационную защиту, однако их применение требует тщательного изучения всех аспектов работы материала под воздействием ионизирующих излучений, поскольку от плотности материала во многом зависят его защитные характеристики. Поэтому разработка композиционных баритсодержащих материалов с использованием минерального сырья посредством инновационных приемов направленного регулирования структуры и гарантированное обеспечение требуемых эксплуатационных характеристик (прочности, радиационной защиты, безопасности и др.) является актуальным.

Работа выполнена в рамках государственной программы «Развитие атомного энергопромышленного комплекса», утверждённой постановлением правительства Российской Федерации от 2 июня 2014 года №506-12.

**Степень разработанности темы.** Сегодня мировые тенденции в области радиационной защиты ориентированы главным образом на использование тяжелых материалов на основе свинца и в меньшей степени на основе барита. В последние



годы баритсодержащие материалы и изделия приобретают важное значение в области создания радиационно-защитных конструкций. Существует достаточно большое количество отечественных и зарубежных исследований, освещающих вопросы использования утяжелённых баритсодержащих композиций специального назначения, однако, тема направленного регулирования структуры баритсодержащих бетонов для обеспечения наряду с радиационно-защитными характеристиками улучшенных технологических, эксплуатационных и экономических показателей остаётся недостаточно изученной. Дополнительной проработки требуют вопросы, связанные с технологическими и сырьевыми особенностями производства эффективных облегчённых радиационно-защитных бетонов.

**Научная гипотеза.** Направленное регулирование структуры композиционного баритсодержащего материала и гарантированное обеспечение требуемых эксплуатационных характеристик, таких как облегчённость строительных изделий и их прочность, защита от ионизирующих излучений и др., может быть достигнуто посредством инновационных приемов направленного регулирования структуры на макроуровне, а применение в качестве наполнителя тонкомолотой добавки баритового концентрата может обеспечить созданием матрицы на микроуровне, оптимально совмещающей в себе компоненты граничащих материалов.

**Цель исследования.** Установление закономерностей управления структурой и свойствами баритсодержащих композитов с использованием тонкомолотой добавки баритового концентрата и инновационных приемов направленного регулирования структуры на микро- и макроуровне.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- установить физико-химические закономерности механоактивации баритового концентрата для регулирования процессов структурообразования на микроуровне;

- установить влияние тонкомолотого баритового концентрата на свойства и структуру затвердевшей цементной матрицы, оптимально совмещающей в себе компоненты граничащих материалов;

- изучить влияние вида и количества пенообразователя, а также тонкомолотой баритсодержащей добавки на свойства цементной матрицы для создания облегченных изделий;

- изучить научные и технологические принципы управления структурой и свойствами облегченных строительных композитов на основе баритового концентрата с применением инновационных приемов направленного регулирования структуры на макроуровне;

- аналитическими методами определить радиационно-защитные свойства баритсодержащих облегченных блоков;

- разработать технологию получения облегченных строительных композитов на основе баритового концентрата и выдать рекомендации по их получению и области применения.

**Объектом исследования** являются композиционный баритсодержащий материал специального назначения, тонкомолотая добавка баритового концентрата и баритсодержащие пеногазобетонные блоки.

**Предметом исследования** является установление физико-химических закономерностей управления структурой и свойствами строительных баритсодержащих композитов и получение эффективных баритсодержащих пеногазобетонных блоков на основе тонкомолотого баритового концентрата.

### **Научная новизна.**

Научно обосновано и экспериментально доказано получение баритсодержащих композиционных материалов с регулируемой вариотропной ячеистой структурой за счет управляемого процесса формирования матрицы на микро- и макроуровне. Неравномерная структура на макроуровне создается за счет управляемого процесса формирования развитой пористой структуры в центре образца, с сохранением более плотной структуры у его стенок, в матрице которых сосредотачивается большее количество барита чем в центре. На микроуровне структура матрицы оптимально совмещает в себе компоненты граничащих материалов, таких как кристаллогидраты цементных минералов и инертной тонкомолотой добавки баритового концентрата.

Показано, что использование баритового концентрата в качестве наполнителя в пеногазобетонных блоках, позволяет получать радиационно-защитные баритовые бетоны, обеспечивающие экранирование излучения мощностью 0,02-0,08 МэВ. При этом снижение массы ограждающей конструкции составляет 63-84%, что позволяет использовать их в качестве изделий для устройства радиационно-защитных ограждающих конструкций.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Теоретическая значимость работы заключается в том, что расширены представления о направленном регулировании структуры композитного материала на микро- и макроуровне, а также аналитическими методами определены радиационно-защитные свойства баритсодержащих пеногазобетонных блоков неоднородной структуры.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

- разработаны составы композиционных баритсодержащих материалов, которые могут быть использованы как материалы для радиационной защиты;
- создан эффективный облегченный материал на основе тонкомолотого баритового концентрата для пеногазобетонных блоков неоднородной структуры;
- разработаны составы пеногазобетона на основе композиционных баритсодержащих материалов, обладающие высокими показателями физико-механических, теплоизоляционных и эксплуатационных свойств и обладающий радиационно-защитными свойствами;
- разработана технологическая схема производства пеногазобетонных блоков неоднородной структуры на основе тонкомолотого баритового концентрата с применением инновационных приемов направленного регулирования структуры на макроуровне;
- разработаны рекомендации по получению облегченных строительных блоков на основе композиционного материала с тонкомолотым баритовым концентратом с применением инновационных приемов направленного регулирования структуры на микро- и макроуровне;

- проведено опытно-производственное апробирование результатов исследования и определены рациональные области применения пеногазобетонных блоков неоднородной структуры на основе композиционного материала с тонкомолотым баритовым концентратом;

- получен патент на полезную модель № 219191 «Радиационно-защитный строительный блок из ячеистого бетона переменной плотности».

**Методология и методы исследования.** Работа выполняется на основе структурно-методологической схемы проведения исследований, посредством логической цепочки последовательных шагов разработки композиционного материала и с применением методики оптимизации составов многокомпонентных высококачественных бетонов с использованием метода математического планирования экспериментов. Результаты изучения структуры и свойств композиционных баритсодержащих материалов и бетонов оптимального состава базируются на использовании современных методик и методов анализа.

**Положения, выносимые на защиту:**

- научное обоснование возможности создания материала для эффективных полифункциональных изделий на основании цементного вяжущего и тонкомолотого баритового концентрата;

- результаты экспериментальных исследований влияния процесса активации баритового концентрат путём механической обработки на искажение кристаллов барита и аморфизацию частиц барита;

- механизм направленного регулирования структуры на макро- и микроуровне изделий из баритсодержащего пеногазобетона;

- разработанные составы ячеистого бетона с использованием баритового концентрата в качестве наполнителя и их физико-механические и эксплуатационные характеристики;

- технология производства баритсодержащих ячеистых бетонов с использованием баритового концентрата в качестве наполнителя, рекомендации по изготовлению и применению баритсодержащих пеногазобетонных блоков с вариотропной

ячеистой структурой, результаты опытно-производственных испытаний применения баритсодержащей пеногазобетонной смеси для изделий с регулируемой вариотропной ячеистой структурой;

**Личный вклад автора** заключается в постановке задач исследований, в разработке программы диссертационного исследования, в выборе методов исследований, в анализе и обобщении исследований отечественных и зарубежных ученых и специалистов в области исследования и разработки баритсодержащих композиционных материалов, в проведении экспериментов, анализе и обработке результатов, формулировании выводов, в подготовке статей для публикации, в представлении результатов исследования на научных конференциях различного уровня.

**Степень достоверности результатов исследования** обусловлена применением стандартных методов испытаний, использованием поверенного лабораторного оборудования, количеством образцов в экспериментальных исследованиях, соответствующим доверительной вероятности 0.95 и погрешностью измерений не более 10%. Достоверность выводов подтверждена соответствием 5 основным положениям строительного материаловедения, а также согласованностью результатов лабораторных и производственных исследований. Обработка экспериментальных данных и математическое моделирование проведены с применением современной вычислительной техники и программного обеспечения.

**Апробация результатов исследования.** Основные положения работы доложены на 9 всероссийских и международных научно-практических конференциях и семинарах, в том числе: Межвузовский научный конгресс «Высшая школа: научные исследования», г. Москва, 2019 г.; Международный семинар «Современные тенденции в проектировании строительных конструкций», РУДН, г. Москва, 2020г.; II всероссийская научная конференция, посвящённая столетнему юбилею Московского государственного строительного университета МИСИ - МГСУ «Строительное материаловедение: настоящее и будущее», НИУ МГСУ, г. Москва, 2021 г.; Международные научно-практические конференции студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке», ТПУ, г. Томск, с 2020 по

2023 г.; II и III национальные конференции «Актуальные проблемы строительной отрасли и образования», НИУ МГСУ, г. Москва, 2021 и 2022 г.

**Публикации.** Материалы достаточно полно изложены в 12 научных публикациях, в том числе 3 работы опубликованы в изданиях, индексируемых международными базами ВАК при Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень рецензируемых научных изданий).

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа изложена на 164 страницах машинописного текста, состоит из введения, основной части, включающей 5 глав, заключения, списка литературы из 152 наименований, содержит 69 рисунков и 31 таблицу.

# ГЛАВА 1. ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ БАРИТСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ

## 1.1 Современное состояние ядерных технологий в России и в мире

В современном мире ядерные технологии применяются в широком спектре отраслей, при этом наиболее активное использование и развитие они получают в рамках ядерной энергетики. Согласно World Nuclear Industry Status Report, в 2022 году ядерная энергетика внесла вклад на уровне 9,8% в общемировое производство электроэнергии, в то время как в России этот показатель достиг 20%. На конец 2022 года общее количество функционирующих ядерных реакторов составило 411, из которых 37 расположены на территории России. Также стоит отметить, что на момент сбора данных в стадии строительства находились 53 атомных электростанций, включая 3 российских: Курская АЭС-2, Ленинградская АЭС-2, Смоленская АЭС-2 [1].

Россия утвердилась в роли одного из мировых лидеров в области ядерных технологий. На территории страны функционирует множество атомных электростанций, а международная экспортная деятельность в данной сфере делает Россию одним из ключевых акторов на мировом рынке ядерной технологии. В соответствии с государственной программой "Развитие атомного энергопромышленного комплекса", предполагается, что к 2027 году объем выработки электрической энергии атомными электростанциями, расположенными на территории России, составит не менее 221,7 млрд. кВт·ч в год [2]. Корпорация "Росатом", находящаяся в государственной собственности, занимается развитием ядерной энергетики как на внутреннем рынке, так и на международной арене, включая строительство атомных электростанций за рубежом.

Вне сферы энергетики, ядерные технологии находят активное применение в науке, промышленности и, в частности, в медицине. В области здравоохранения

распространенность получили технологии, использующие методы лучевой диагностики, что повлекло за собой увеличение радиационной нагрузки на население. В Российской Федерации медицинское облучение занимает второе место после естественного радиационного фона по уровню облучения населения, составляя около 14% от общей радиационной нагрузки или 0,56 мЗв. [3]. Согласно данным исследований, наибольший вклад в коллективную дозу медицинского облучения вносят компьютерная томография и рентгенография; наибольшие индивидуальные дозы облучения наблюдаются в интервенционной радиологии, компьютерной рентгеновской томографии и радионуклидной диагностике [4, 5].

Медицинский персонал, работающий в отделениях больниц, где используется рентгенографическое оборудование, подвержен риску ионизирующего облучения. Обеспечение непрерывной и безопасной работы этой категории сотрудников предполагает создание рабочей среды, соответствующей действующим нормативам в области безопасности труда. Достижение этой цели возможно благодаря экранированию источников ионизирующего излучения с использованием ограждающих конструкций из современных и эффективных материалов [6, 7].

## **1.2 Воздействие ионизирующих излучений на материал**

Ослабление рентгеновского и  $\gamma$ -излучения происходит в основном за счет фотоэлектрического поглощения, процесса образования пар, комптоновского рассеяния и тормозного излучения. Эффективность защиты от  $\gamma$ -излучения возрастает с увеличением атомного номера поглотителя. Эффективность защиты от нейтронов определяется содержанием в веществе защиты элементов с большими  $z$  для замедления нейтронов средних энергий до области энергий менее 0,5 МэВ путем неупругого рассеяния, содержанием легких элементов для замедления нейтронов средних энергий до тепловой области, а также наличием хороших поглотителей нейтронов, не испускающих при захвате нейтронов жестких  $\gamma$ -квантов [8].



**Фотоэлектрический эффект.** При фотоэлектрическом эффекте фотон с энергией  $E$ , превышающей энергию связи электрона в атоме  $E_x$ , может столкнуться с орбитальным электроном и выбить его из атома (рисунок 1.1) с кинетической энергией  $mV^2/2 = E - E_x$ . Примерно в 80% случаев фотоэлектрическое поглощение происходит на  $K$ -оболочке (при условии, что  $E > E_k$ ). Эффективность поглотителя с точки зрения ослабления электромагнитного излучения путем фотоэффекта зависит главным образом от энергии связи электронов  $K$ -оболочки, которая приближенно может быть определена как

$$E_k = 13,5(z - 1)^2 [\text{эВ}]$$

Эффективное сечение фотоэлектрического эффекта  $\sigma$  приблизительно пропорционально  $E^{-n}$ , где  $n$  изменяется от 3 до 5, а  $n=3$  для  $E < 0,5$  МэВ и  $n=1$  для  $E > 0,5$  МэВ. Отсюда следует, что роль фотоэлектрического эффекта возрастает с увеличением атомного номера вещества защиты и с уменьшением энергии фотонов. Фотоэлектрический эффект оказывает существенное влияние на поглощение  $\gamma$ -излучения веществами с высокими атомными номерами до энергий примерно 1,5 МэВ.

Вслед за выбиванием электрона из атома путем фотоэффекта происходит заполнение электрона оболочки, приводящее к появлению мягкого характеристического излучения [9]. С точки зрения защиты от излучений фотоэлектрический эффект можно рассмотреть, как процесс полного поглощения.

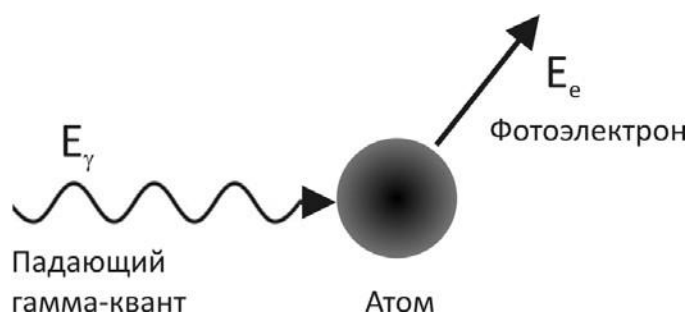


Рисунок 1.1 - Схематическое изображение фотоэффекта

**Процесс образования пар.** Фотон большой энергии в кулоновском поле ядра и в более редких случаях электрона может превратиться в электронно-позитронную пару (рисунок 1.2). Процесс образования пар имеет энергетический порог, рав-

ный 1,02 МэВ, причём избыточная энергия фотона проявляется в виде кинетической энергии электрон-позитронной пары. Электрон и позитрон в процессе образования пар испускаются преимущественно в направлении движения падающего фотона. Эффективное сечение процесса образования пар  $\sigma_{\text{пар}}$  почти пропорционально  $(E-1,02)$ , где  $E$  выражено в МэВ, а также пропорционально  $(z^2-z)$ , где первый член соответствует ядерным процессам, а второй – процессам в поле электронов. В веществах с большими атомными номерами  $z$  сечение  $\sigma_{\text{пар}}$  монотонно возрастает вплоть до энергии 50 МэВ, а в веществах с малым  $z$  растёт до больших энергий. Максимальное значение  $\sigma_{\text{пар}}$  достигает 100 барн/атом. Для энергий более 5 МэВ процесс образования пар является преобладающим процессом взаимодействия  $\gamma$ -лучей с веществом.

Возникающее в результате этого процесса позитроны существуют недолго и после замедления в веществе взаимодействуют с электронами вещества, испытывая процесс так называемой аннигиляции, обратный процессу образования пар. В результате аннигиляции испускаются два кванта с энергией 0,51 МэВ каждый. Это аннигиляционное излучение является сравнительно мягким и испускается изотропно, по этой причине процессу образования пар в расчетах защиты рассматривается как процесс полного поглощения.

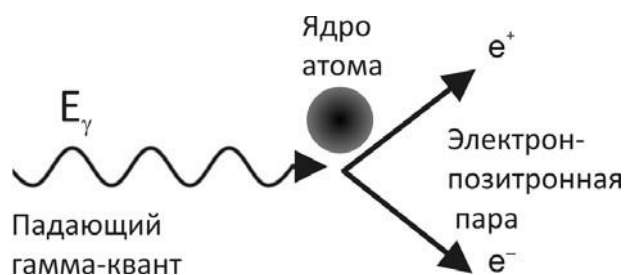


Рисунок 1.2 - Схематическое изображение эффекта образования пары

**Комптовское рассеяние.** Неупругое соударение атома между квантом и электроном, получившее название комптовского рассеяния, можно рассматривать как процесс упругого рассеяния кванта на свободном электроном, поскольку для энергий более 0,1 МэВ работа, затрачиваемая на выбивание электрона из атома, пренебрежимо мала по сравнению с энергией падающего кванта. В результате

этого процесса фотон передаёт часть своей энергии электрону и изменяет первоначальное направление своего движения (рисунок 1.3). Электроны отдачи вылетают преимущественно в направлении движения падающего кванта и тем ближе к этому направлению, чем больше доля энергии фотона. Эффективное сечение комптоновского рассеяния пропорционально числу орбитальных электронов атома, т.е. величине  $z$ . Этот процесс играет основную роль для  $\gamma$ -излучений с энергией 1-5 МэВ в случае веществ с большими  $z$  и еще более существен в значительно более широком интервале энергий для веществ с малым  $z$ . Сечение комптоновского рассеяния достигает 0,7 барн/электрон для  $\gamma$ -квантов с энергией 0,01 МэВ и падает до величин меньше 0,05 барн/электрон при 10 МэВ. Эффективное сечение комптоновского рассеяния можно представить в виде суммы:  $E_{\gamma} = E_e + E'_{\gamma}$ , где  $E_e$  характеризует долю энергии, передаваемой электронами отдачи, а  $E'_{\gamma}$  – долю энергии, уносимой рассеянным квантом

Фотон, испытывающий комптоновское рассеяние, теряет часть своей энергии что приводит к уменьшению его проникающей способности. Вместе с тем в результате рассеяния фотон изменяет направление первоначального движения, что проявляется в увеличении пути, проходимого этим фотоном в защитном экране. Обычно фотон успевает испытать несколько актов комптоновского рассеяния, прежде чем он выйдет за пределы защитного экрана или будет поглощён в самом экране путём фотоэффекта [10, 11].

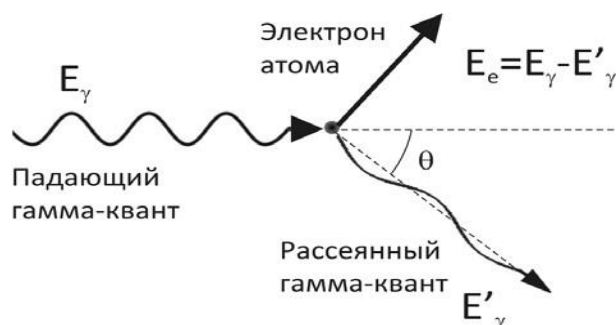


Рисунок 1.3 - Схематическое изображение эффекта Комптона

### 1.3 Принципы проектирования радиационно-защитных материалов

При оценке радиационно-защитных свойств материала, в первую очередь, учитывают его защиту от  $\gamma$ -излучения и нейтронного излучения, поскольку известно, что пробег альфа и бета-частиц в твёрдых материалах не превышает нескольких миллиметров [12-14].

Для совместного экранирования  $\gamma$  и нейтронного излучения следует учитывать влияние элементного состава вещества защиты. Основным фактором, влияющим на защитные характеристики, является заряд атомного ядра. Увеличение заряда способствует ослаблению гамма-излучения, в то время как уменьшение заряда приводит к замедлению быстрых нейтронов [15, 16].

Принципы проектирования радиационно-защитных строительных материалов можно обобщить следующими правилами [17].

1. Создание эффективных радиационно-защитных строительных материалов предполагает тщательный подбор химического и фазового составов с учетом имеющихся материально-технических ресурсов.

2. Для достижения максимальной радиационной защиты материала необходимо обеспечить однородное распределение химических элементов как на микро-, так и на макроуровне.

3. Эффективное размещение химических элементов, присутствующих в микроскопических количествах, может быть достигнуто на границах раздела фаз.

4. Минимизация внутренних напряжений материала возможна путем уменьшения размеров частиц дисперсной фазы и формирования соответствующей структуры материала.

5. Применение многокомпонентных дисперсных фаз может привести к снижению устойчивости технологического процесса изготовления материала и не является оптимальным решением.

6. Использование многослойных композиционных материалов, каждый из которых эффективно поглощает определенный вид излучения, может значительно повысить эффективность радиационной защиты. Однако, для достижения максимальной эффективности, необходимо обеспечить работу изделия как монолитного материала.

В современной практике выбор конструкций, обеспечивающих радиационную защиту, остаётся относительно ограниченным. К основным недостаткам существующих материалов, применяемых при экранировании ионизирующих излучений, относят высокую массу, габариты и стоимость материала защиты [18].

Современные исследования направлены на разработку экономически выгодных, экологически безопасных и технологичных защитных материалов. Как правило для защиты от ионизирующих излучений используются материалы высокой плотности [19], однако можно использовать материалы с низкой плотностью, увеличив толщину материала для снижения интенсивности излучения [20]. Важную роль в этом контексте играет элементный состав материала, поскольку даже при снижении плотности можно достичь требуемых радиационно-защитных характеристик за счёт увеличения концентрации химических элементов, улучшающих защитные свойства материала.

Для надёжной защиты от различных типов ионизирующих излучений, включая излучения атомных реакторов и рентгеновские лучи, применяются разнообразные виды тяжёлого радиационно-защитного бетона. При создании радиационно-защитного бетона используются разнообразные природные и искусственные материалы с различными плотностями и химическими свойствами. Среди них можно назвать барит, магнетит, гематит, лимонит, ильменит, частицы чугуна, извлеченные из шлака, чугунную или свинцовую дробь, электротермические фосфорные шлаки, ферросилиций, специальные железистые гранулы, железистый песок и другие [21, 22].

Отметим, что многие материалы, используемые в качестве заполнителей для бетона, являются инертными при нормальном твердении. В их число входят магнетит, хромит, барит, ставролит, везувиан и авгит. Однако, их влияние на структуру бетона проявляется через создание пустот и изменение прочности контакта с цементным камнем.

Регулирование радиационно-защитных свойств бетона может осуществляться с помощью различных минеральных добавок. Известно, что эти добавки, представляющие собой порошки различной минеральной природы, применяются

для управления структурой и свойствами бетонов и бетонных смесей. Они отличаются от заполнителей мелким размером зёрен и от химических добавок - отсутствием способности растворяться в воде [23]. Продукты добычи баритовых руд могут применяться в качестве таких добавок для улучшения способности изделия ослаблять и рассеивать ионизирующие излучения.

#### 1.4 Промышленные сферы применения баритсодержащих материалов

Барит в своем природном состоянии представляет собой минерал, также известный как тяжелый шпат (рисунок 1.4). Химический состав включает BaO – 65,7%, SO<sub>3</sub> – 34,3%. Встречаются разновидности барита, содержащие стронций, свинец и оксид железа. Иногда в нем также присутствуют посторонние примеси, такие как глинистые, органические и другие вещества.

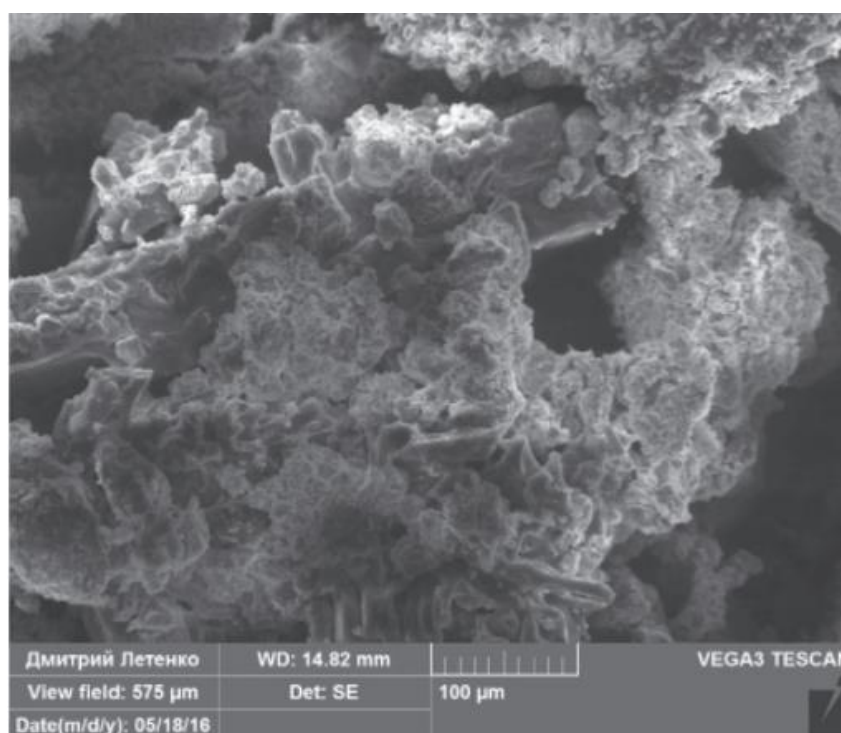


Рисунок 1.4 - Призматический кристалл барита [24]

Баритовые руды могут отличаться по своему минералогическому составу, в зависимости от наличия таких минералов, как кварц, флюорит и другие [25]. В за-

висимости от условий образования, баритовые руды могут быть гидротермальными (средне- и низкотемпературными), метасоматическими, выветривания или делювиальными. Жильные месторождения являются наиболее распространенными и имеют форму плитообразных или линзовидных жил длиной до 1-2 км и мощностью от нескольких метров до 5-10 метров. Они могут содержать барит в различных концентрациях и качестве. Россыпи баритовых руд, образующиеся за счет выветривания, могут иметь крупные размеры и отличаться от жильных месторождений низким содержанием барита (15-20%), но легко обогащаются [26-28].

В кусковом барите содержание посторонних включений минимально. Обычно его цвет белый или слегка окрашен в светлые, розовые или желтоватые тона. Имеется четыре сорта такого барита, в которых содержание барита варьируется от 80 до 95%. Для промышленного использования содержание барита должно быть не менее 95%, для заполнителя – не менее 80%, содержание влаги – от 3 до 5%. Содержание кремнекислоты в пересчёте на сухое вещество составляет от 1,5 до 4%. Содержание оксида железа ( $Fe_2O_3$ ) – от 0,5 до 3%, содержание растворимых в воде солей – от 0,3 до 1%. Содержание полуторных оксидов и кремнекислоты в барите, применяемом в качестве заполнителя, не нормируется.

Объемный вес барита колеблется от 4 до 4,7 т/м<sup>3</sup>, а его твердость находится в пределах от 3 до 3,5. Вредными примесями в заполнителях из барита считаются сернокислые и сернистые соединения, которые представлены не самим баритом, а другими соединениями, такими как гипс, пирит и прочие.

Первое промышленное применение барита было зафиксировано в 1845 году при производстве белой краски в США. Более широкая добыча барита началась после 1926 года, когда его впервые использовали в качестве наполнителя буровых растворов [29]. В начале 50-х годов XX века начали появляться первые исследования в области строительных материалов для защиты от ионизирующих излучений, что способствовало использованию барита в качестве строительного радиационно-защитного материала, преимущественно в качестве наполнителя и заполнителя тяжелого бетона.

На сегодняшний день баритсодержащие материалы имеют широкий спектр областей применения, что подтверждается числом доступных патентов, находящихся в российских и международных базах данных. Лидерами по количеству патентов на баритсодержащие материалы являются ученые из Китая, США, Германии, Японии и России.

Основная часть российских и китайских патентов относится к веществам, основные параметры которых связаны с выбором состава бетонной или сухой строительной смеси и исследованием свойств и структурных особенностей материалов, производимых на их основе [30-36]. Большая часть этих патентов сконцентрирована на изучении радиационно-защитных свойств материалов, но также присутствует значительное количество патентов, предлагающих применение барийсодержащих материалов в качестве утяжелителя и тампонажных растворов.

В патентах авторов из Японии барит, в основном, используется в качестве крупного заполнителя для тяжелого бетона [37, 38]. Европейские патенты в большей степени относятся к области химической технологии и предлагают использование барита в качестве модифицирующей добавки [39, 40].

Обладателем наибольшего количества патентов в данном направлении является крупная швейцарская химическая компания Sika AG, занимающаяся разработкой, производством и продажами химической продукции для гидроизоляции, склейки, амортизации, укрепления и защиты конструкций. За ней по количеству патентов идут японская компания, производящая строительные материалы SK KAKEN CO. LTD и немецкий химический концерн BASF Societas Europaea.

### **1.5 Бетоны на основе минерального сырья барита**

Баритовый бетон - это материал, широко используемый в различных отраслях, где требуется защита от ионизирующих излучений. Баритовые бетоны произ-



водятся с использованием минерала барита ( $BaSO_4$ ) в качестве крупного или мелкого заполнителя. В отличие от свинца, барит не токсичен и обладает более доступной ценой, что делает его более привлекательным для использования в качестве материала для защиты от ионизирующих излучений в научных, промышленных и медицинских учреждениях [41].

Бетоны на основе баритового сырья широко используются при строительстве ядерных энергетических установок, для тампонирования нефтяных и газовых скважин, а также при возведении сооружений, омываемых морской водой [42], благодаря высокой плотности обеспечивая необходимые эксплуатационные и технологические характеристики.

Как правило барит применяется в качестве заполнителя в бетон или в качестве минеральной добавки [43-47], в том числе и при производстве высокопрочных и сверхвысокопрочных бетонов прочностью от 28 до 140 МПа [48-60]. Использование барита таким образом значительно улучшает способность материала ослаблять  $\gamma$ -кванты.

Баритовый минерал, богатый элементом Ва с атомным номером  $z = 56$  и атомной массой 137,36 единиц, проявляет высокую защитную способность. Этот элемент составляет почти 60% чистого минерала и успешно ослабляет гамма-кванты низкой энергии до 0,5 МэВ. Макроскопическое сечение поглощения гамма-излучения для баритового бетона с энергией 5 МэВ составляет  $0,101 \text{ см}^{-1}$  [61]. Отмечается, что при частичной замене в клинкере оксида кальция оксидом бария происходит увеличение прочности, сульфатостойкости и сопротивляемости цемента проникновению  $\gamma$ -излучению [62]. 10-миллиметровый слой обычного цементного камня снижает интенсивность потока гамма-квантов на 1,52 раза, а слой цементного камня, содержащий 30% ВаО, снижает интенсивность в 2 раза, а такой же слой свинца – в 2,65 раза. [63].

Стоит отметить, что в отличие от бетонов на железорудных заполнителях, баритовые бетоны не обладают недостатком в виде высоких вторичных гамма-излучений. Более того, большое макроскопическое сечение выведения быстрых нейтронов бария делает баритовый бетон достаточно эффективным материалом

для защиты от нейтронного потока [61, 64, 65]. Нейтронные потоки ослабляются баритовым бетоном несколько слабее, чем магнетитовым и гематитовым, но более эффективно, чем обычный бетон, при равном содержании в них воды [65].

Баритовые бетоны обладают плотностью в диапазоне от 2700 до 3800 кг/м<sup>3</sup> и прочностью при сжатии от 16 до 30 МПа. Прочность при растяжении составляет 8-10% от прочности при сжатии и, как правило, не превышает 3 МПа. Они обладают коэффициентом теплопередачи, который находится в диапазоне от 1,28 до 1,98 Вт/(м<sup>2</sup>·К), температурный коэффициент линейного расширения в интервале температур от 20 до 900 °С составляет  $(20...30) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  [65-69].

Баритовые бетоны имеют некоторые ограничения, включая высокие показатели усадки, которые могут повлиять на качество конструкций [70]. Еще одним фактором, ограничивающим стойкость баритовых бетонов, является крупнокристаллическая структура барита, которая приводит к высоким и неравномерным температурным деформациям по кристаллическим осям:  $d_x = 19 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $d_y = 22 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $d_z = 35 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Это в свою очередь приводит к "расшатыванию" структуры заполнителя и, соответственно, бетона, что снижает его прочность и долговечность.

При использовании баритовых бетонов необходимо учитывать эти ограничения и применять материал только в конструкциях, которые не подвергаются попеременному воздействию отрицательных температур и воздействию температур выше 100 °С, при температурах выше этой отметки баритовый бетон уже не сможет обеспечить достаточную стойкость и должен быть заменен на другой материал [71-74].

Считается, что после 25 циклов попеременного замораживания и оттаивания их прочность может снизиться на 40-60% [61,74]. По этой причине баритовые бетоны лучше применять при экранировании источников излучения, которые находятся в закрытых помещениях [65]. Однако согласно актуальным исследованиям [75, 76] при нагреве свыше 500 °С баритовые бетоны демонстрируют аналогичную сопротивляемость температурным деформациям, что и обычный бетон. Кроме того, баритовые бетоны меньше подвержены потере радиационно-защитных

свойств под воздействием высоких температур по сравнению с обычными бетонами [77, 78]. Это связано с тем, что минералы барита обладают более высокой температурой плавления ( $1580^{\circ}\text{C}$ ), чем обычные заполнители, которые используются в других типах бетона [79].

Таким образом, хотя баритовые бетоны имеют некоторые ограничения при работе при высоких температурах, они остаются эффективным материалом для радиационной защиты. Кроме того, исследования продолжаются, чтобы улучшить свойства баритовых бетонов и сделать их еще более устойчивыми к высоким температурам.

Исследования, в которых изучается влияние оксида бария на свойства цементного клинкера и процессы кристаллообразования, показывают, что ионы  $\text{Ba}^{2+}$  способны заменять ионы  $\text{Ca}^{2+}$ , а также, что при достижении достаточной концентрации барита, происходит замедление образования алита, а также его разложение на белит и свободный оксид кальция [80]. Белит, который является наиболее стабильной фазой, стабилизируется в  $\alpha'$ -модификации и одновременно с этим образуется моносиликат бария. Усиление этой тенденции можно добиться путем повышения концентрации сульфата бария. Несмотря на разложение фаз, исследования показывают, что прочностные показатели могут повышаться благодаря образованию повышенной концентрации гидросиликатов кальция. Увеличение прочности при сжатии составляет: 17...22 % [81, 82]. Кроме того, сернокислый барий оказывает минерализирующее воздействие на процесс клинкерообразования, благодаря присутствию  $\text{SO}_3$  в составе сернокислого бария происходит увеличение кристаллов алита [83].

Для того чтобы улучшить свойства баритовых бетонов и приспособить их для конкретных задач, используются различные минеральные добавки. Например, добавление железной руды и стали повышает среднюю плотность бетона, тогда как добавление лимонитовой руды увеличивает содержание химически связанной воды до 23%. Однако в этом случае средняя плотность баритового бетона снижается с 3440 до 3240  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Помимо естественных минералов барита, существует возможность применения в качестве заполнителя бетона искусственно синтезированных соединений бария, таких как моносиликат бария  $BaSiO_3$  и моноферрит бария  $BaFe_2O_4$ , которые могут быть использованы в условиях воздействия температур и  $\gamma$ -излучений [84].

Авторами работы [85] осуществлено детальное изучение процесса формирования структуры композиций, предназначенных для использования в радиационно-защитных материалах на основе жидкого стекла, отвержденного хлоридом бария. Авторы также подробно исследовали процесс формирования гидросиликатов бария [86-92]. Полученные наноразмерные гидросиликаты бария применяются в качестве модификатора портландцемента. Установлено, что введение модификатора, содержащего гидросиликаты бария, кремниевую кислоту и карбонат бария, позволяет замедлить образование зародышей кристаллов новообразований в индукционном периоде гидратации, усилить гидратацию алита и замедлить гидратацию алюминатной фазы. При этом использование указанного модификатора увеличивает степень гидратации цемента, количество гидросиликатов кальция, уменьшает количество образующихся портландита и этtringита, что способствует повышению механических характеристик и долговечности цементного камня.

В строительной отрасли барит, как правило применяется в виде баритового концентрата. Содержание сернокислого бария в баритовом концентрате в зависимости от марки должно составлять от 80 до 95%. Баритовый концентрат получают путем дробления, мойки и обогащения руды барита. В результате получают тонкодисперсные порошки и гранулы, которые применяются в зависимости от специфических требований промышленного процесса.

Существуют различные способы обогащения баритовых руд с целью получения баритового концентрата, например, производят дробление баритовой руды, затем измельчают, в режиме сегрегации материала ведут грохочение на ситовой поверхности грохота с получением готового баритового концентрата в подрешетном продукте грохота. До измельчения баритовую руду нагревают при температуре 200-300 °С в течение 20-60 мин, а измельчают в дробилках ударного типа при скорости дробящих тел 47-52 м/с [93]. Еще один метод обогащения заключается в том,

что баритовую руду дробят, измельчают, а операцию фракционирования – отделение полезного компонента барита от сопутствующих материалов – ведут методом флотации с использованием реагентов-ксантогенатов, жирных кислот и других [94]

### **1.6 Минерально-сырьевая база барита в России и в мире**

Многие страны, где добывают барит, такие как Россия, Китай, Индия, США, Марокко, Иран и Мексика, располагают огромными запасами барита, которые могут удовлетворить потребности всей мировой экономики. Однако, из-за ухудшения качества руды и усложнения горно-геологических условий, добыча баритовых концентратов с плотностью  $4,2 \text{ г/см}^3$  стала неэкономичной для компаний, и им приходится применять дорогостоящие методы обогащения. Раньше такая плотность была традиционно рекомендована Американским институтом нефти (API), но в настоящее время главные мировые производители барита пришли к выводу, что для более рационального использования запасов руды, необходимо производить концентраты с меньшей плотностью -  $4,0$  и  $4,1 \text{ г/см}^3$ . К тому же, концентраты с такой плотностью могут обеспечить получение буровых растворов с удельным весом до  $2,0$ - $2,1 \text{ г/см}^3$ . Таким образом, производство концентратов с более низкой плотностью может помочь компаниям более эффективно и экономично добывать баритовые руды, что в свою очередь, повысит их конкурентоспособность на рынке [95].

В 2020 году в России было добыто 244 000 тонн баритового сырья и потреблено около 299 000 тонн барита, что составляет 3,4% от мирового производства. Около 55-60% добытого барита торгуется на международном рынке. Импорт баритового сырья в Россию в 2020 году составил 64 000 тонны. Самым крупным импортёром барита в Россию является Казахстан.

На территории России по состоянию на 2021 год добычу барита ведут предприятия АО "Барит" и ООО "Богградский ГОК" на Толчеинском месторождении в

Хакасии (рисунок 1.5). В 2004 году добыча на Хойлинском месторождении в Республике Коми была прекращена, а в 2012 году прекратил свою работу АО "Салаирский химический комбинат", функционирующий на сульфидно-баритовое месторождение Кварцитовая Сопка в Кемеровской области



Рисунок 1.5 - Баритоносные провинции, месторождения и проявления барита, предприятия, добывающие и перерабатывающие баритовый продукт (по состоянию на 2021 год): 1 – баритоносные провинции (I – Северо-Кавказская, II – Кольская, III – Уральская, IV – Алтае-Саянская, V – Енисейская, VI – Забайкальская, VII – Сихотэ-Алинская, VIII – Колымская); 2, 3 – баритовые месторождения и проявления (а – с запасами свыше 500 тыс. т  $\text{BaSO}_4$  и/или ресурсами свыше 1 млн т  $\text{BaSO}_4$ , б – малые месторождения и проявления с небольшими запасами/ресурсами): 2 – собственно баритовые месторождения, 3 – комплексные сульфидно-баритовые месторождения; 4 – техногенные баритовые месторождения; 5 – глубоководные площади распространения баритовых конкреций; 6 – горнодобывающие предприятия, реализующие баритовый концентрат (а – действующие, б – остановленные), 7–10 – предприятия по производству: 7 – баритовых буровых смесей, 8 – рентгенозащитных строительных смесей, 9 – бариевых химикатов, 10 – тонкодисперсных баритовых порошков – наполнителей красок [96]

К наиболее крупным предприятиям, потребляющим барит в Российской Федерации относятся:

- производители утяжелителей буровых растворов – АО «Ильский завод Утяжелитель – НПО «Бурение» (пос. Ильский Северского района Краснодарского края), ООО «Барит Урала» (г. Челябинск), АО «Спецнефтематериалы» (г. Волгоград), АО «НПО «Полицелл» (г. Владимир), ООО «НПО «Реасиб» (г. Томск);
- производители рентгенозащитных строительных смесей: ООО «Альфапол», ООО «Ажио» и ООО «Гидроцем» в г. Санкт-Петербург, ООО «Сорель» (г. Москва), ООО «Кировградский завод промышленных смесей» (г. Кировоград Свердловской области);
- производители баритовых химикатов: ООО «Экотек – Завод химических компонентов» и ООО «Компонент-Реактив» в г. Москва, АО «Химический завод им. Л.Я. Карпова» (г. Менделеевск, Республика Татарстан) ООО «Михайловский завод химических реактивов» (г. Барнаул);
- производители баритовых наполнителей красок – АО «Геоком» (пос. Полотняный Дзержинского района Калужской области).

## 1.7 Цели и задачи исследования

Цель исследования. Установление закономерностей управления структурой и свойствами баритсодержащих композитов с использованием тонкомолотой добавки баритового концентрата и инновационных приемов направленного регулирования структуры на микро- и макроуровне.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- установить физико-химические закономерности механоактивации баритового концентрата для регулирования процессов структурообразования на микроуровне;

- установить влияние тонкомолотого баритового концентрата на свойства и структуру затвердевшей цементной матрицы, оптимально совмещающей в себе компоненты граничащих материалов;

- изучить влияние вида и количества пенообразователя, а также тонкомолотой баритсодержащей добавки на свойства цементной матрицы для создания облегченных изделий;

- изучить научные и технологические принципы управления структурой и свойствами облегченных строительных композитов на основе баритового концентрата с применением инновационных приемов направленного регулирования структуры на макроуровне;

- аналитическими методами определить радиационно-защитные свойства баритсодержащих облегченных блоков;

- разработать технологию получения облегченных строительных композитов на основе баритового концентрата и выдать рекомендации по их получению и области применения.

Результаты, приведённые в главе 1 частично опубликованы в работах [97-101].



## ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1 Характеристики используемых материалов

Сырьё для изготовления ячеистых бетонов подбиралось в соответствии с ГОСТ 25485-2019. В качестве исходного сырья использовались баритовый концентрат КБ-3 производства ООО «Богородский ГОК» с долей сернокислого бария ( $BaSO_4$ ) 90%, белковый пенообразователь Rospena, кварцевый песок фр. 0,63-1,25 мм, портландцемент ЦЕМ I 42,5 Евроцемент М500 Д0, алюминиевая пудра ПАГ-1, фтористый натрий.

#### 2.1.1 Баритовый концентрат

Тонкомолотой баритовый концентрат по ГОСТ 4682-84, ГОСТ 30240.0-95 применяется в качестве наполнителя в бетон для придания изделию радиационно-защитных свойств. Характеристики баритового концентрата, используемого в работе представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Нормированные и фактические характеристики баритового концентрата

| Наименование показателя  | Марка КБ-3, класс Б ГОСТ 4682-84 | Фактический показатель |
|--|----------------------------------|------------------------|
| Масс. доля сернокислого бария, %, не менее                                     | 90                               | 90,1                   |
| Масс. доля водорастворимых солей, %, не менее                                  | 0,35                             | 0,2                    |
| В том числе водорастворимого кальция, %, не менее                              | 0,05                             | 0,02                   |
| Масс. доля влаги, %, не более  | 2                                | 0,6                    |
| Масс. доля остатка после просева на сетке № 0071К по ГОСТ 6613-86, %, не более | 6                                | 3,1                    |
| Плотность, г/см <sup>3</sup> , не менее  | 4,2                              | 4,2                    |
| Масс. доля фракции 5 мкм, %, не более  | 10                               | 9,0                    |
| Масс. доля пирита, %, не более   | 6                                | <0,5                   |
| рН водной вытяжки  | 6-8                              | 7,8                    |

Согласно рентгенофазовому анализу (рисунок 2.1) основным минералом баритового концентрата является сульфат бария, который идентифицируется по дифракционным максимумам с межплоскостными расстояниями  $d = 0,358; 0,344; 0,332; 0,310; 0,212$  нм.

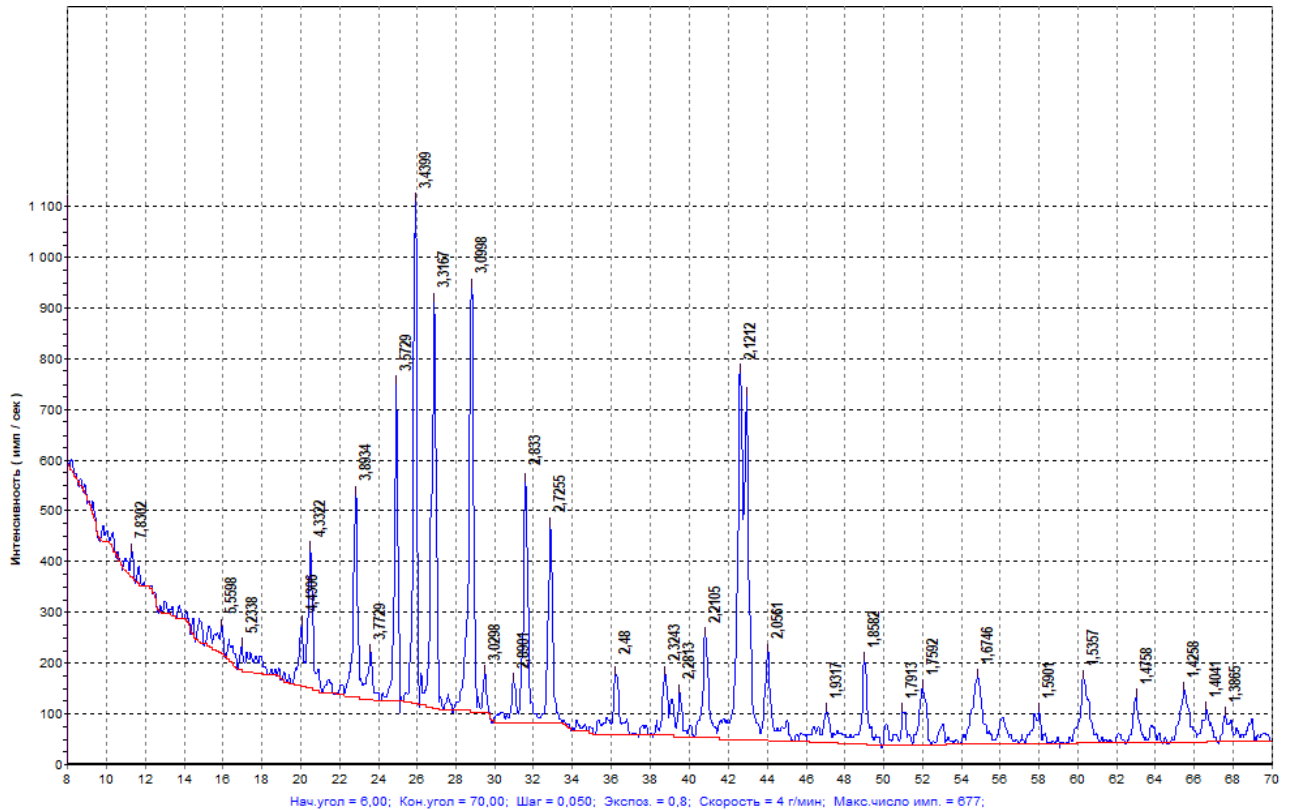


Рисунок 2.1 - Рентгенограмма исходного сырья баритового концентрата

### 2.1.2 Портландцемент

Портландцемент ЦЕМ I 42,5 Евроцемент М500 Д0 ГОСТ 30515-2013, ГОСТ 31108-2020.

Согласно рентгенофазовому анализу (рисунок 2.2) минералогический состав клинкера представлен алитом ( $d = 0,277$ ; нм), белитом ( $d = 0,277$ ; нм), трехкальциевым алюминатом ( $d = 0,277$  нм) и четырехкальциевым алюмоферритом ( $d = 0,264$ ; нм).

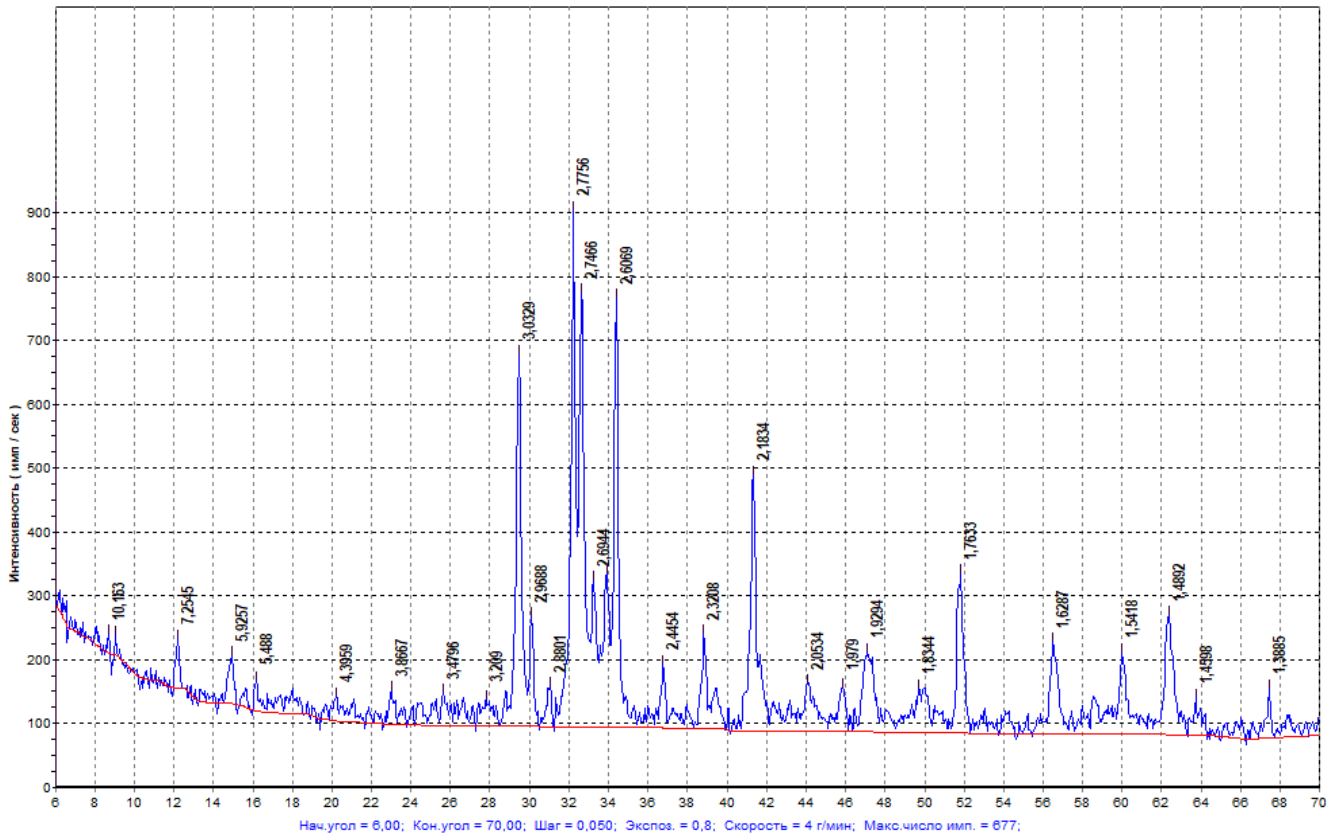


Рисунок 2.2 - Рентгенограмма исходного сырья портландцемента

Нормативные и фактические характеристики используемого портландцемента приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Нормированные и фактические характеристики портландцемента

| Наименование показателя, единица измерения                | ГОСТ 31108-2020 | Фактический показатель |
|---|-----------------|------------------------|
| Прочность на сжатие, МПа, не менее                        | 42,5            | 43,4                   |
| Вещественный состав, %, портландцементный клинкер         | 100             | 100                    |
| Равномерность изменения объема, мм, не более              | 10              | 9                      |
| Начало схватывания, мин, не ранее                         | 60              | 72                     |
| Содержание оксида серы (VI) SO <sub>3</sub> , %, не более | 4,0             | 3,9                    |
| Содержание хлорид-иона Cl, %, не более                    | 0,1             | 0,1                    |

### 2.1.3 Песок

Использовался песок строительный сухой «Боларс» фр. 0,63-1,25 мм по в соответствии с ГОСТ 8736-2014. Технические характеристики используемого песка приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Технические характеристики песка

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| Влажность                                | не более 0,1                |
| Содержание пылевидных и глинистых частиц | не более 0,5%               |
| Содержание органических примесей         | нет                         |
| Насыпная плотность                       | 1600-1700 кг/м <sup>3</sup> |
| Класс радиационной безопасности          | 1 класс                     |

### 2.1.4 Пластификатор

Для снижения водопотребности и диспергации частиц измельчённого баритового концентрата использовался гиперпластификатор МАСТЕР ГЛЕНИУМ 115 в соответствии с ГОСТ 8728-88. Технические характеристики используемого пластификатора приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Технические характеристики пластификатора

|                                   |                          |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Состав материала                  | Поликарбоксилатные эфиры |
| Цвет                              | Светло коричневый        |
| Плотность:                        | 1,05 - 1,09 кг/л.        |
| Содержание хлоридов % (БЫ 480-10) | <0,1                     |
| Содержание щелочей % (БЫ 480-12)  | <3                       |

### 2.1.5 Пенообразователь

Пена для изготовления пенобетонов была получена при использовании водных растворов белкового и синтетического пенообразователя Rospena в соответствии с ГОСТ 23409.26-78.

### 2.1.6 Алюминиевая пудра

Алюминиевая пудра марки ПАГ-1 в соответствии с ГОСТ 5494-2022 используется в качестве газообразователя. ПАГ-1 является одним из наиболее распространенных типов алюминиевой пудры, применяемой в различных отраслях. Он произ-

водится путем измельчения и обработки чистого алюминия до получения мелко-дисперсного порошка с заданной структурой и размером частиц. Технические характеристики используемой алюминиевой пудры приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Технические характеристики алюминиевой пудры

|   |      |
|---|------|
| Остаток на сите № 008 по ГОСТ 6613                        | 1,5  |
| Кроющая способность на воде, см <sup>2</sup> /г, не менее | 6000 |
| Активный металл (алюминий), %, не менее                   | 90   |
| Массовая доля жировых добавок, %, не более                | 2,4  |

### 2.1.7 Фтористый натрий

Фтористый натрий в соответствии с ГОСТ 4463-76 использовался в качестве ускорителя реакции газообразования. Технические характеристики используемого фтористого натрия приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - Технические характеристики фтористого натрия

|  |       |
|--|-------|
| Массовая доля фтористого натрия (NaF), %, не менее       | 98    |
| Массовая доля нерастворимых в воде веществ, %, не более  | 0,05  |
| Массовая доля кислоты (в пересчете на HF), %, не более   | 0,2   |
| Массовая доля щелочи (в пересчете на NaOH), не более     | 0,2   |
| Массовая доля сульфатов, %, не более                     | 0,02  |
| Массовая доля хлоридов, %, не более                      | 0,003 |
| Массовая доля железа, %, не более                        | 0,004 |
| Массовая доля кремния, %, не более                       | 0,01  |
| Массовая доля суммы свинца, меди и марганца, %, не более | 0,002 |

### 2.1.8 Вода

Для затворения цементных растворов пено- и пеногазобетонных смесей применялась вода в соответствии с ГОСТ 23732-2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия».

## 2.2 Методы исследования

Для определения свойств полученного материала были использованы как стандартные, так и не стандартизированные современные методы испытаний, обеспечивающие получение достоверных результатов.

В целях обработки и анализа полученных экспериментальных данных были задействованы различные программы ЭВМ, в том числе Microsoft Office (Word, Excel, PowerPoint), Autocad, Revit, OriginPro, Adobe Acrobat, PDF24. Все полученные результаты экспериментов представлены в виде таблиц и визуализированы в виде графиков.

### **2.2.1 Измельчение баритового концентрата**

Существует несколько способов измельчения частиц: шаровые мельницы, молотковые мельницы, вальцовые мельницы, роторные мельницы, ультразвуковые мельницы.

В данном исследовании в качестве оборудования для измельчения баритового концентрата выбрана шаровая мельница поскольку данный тип оборудования обеспечивает высокую производительность, равномерное измельчение частиц, низкую стоимость эксплуатации.

Принцип измельчения в шаровой мельнице заключается в том, что сначала баритовый концентрат загружается в барабан мельницы, где находятся стальные шары разных размеров. Барабан начинает вращаться, и шары начинают перемещаться по нему, сталкиваясь друг с другом и с баритовым концентратом. При этом происходит измельчение частиц, которые начинают постепенно уменьшаться в размере.

Кроме того, при измельчении вещества на шаровой мельнице происходят три важных процесса: абразия, деформация и разрушение. Абразия - это процесс, при котором поверхность частиц изнашивается при столкновении с шарами. Деформация - это процесс, при котором частицы изменяют свою форму и структуру под действием сил, вызванных столкновениями с шарами. Разрушение - это процесс, при котором частицы ломаются на меньшие частицы под действием сил, вызванных столкновениями.

Зависимость тонкости помола от продолжительности помола исследовалась при помощи микроанализатора Mastersizer Micro. Был определён гранулометрический состав баритового концентрата после 15, 30, 45 и 60 минут помола в шаровой мельнице. Влияние продолжительности помола на кристаллическую структуру баритового концентрата исследовалось при помощи рентгенофазового анализа и оптической микроскопии.

### **2.2.2 Влияние тонкости помола и количества баритсодержащей добавки на свойства цементной матрицы**

Для исследования влияния тонкости помола баритового концентрата на свойства цементной матрицы использовался концентрат с удельной поверхностью 310 м<sup>2</sup>/кг, 570 м<sup>2</sup>/кг и 840 м<sup>2</sup>/кг в количестве 10%, 20% и 30% от массы вяжущего. Величина удельной поверхности измерялась при помощи прибора ПСХ по ГОСТ 21043-87.

Исследовалось влияние баритового концентрата на такие свойства как нормальная плотность и сроки начала схватывания цементного теста по ГОСТ 30744-2001, плотность и прочность на сжатие цементного камня по ГОСТ 30744-2001, ГОСТ 18105-2018. Были подобраны составы образцов в соответствии с двухфакторным ортогональным центральным композиционным планом. Были получены уравнения регрессии, адекватно описывающие изменение характеристик цементной матрицы в зависимости от количества и тонкости помола баритового концентрата.

### **2.2.3 Исследование характеристик пенобетона с баритсодержащей добавкой**

Методом сухой минерализации, изготавливались образцы пенобетона, подобранные в соответствии с трёхфакторным ортогональным центральным композиционным планом. Было изготовлено 15 партий образцов с различным процентным содержанием баритового концентрата, раствора пенообразователя и кварцевого песка от массы вяжущего. Исследовались прочность пенобетона на сжатие и растяжение по ГОСТ 30744-2001, ГОСТ 10180-2012 и ГОСТ 18105-2018, плотность по ГОСТ 12730.1-2020 усадка при высыхании по ГОСТ 25485-2019.

Прочность материала на изгиб и сжатие исследовались при помощи гидравлического прессы. Прочность и плотность пенобетонных блоков исследовалась на 2, 7, 14 и 28 сутки после изготовления образцов, для наблюдения за динамикой набора прочности.

#### **2.2.4 Изготовление пеногазобетона вариотропной структуры**

Опираясь на результаты исследования баритсодержащих пенобетонов моноотропной структуры, изготавливались изделия вариотропной структуры из баритсодержащего пеногазобетона за счет рецептурно-технологических факторов при формировании изделий. Вариотропность структуры заключается в формировании развитой пористой структуры в центре образца, с сохранением более плотной структуры у его стенок, что позволяет добиться повышенной прочности в наиболее нагруженных участках изделия. Формирование такой структуры обеспечивается за счёт использования газообразующих добавок и специальных перфорированных форм, которые заполняются бетонной смесью не на весь объём.

#### **2.2.5 Определение коэффициента теплопроводности**

При помощи измерителя теплопроводности строительных материалов ИТП-МГ4 "250" Зонд, Россия, определялся коэффициент теплопроводности блока из баритсодержащего пеногазобетона вариотропной структуры в различных участках сечения образца в соответствии с ГОСТ 7076-99. Предварительно высушенный образец помещается в тепловую камеру, в которой создается направленный тепловой поток (от нагреваемой грани к противоположной "холодной"). Контрольные отсчеты снимаются после достижения постоянства (стационарности) теплового потока.

#### **2.2.6 Рентгенофазовый анализ (РФА)**

РФА — это метод исследования кристаллической структуры вещества с помощью рентгеновского излучения. Он основан на принципе дифракции рентгеновских лучей на кристаллической решетке материала.



Во время рентгенофазового анализа образец подвергается облучению рентгеновскими лучами, которые проходят через него и рассеиваются на его кристаллической решетке. Это приводит к появлению дифракционной картины, которая отображает отраженные лучи в виде интерференционных пиков.

Изучая положение, интенсивность и форму этих пиков, можно определить параметры кристаллической решетки материала, его фазовый состав и структуру.

Исследования производились с использованием дифрактометра ДРОН-3.

### **2.2.7 Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК)**

ДСК — это метод анализа термических свойств вещества, основанный на сравнении теплового потока между образцом и эталонным образцом во время одновременного нагрева. Образец и эталонный образец размещаются в двух ячейках, нагреваемых с постоянной скоростью. В процессе измерений определяются потеря массы образца и разница в тепловом потоке между ним и эталонным образцом.

ДСК используется для определения фазовых превращений, происходящих в пробе при изменении температуры.

Исследования производились с использованием синхронного термоанализатора Discovery SDT 650, США.

### **2.2.8 Рентгеновская флюоресценция**

Метод рентгеновской флюоресценции основан на явлении флюоресценции, возникающей при облучении образца рентгеновскими лучами. Он используется для анализа химического состава материалов.

Принцип метода заключается в следующем: рентгеновский луч облучает образец, в результате чего атомы образца поглощают энергию рентгеновского излучения и переходят в возбужденное состояние. При возвращении к основному состоянию атомы испускают характеристическое рентгеновское излучение с характерными энергиями. Детекторы регистрируют рентгеновское излучение, а спектрометр анализирует его энергетическое распределение. Путем сравнения полученного спектра с эталонными спектрами известных элементов можно идентифицировать элементы в образце и определить их концентрации.

Исследования производились с использованием энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра ARL QuantX и волнодисперсионного спектрометра Thermo Fisher Scientific ARL Optim`X 2000W, Швейцария.

### **2.2.9 Оптическая и электронная сканирующая микроскопия**

Оптическая и электронная сканирующая микроскопии — это методы получения изображений поверхности образцов. Оптическая микроскопия использует свет для формирования изображения, а электронная сканирующая микроскопия использует электронный пучок. Оптические микроскопы имеют ограниченное разрешение из-за волновых свойств света обычно ограничена диапазоном 200-400 нанометров. Электронная сканирующая микроскопия позволяет изучать объекты на очень малых масштабах, в диапазоне от нескольких ангстрем до нескольких нанометров.

Оптическая микроскопия проводилась с использованием оптического микроскопа Levenhuk 320 PLUS, США. По полученным микрофотографиям изучалось поровая структура образцов пеногазобетона, определялись количественное и объёмное распределение пор в структуре образца, а также показатель полидисперсности пор в различных участках образца пеногазобетона.

Электронная сканирующая микроскопия проводилась и использованием сканирующего электронного микроскопа LEO-1430 VP, Carl Zeiss, Германия. Образцы закреплялись на медные пластины с помощью двухстороннего электропроводного скотча, затем напылялась платина в атмосфере аргона (0,1–0,2 мбар) в камере катодного напыления установки в течение 130 сек. Далее образцы исследовали на сканирующем электронном микроскопе в условиях высокого вакуума с использованием детектора обратно отраженных электронов 4QBSD при комнатной температуре, ускоряющем напряжении 19 кВ и рабочем расстоянии 11-19 мм.

### **2.2.10 Математическая оптимизация состава**

Для составления статистических моделей были составлены ортогональные центральные композиционные планы эксперимента [102].

Сформированы планы для моделей вида:

$$y(b, x) = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_nx_n + b_{n+1}x_1^2 + \dots + b_{2n}x_n^2 + b_{2n+1}x_1x_2 \quad (0.1) \\ + \dots + b_kx_{n-1}x_n$$

Общее число неизвестных коэффициентов в модели (2.1) равно

$$(k + 1) = \binom{n+2}{2} = \frac{(n+2)(n+1)}{2} \quad (0.2)$$

Для оценки коэффициентов модели, представленной в виде уравнения (2.1), необходимо использовать план, который содержит независимые переменные типа  $x_i^2$  и принимает по крайней мере три различных значения. Для построения композиционных планов для квадратичных моделей можно добавить специальные точки к "ядру", образованному планом для линейной модели. Такие планы могут быть типа  $2^n$  или  $2^{n-p}$ , а центральный композиционный план можно получить, добавив к "ядру" точку в центре плана и некоторое количество звездных точек.

На рисунке 2.3 показаны точки композиционных планов для случаев  $n=2$  (а) и  $n=3$  (б), где "ядром" служат точки полного факторного эксперимента, обозначенные кружками. Звездные точки, которые находятся на координатных осях на расстоянии  $\alpha$  от центра плана, обозначены крестиками.

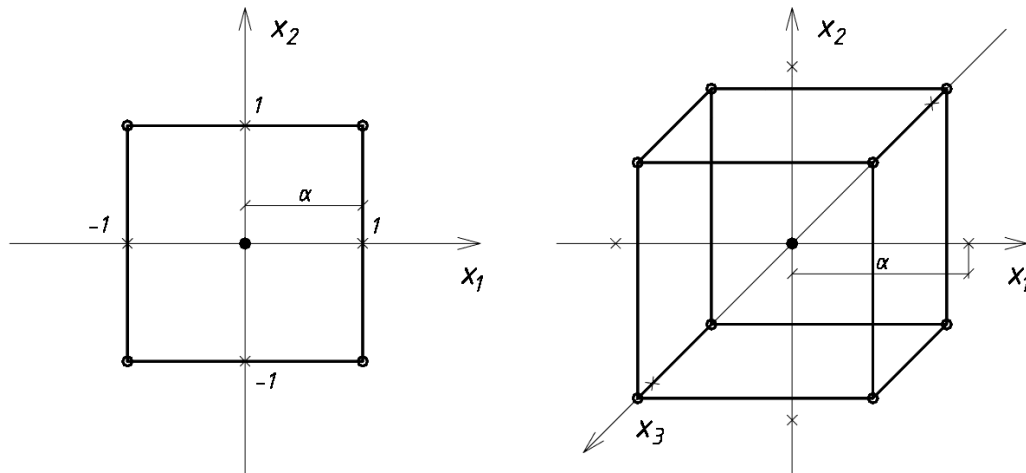


Рисунок 2.3 - Схема ортогонального двух- и трёхфакторного плана

Для обеспечения ортогональности преобразовываем модель (2.1) следующим образом:

$$y(b, x) = a_0 + b_1x_1 + \dots + b_nx_n + b_{n+1}(x_1^2 - \beta) + \dots + b_{2n}(x_n^2 - \beta) \quad (0.3) \\ + b_{2n+1}x_1x_2 + \dots + b_kx_{n-1}x_n$$

Коэффициенты регрессии уравнения (2.3) определяются по формулам (2.4-2.6).

$$b_i = \begin{cases} c_1 \sum_{i=1}^N x_i^j \tilde{y}^j, & i = 1, \dots, n, \\ c_2 \sum_{i=1}^N [(x_{i-n}^j)^2 - \beta] \tilde{y}^j, & i = n + 1, \dots, 2n, \\ c_3 \sum_{i=1}^N x_\mu^j x_\lambda^j \tilde{y}^j, & \mu, \lambda = 1, 2, \dots, n, \mu \neq \lambda, i = 2n + 1, \dots, k \end{cases} \quad (2.4)$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tilde{y}^j \quad (2.5)$$

$$b_0 = a_0 - \beta \sum_{i=1}^n b_{n+i} \quad (2.6)$$

Где  $N$  – общее число точек в плане,  $\alpha$  – координата звёздных точек относительно центра плана,  $2^{n-p}$  – число точек ядра композиционного плана.

Коэффициенты  $\beta$  и  $C$  уравнений (2.4, 2.6), а также параметры центральных композиционных планов приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Параметры ортогональных центральных композиционных планов

| Размерность (n) | Ядро плана ( $2^{n-p}$ ) | Количество испытаний (N) | $\alpha$ | $\beta$ | Элементы матрицы C |        |       |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|----------|---------|--------------------|--------|-------|
|                 |                          |                          |          |         | $c_1$              | $c_2$  | $c_3$ |
| 2               | $2^2$                    | 9                        | 1        | 0,667   | 0,1667             | 0,5    | 0,25  |
| 3               | $2^3$                    | 15                       | 1,215    | 0,73    | 0,0913             | 0,2298 | 0,125 |

Оценка значимости коэффициентов регрессии.

Для оценки адекватности модели вычисляется величина F-критерия

$$F = \frac{S_D/\varphi_1}{S_e/\varphi_2} \quad (2.7)$$

Оценка дисперсии ошибок наблюдений вычисляется с помощью суммы квадратов ошибок  $S_e$

$$S_e = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^v (\tilde{y}^{ij} - \tilde{y}^i)^2 \quad (2.8)$$

$\varphi_2$  – число степеней свободы для оценки дисперсии наблюдений.

$$\varphi_2 = N(v - 1) \quad (2.9)$$

$S_D$  – сумма квадратов, характеризующая неадекватность модели

$$S_D = \sum_{i=1}^N v(\tilde{y}^i - \hat{y}^i)^2 \quad (2.10)$$

$\varphi_1$  – число степеней свободы для остаточной дисперсии

$$\varphi_1 = N - k - 1 \quad (2.11)$$

$S^2$  – оценка дисперсии ошибок наблюдений

$$S^2 = \frac{S_e}{v\varphi_2} \quad (2.12)$$

Регрессионная модель считается адекватной при выполнении условия:

$$F < F_{кр} \quad (2.13)$$

Коэффициент  $b_i$  считается значимо отличающимся от нуля, если выполняется условие

$$|b_i| > h_i s_i \quad (2.14)$$

$h_1, h_2, h_3$ , - величины  $t_{кр}\sqrt{c_1}$ ,  $t_{кр}\sqrt{c_2}$ ,  $t_{кр}\sqrt{c_3}$  соответственно;

$t_{кр}$  – критическое значение распределения Стьюдента при заданных уровне значимости и числе степеней свободы.

Таблица 2.8 - Статистические данные для ортогональных центральных композиционных планов

| Раз-<br>мер-<br>ность<br>(n) | Коли-<br>чество<br>испы-<br>таний<br>(v) | Уро-<br>вень<br>значи-<br>мости<br>(1-P) | $\varphi_1$ | $\varphi_2$ | $h_1$ | $h_2$ | $h_3$ | $F_{кр}$ |
|------------------------------|--|--|-------------|-------------|-------|-------|-------|----------|
| 2                            | 1  | 0,05                                     | 3           | -           | 1,299 | 2,25  | 1,591 |          |
|                              | 3  |  | 3           | 18          | 0,858 | 1,486 | 1,051 | 3,16     |
| 3                            | 1  |  | 5           | -           | 0,777 | 1,232 | 0,909 |          |
|                              | 3  |  | 5           | 30          | 0,617 | 0,979 | 0,739 | 2,53     |

### 2.2.11 Оценка радиационно-защитных свойств

К методам испытания радиационно-защитных материалов относят натурные испытания, экспериментальная имитация облучения на ускорителях заряженных частиц различной природы и энергии, макро- и микроскопические исследования структуры облученных материалов и испытания их механических свойств, размерной нестабильности, а также математическое моделирование [103].

Радиационно-защитные свойства разрабатываемого материала рассчитывались аналитически для помещений постоянного пребывания сотрудников рентгенографических кабинетов и смежных помещений. Рассчитаны параметры защиты для конструкции из разработанных баритсодержащих пеногазобетонных блоков вариотропной структуры средней плотностью  $1180 \text{ кг/м}^3$  и произведено сравнение

с применяемыми на текущий момент, бетоном плотностью  $2350 \text{ кг/м}^3$  и баритовой штукатуркой плотностью  $3500 \text{ кг/м}^3$ , а также свинцом, применяемым для защиты от излучений высоких мощностей.

В основе расчётного метода лежит тот факт, что каждый химический элемент обладает определёнными уникальными характеристиками взаимодействия с ионизирующими излучениями, включающими комптоновское рассеяние, фотоэффект, образование электрон-позитронных пар, а также рассеяние и поглощение нейтронов, поэтому зная химический состав материала, можно точно определить его радиационно-защитные свойства.

### **2.3 Выводы по главе 2**

1. В работе использовались различные виды сырья для исследования баритосодержащих композиционных материалов, такие как баритовый концентрат, портландцемент, песок, вода, пенообразователи, алюминиевая пудра, фтористый натрий.

2. Использование современных стандартных и не стандартизированных методов исследования позволило получить достоверные результаты исследования свойств композиционных баритосодержащих материалов. Для этого были использованы следующие методы исследования: рентгенофазовый анализ, дифференциальная сканирующая колориметрия, рентгеновская флуоресценция, физико-механические испытания, методы математического планирования и моделирования, лазерная гранулометрия, электронная сканирующая микроскопия, оптическая микроскопия, аналитическая оценка ослабления ионизирующих излучений.

## **ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ ТОНКОМОЛОТОЙ БАРИТСОДЕРЖАЩЕЙ ДОБАВКИ НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОЙ МАТРИЦЫ**

### **3.1 Закономерности изменения гранулометрического состава тонкомолотой баритсодержащей добавки**

Известно, что дисперсность компонентов с высокими атомными номерами оказывает значительное влияние на радиационно-защитные свойства материала. При увеличении дисперсности радиационно-защитного компонента повышается вероятность взаимодействия ионизирующих излучений с атомами бария. Это способствует более эффективному поглощению и рассеиванию радиации, а также обеспечивает более равномерную радиационную защиту [104].

Электронно-микроскопические исследования исходного сырья баритового концентрата (рисунок 3.1) показали, что образец содержит как множество тонкодисперсных частиц размером от 1 – 2 мкм, так и довольно крупные частицы с размером более 100 – 150 мкм.

Использование такого разнородного по дисперсности материала в качестве наполнителя и его равномерное распределение в составе бетонной смеси затруднительно и требует придание ему определенной равномерности по дисперсному составу.

Для увеличения дисперсности баритового концентрата и изучения её влияния на свойства композиционных материалов, баритовый концентрат был подвергнут измельчению в шаровой мельнице в течение 15, 30, 45 и 60 минут с последующим определением удельной поверхности и гранулометрического состава. Результаты измерения гранулометрического состава и их анализ приведены на рисунках 3.2, 3.3, а изменение удельной поверхности на рисунок 3.4.

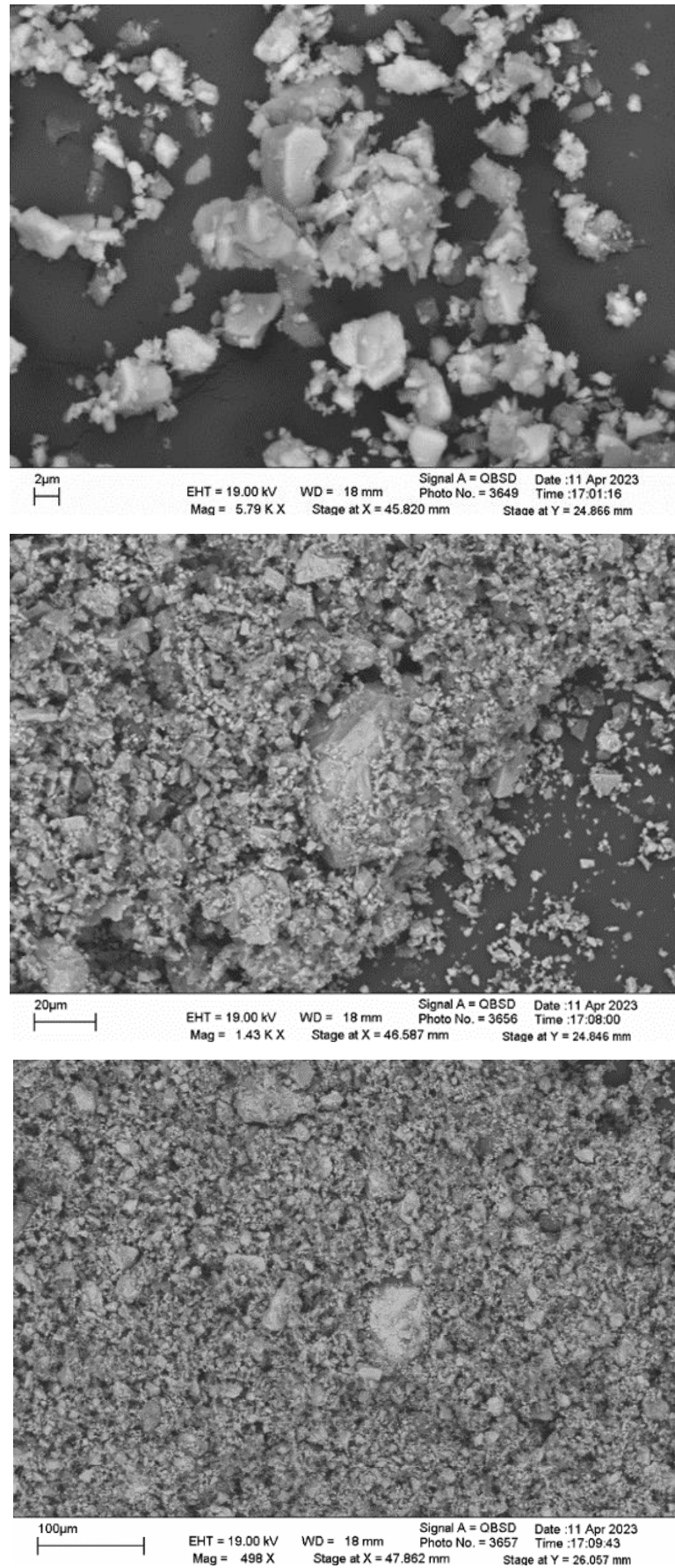
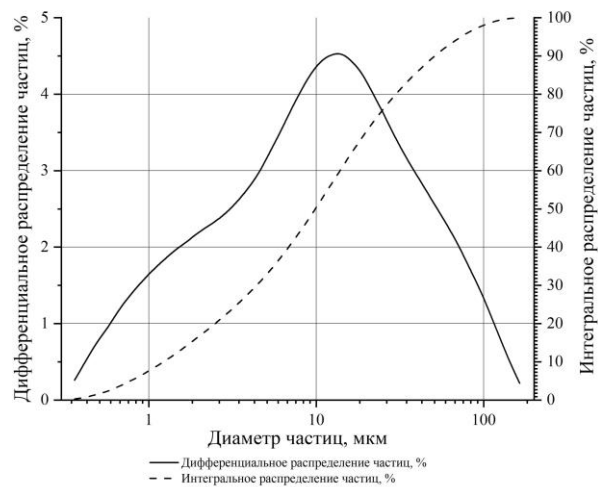
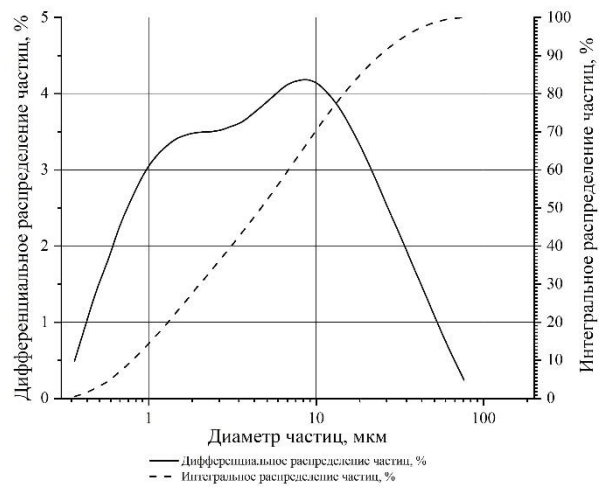


Рисунок 3.1 - Электронные микрофотографии исходного сырья баритового концентрата

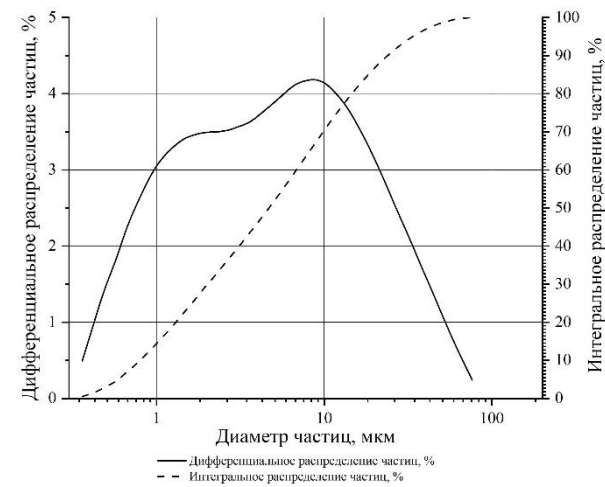




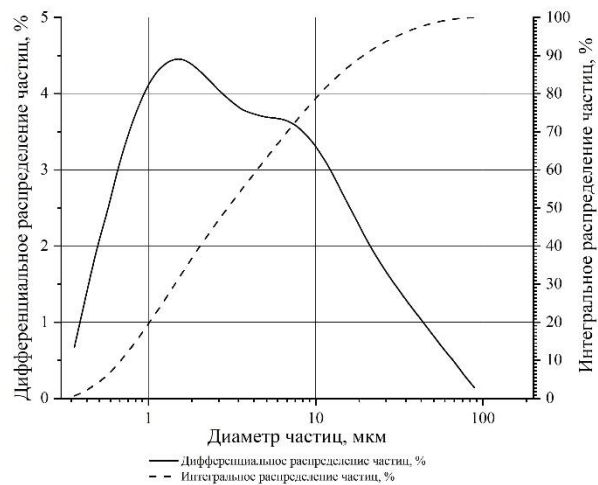
(а)



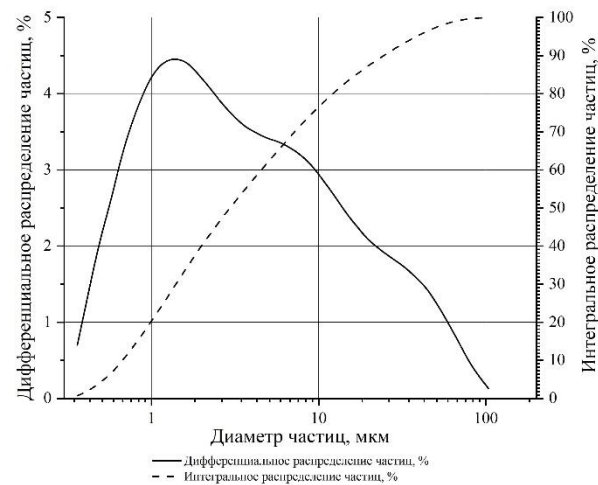
(б)



(в)



(г)



(д)

Рисунок 3.2 - Гранулометрический состав баритового концентрата *исходного (а), после 15 минут (б), 30 минут (в), 45 минут (г) и 60 минут (д) помола*



Рисунок 3.3 - Зависимость размера частиц баритового концентрата от времени помола

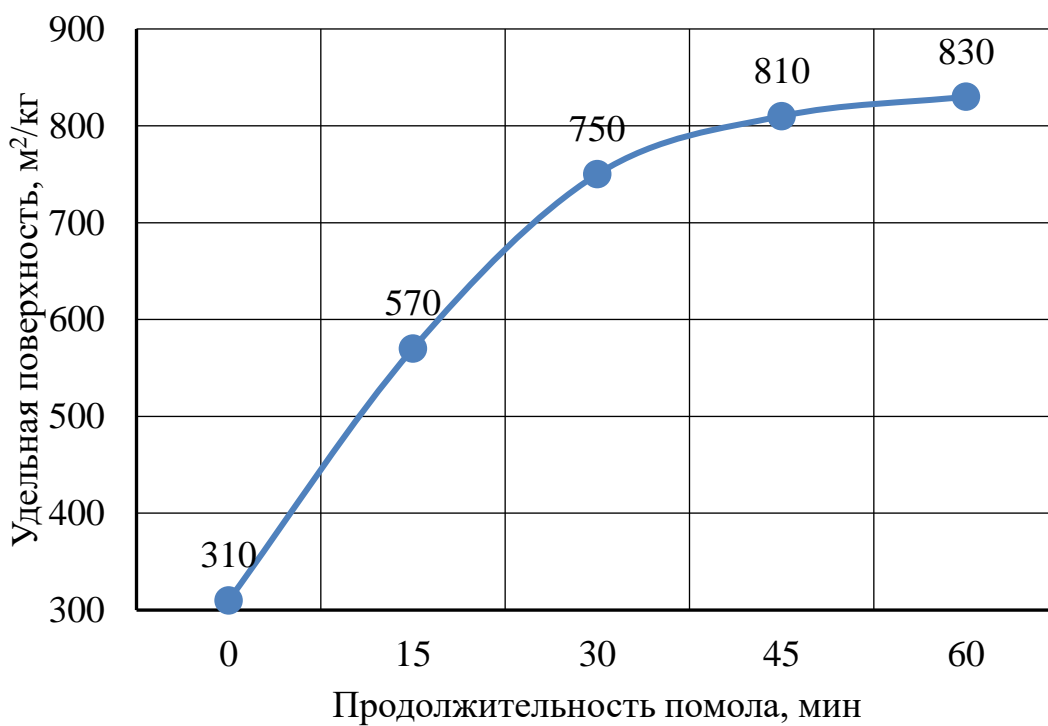


Рисунок 3.4 - Изменение удельной поверхности баритового концентрата от времени помола

Согласно полученным результатам, после 30 минут помола уменьшение размеров частиц замедляется, а после 45 совсем прекращается. При этом значительного прироста удельной поверхности частиц также не происходит. Это вызвано тем, что на начальных стадиях процесса измельчения размеры частиц быстро уменьшаются благодаря интенсивным столкновениям частиц, но с течением времени количество частиц, которые еще способны измельчаться, уменьшается. Это приводит к тому, что частота столкновений между шарами и частицами снижается, что в свою очередь замедляет процесс измельчения.

При выбранной технологии измельчения удалось добиться максимальной удельной поверхности равной 830 м<sup>2</sup>/кг.

Оценку влияния тонкости помола на искажение кристаллов барита проводили рентгенофазовым анализом. При этом оценивались такие параметры как интенсивность пика, ширина пика на его полувысоте, площадь пика и отношение площади пика к его интенсивности (табл. 3.1).

Также оценивались размеры кристаллитов, которые представляют участки кристаллического материала, которые обладают упорядоченной атомной или молекулярной структурой. Кристаллиты являются основными строительными блоками кристаллов.

В кристаллическом материале атомы или молекулы упорядочены в регулярную трехмерную решетку, образуя повторяющиеся структурные элементы. Кристаллиты представляют собой небольшие участки этой решетки, где структура повторяется. Расчёт размеров кристаллитов  $L_d$  проводился по формуле:

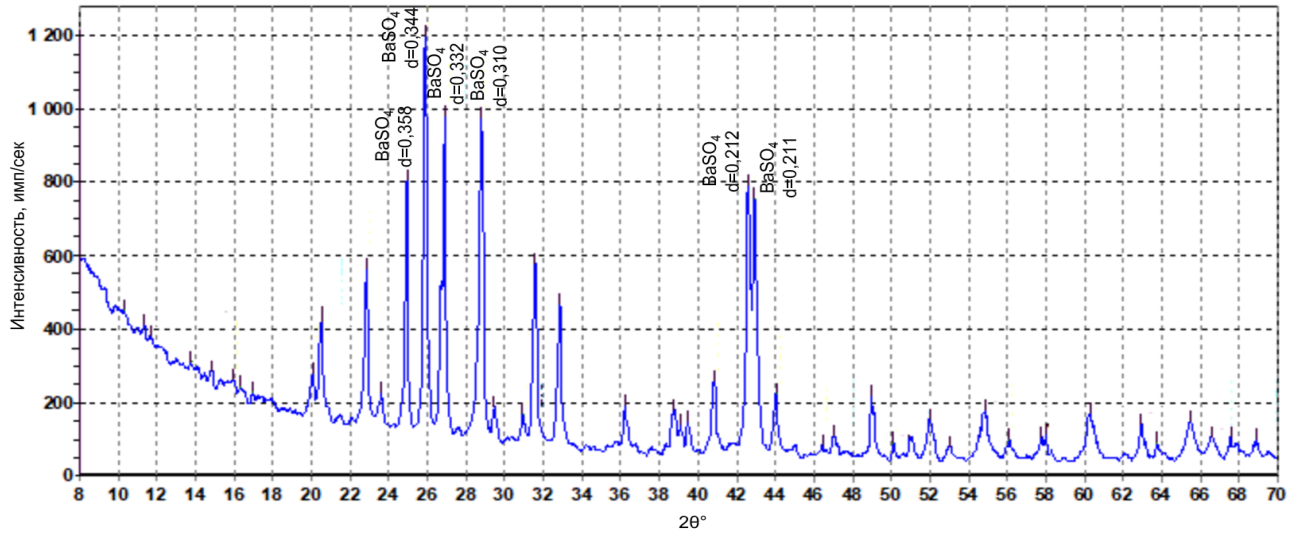
$$L_d = \lambda \cdot 180^\circ / (\pi \nu \cos \theta), \quad (3.1)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения медного анода, равная 1,537 Å;  $\nu$  – полуширина пика, рад;  $\theta$  – брэгговский угол падения и отражения рентгеновского луча.

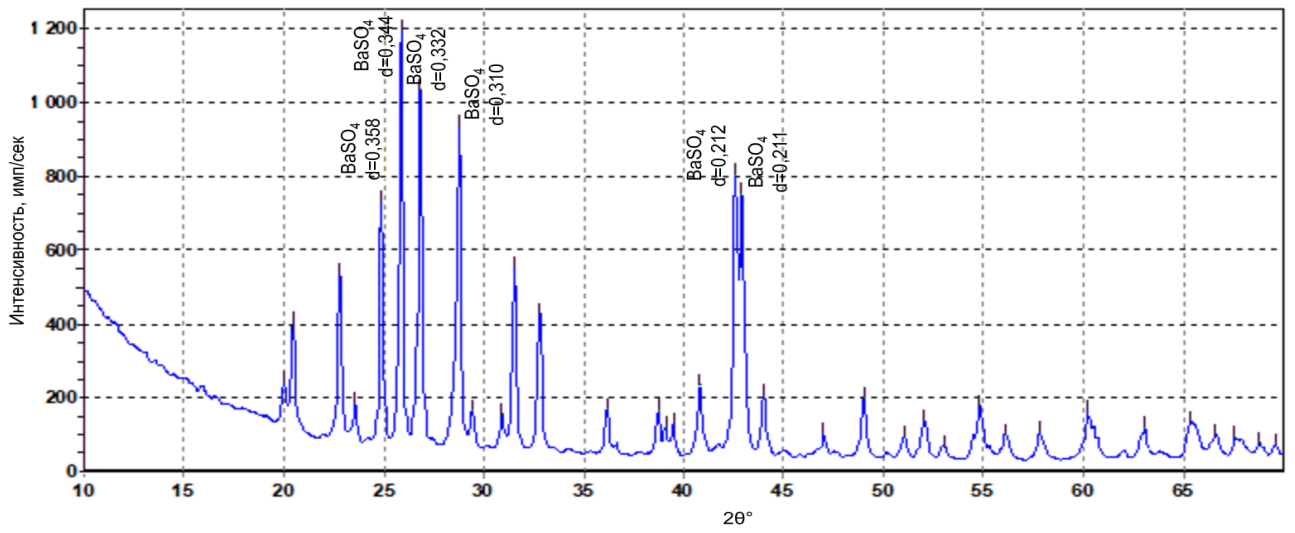
Таблица 3.1 - Рентгеновские характеристики измельченного баритового концентрата

| Наименование образца | Угол $2\theta$ | Площадь пика | Интенсивность пика | Размер кристаллитов, нм | Ширина пика на его полувысоте | Межплоскостное расстояние $d$ , нм | Пл/Инт |
|----------------------|----------------|--------------|--------------------|-------------------------|-------------------------------|------------------------------------|--------|
| Барит исходный       | 24,916         | 119,12       | 677                | 53,6                    | 0,1685                        | 0,358                              | 0,1760 |
|                      | 25,896         | 207,04       | 1077               | 49,1                    | 0,1840                        | 0,344                              | 0,1923 |
|                      | 26,886         | 167,31       | 863                | 48,8                    | 0,1855                        | 0,332                              | 0,1938 |
|                      | 28,788         | 215,87       | 870                | 38,3                    | 0,2375                        | 0,310                              | 0,2481 |
|                      | 42,620         | 186,25       | 733                | 38,9                    | 0,2431                        | 0,212                              | 0,2540 |
|                      | 42,925         | 173,85       | 696                | 39,3                    | 0,2408                        | 0,211                              | 0,2501 |
| ТБД 30 мин.          | 24,879         | 118,22       | 652                | 52,0                    | 0,1735                        | 0,358                              | 0,1813 |
|                      | 25,863         | 230,55       | 1117               | 45,8                    | 0,1975                        | 0,344                              | 0,2065 |
|                      | 26,832         | 220,73       | 953                | 40,9                    | 0,2215                        | 0,332                              | 0,2315 |
|                      | 28,752         | 223,08       | 868                | 37,0                    | 0,2460                        | 0,310                              | 0,2571 |
|                      | 42,603         | 202,75       | 764                | 37,3                    | 0,2538                        | 0,212                              | 0,2652 |
|                      | 42,927         | 180,38       | 712                | 39,1                    | 0,2424                        | 0,211                              | 0,2533 |
| ТБД 45 мин.          | 24,885         | 153,27       | 555                | 34,1                    | 0,2645                        | 0,358                              | 0,2763 |
|                      | 25,865         | 232,30       | 960                | 39,1                    | 0,2315                        | 0,344                              | 0,2420 |
|                      | 26,830         | 229,13       | 797                | 32,9                    | 0,2750                        | 0,332                              | 0,2874 |
|                      | 28,755         | 263,61       | 813                | 29,3                    | 0,3102                        | 0,310                              | 0,3241 |
|                      | 42,600         | 269,65       | 173                | 24,6                    | 0,3845                        | 0,212                              | 0,4018 |
|                      | 42,920         | 205,95       | 664                | 31,9                    | 0,2968                        | 0,211                              | 0,3102 |

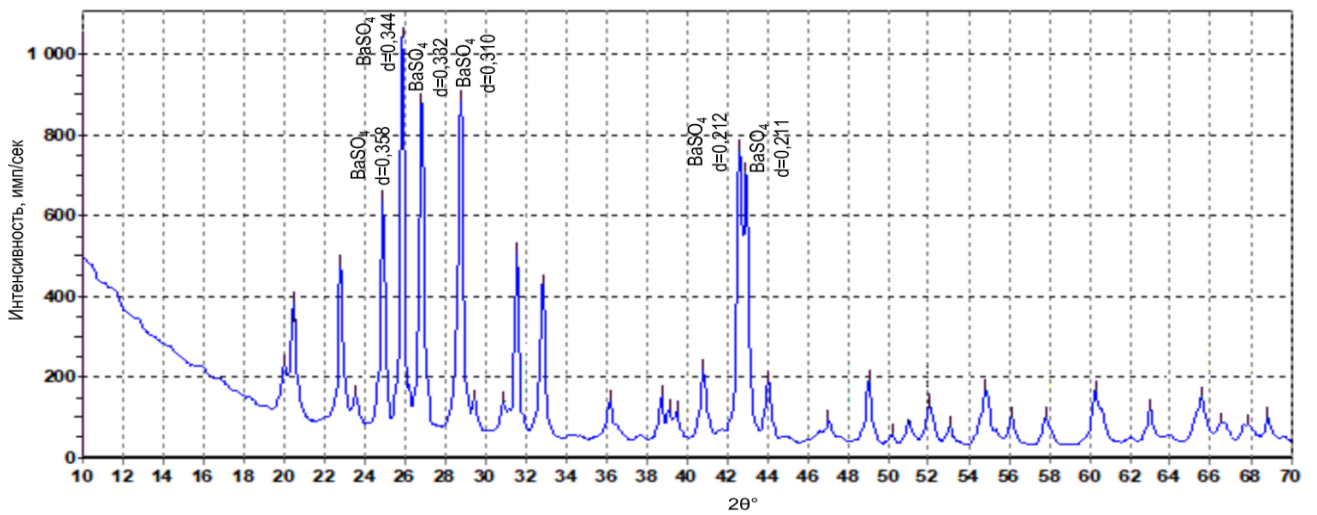
Сравнение рентгеновских спектров представлено на рисунке 3.5. Изменение размеров кристаллитов, рассчитанных по формуле (3.1) и отношение площади пика к его интенсивности в зависимости от времени измельчения приведены на рисунках 3.6, 3.7.



(а)



(б)



(в)

Рисунок 3.5 - Дифрактограммы образцов баритового концентрата (а – исходный барит, б – через 30 мин. помола, в – через 45 мин. помола)

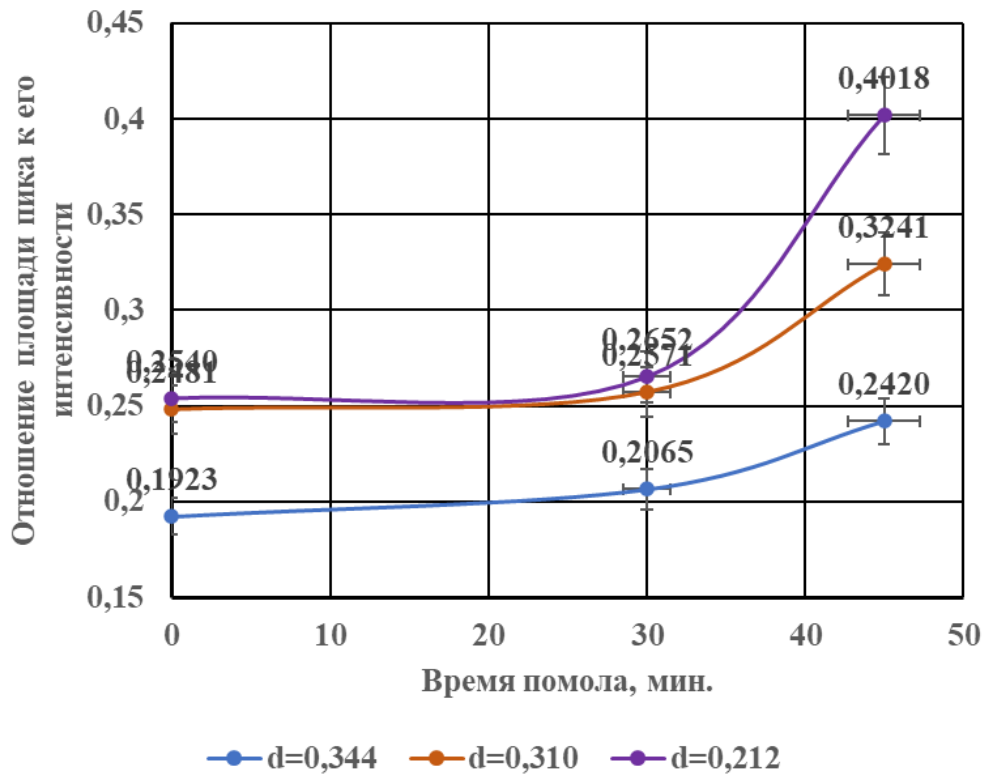


Рисунок 3.6 - Изменение отношения площади пика к его интенсивности в зависимости от времени измельчения

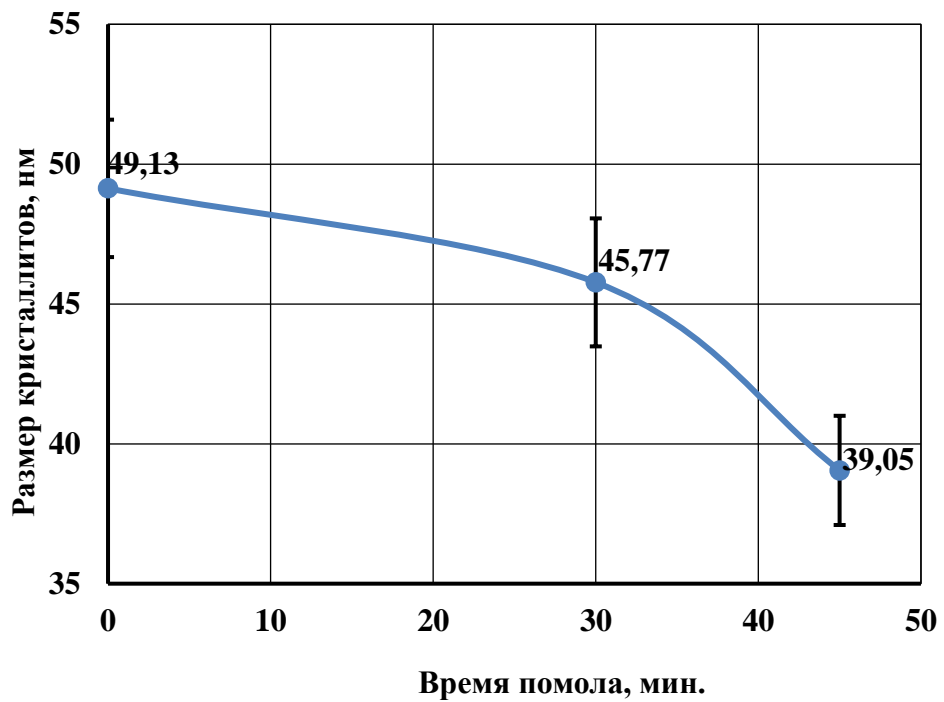


Рисунок 3.7 - Изменение размеров кристаллитов (по пику  $d = 0,344$  нм) в зависимости от времени измельчения

Как видно из представленных данных с увеличением времени помола увеличивается показатель отношения площади пика к его интенсивности, что свидетельствует об аморфизации частиц барита. При этом размер областей (кристаллитов) с однородностью структуры внутри кристаллов снижается. Длительный помол баритового концентрат (более 45 мин) не приводит к существенным количественным показателям по дисперсности частиц, поэтому дальнейшие исследования не проводились.

### **3.2 Влияние тонкости помола и количества баритсодержащей добавки на свойства цементной матрицы**

Оптимизация концентрации тонкомолотого барита в цементной матрице является важной задачей, исходя из ряда факторов, обусловленных его физико-химическими свойствами и влиянием на свойства конечного продукта.

При разработке состава цементного-баритового раствора требуется учитывать аспекты, влияющие на свойства системы, стремясь к оптимальному балансу концентрации тонкомолотого барита, который позволит улучшить свойства цементной матрицы, не допуская неравномерное распределение прочности и плотности по толщине изделия [105].

В данной работе исследовано влияние полученной путём измельчения баритового концентрата тонкомолотой баритсодержащей добавки (далее ТБД) на свойства цементной матрицы в зависимости от её тонкости помола и процентного содержания.

Для исследования влияния ТБД на свойства цементной матрицы при помощи методов статистического планирования были подобраны составы образцов с различным содержанием и тонкостью помола баритсодержащей добавки. Составы исследуемых образцов подобраны в соответствии с двухфакторным ортогональным

центральный композиционный планом (см. раздел 2.2.10) и представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Составы исследуемых образцов

| № Состав   | Матрица        |                | Натуральные значения переменных |                |   |                |
|------------|----------------|----------------|---------------------------------|----------------|---|----------------|
|            | x <sub>1</sub> | x <sub>2</sub> | Кол-во ТБД от массы вяжущего, % |                | Уд. пов. ТБД, м <sup>2</sup> /кг, S <sub>уд</sub> |                |
|            |                |                | Значение                        | Инт. вар-ия, % | Значение  | Инт. вар-ия, % |
| 0 (Контр.) | -              | -              | -                               | -              | -   | -              |
| 1          | -1             | -1             | 10                              | 10             | 310   | 260            |
| 2          | 0              | -1             | 20                              |                | 310   |                |
| 3          | 1              | -1             | 30                              |                | 310   |                |
| 4          | -1             | 0              | 10                              |                | 570   |                |
| 5          | 0              | 0              | 20                              |                | 570   |                |
| 6          | 1              | 0              | 30                              |                | 570   |                |
| 7          | -1             | 1              | 10                              |                | 830   |                |
| 8          | 0              | 1              | 20                              |                | 830   |                |
| 9          | 1              | 1              | 30                              |                | 830   |                |

Для двухфакторного плана уравнение (0.1) имеет вид:

$$y(b, x) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2, \quad (3.1)$$

Для обеспечения ортогональности преобразовываем модель (3.1):

$$y(b, x) = a_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}(x_1^2 - \beta) + b_{22}(x_2^2 - \beta) + b_{12}x_1x_2, \quad (3.2)$$

Для перехода от закодированных матричных значений к натуральным используются следующие уравнения:

$$X_1 = \frac{x_1 - 20}{10}$$

$$X_2 = \frac{x_2 - 570}{260}$$

где  $x_1$  - количество ТБД от массы вяжущего [10%; 30%];  $x_2$  - удельная поверхность ТБД [310 м<sup>2</sup>/кг; 830 м<sup>2</sup>/кг].

При оценке значимости коэффициентов рассчитывается произведение  $h_i s_i$  по формуле (2.14). Коэффициенты считаются значимо отличающимися от нуля, когда выполняется условие  $|b_i| > h_i s_i$ . При оценке адекватности модели  $F$ -критерий рассчитывается по формуле (2.7). Модель считается адекватно описывающей исследуемые показатели, если  $F < F_{кр}$ . Результаты построения аналитических моделей приведены в таблице 3.3 и на рисунках 3.8, 3.9.



Таблица 3.3 - Результаты построения аналитических моделей зависимости физико-механической характеристик цементно-баритового камня от количества и тонкости помола ТБД

| № опыта   | Матрица |       | Натуральные значения переменных |                         | $R_{сж,2}$ , Мпа  |  |               |             |           | $R_{сж,7}$ , Мпа  |   |               |             |           |  |
|---|---------|-------|---------------------------------|-------------------------|---|--|---------------|-------------|-----------|---|---|---------------|-------------|-----------|--|
|   | $X_1$   | $X_2$ | ТБД, %                          | Суд, м <sup>2</sup> /кг | $\tilde{y}_1$   | $\tilde{y}_2$  | $\tilde{y}_3$ | $\tilde{y}$ | $\hat{y}$ | $\tilde{y}_1$   | $\tilde{y}_2$   | $\tilde{y}_3$ | $\tilde{y}$ | $\hat{y}$ |  |
| Контрольный   | -       | -     | -                               | -                       | 67,2  | 67,0   | 68,8          | 67,6        | 0,0       | 79,0  | 78,7  | 77,9          | 78,5        | 0,0       |  |
| 1   | -1      | -1    | 10                              | 310                     | 78,2  | 78,1   | 73,9          | 76,7        | 76,7      | 85,8  | 86,7  | 87,2          | 86,6        | 87,3      |  |
| 2   | 0       | -1    | 20                              | 310                     | 81,0  | 81,4   | 82,0          | 81,5        | 81,4      | 90,5  | 90,4  | 92,5          | 91,1        | 90,9      |  |
| 3   | 1       | -1    | 30                              | 310                     | 76,5  | 77,0   | 79,5          | 77,7        | 76,7      | 88,3  | 86,3  | 89,1          | 87,9        | 87,3      |  |
| 4   | -1      | 0     | 10                              | 570                     | 67,7  | 67,7   | 70,0          | 68,5        | 70,1      | 84,9  | 85,2  | 83,2          | 84,4        | 83,8      |  |
| 5   | 0       | 0     | 20                              | 570                     | 73,6  | 74,8   | 75,7          | 74,7        | 74,7      | 86,1  | 87,4  | 86,0          | 86,5        | 87,4      |  |
| 6   | 1       | 0     | 30                              | 570                     | 70,8  | 68,4   | 70,1          | 69,8        | 70,1      | 83,8  | 83,8  | 84,3          | 84,0        | 83,8      |  |
| 7   | -1      | 1     | 10                              | 830                     | 64,5  | 64,3   | 61,3          | 63,4        | 63,4      | 77,0  | 77,2  | 78,2          | 77,5        | 77,4      |  |
| 8   | 0       | 1     | 20                              | 830                     | 69,2  | 69,1   | 65,7          | 68,0        | 68,1      | 81,9  | 83,2  | 79,8          | 81,6        | 80,9      |  |
| 9   | 1       | 1     | 30                              | 830                     | 63,8  | 65,4   | 64,4          | 64,6        | 63,4      | 77,5  | 76,4  | 75,7          | 76,6        | 77,4      |  |
| Коэффициенты уравнения регрессии                            |         |       |                                 |                         | $a_0$   | 74,06  |               |             |           |   | 87,36   |               |             |           |  |
|   |         |       |                                 |                         | $b_0$   | 74,71  |               |             |           |   | 87,36   |               |             |           |  |
|   |         |       |                                 |                         | $b_1$   | 0,57 ; $ b_1  < h_{1S1} = 0,76 \Rightarrow$ коэф-т не значимый     |               |             |           |   | 0 ; $ b_1  < h_{1S1} = 0,52 \Rightarrow$ коэф-т не значимый         |               |             |           |  |
|   |         |       |                                 |                         | $b_2$   | -6,65 ; $ b_2  > h_{1S2} = 0,76 \Rightarrow$ коэф-т значимый       |               |             |           |   | -4,99 ; $ b_2  > h_{1S2} = 0,52 \Rightarrow$ коэф-т значимый        |               |             |           |  |
|   |         |       |                                 |                         | $b_{11}$  | -4,62 ; $ b_{11}  > h_{2S11} = 1,31 \Rightarrow$ коэф-т значимый   |               |             |           |   | -3,59 ; $ b_{11}  > h_{2S11} = 0,91 \Rightarrow$ коэф-т значимый    |               |             |           |  |
|   |         |       |                                 |                         | $b_{22}$  | 0,98 ; $ b_{22}  < h_{2S22} = 1,31 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |               |             |           |   | -1,43 ; $ b_{22}  > h_{2S22} = 0,91 \Rightarrow$ коэф-т значимый    |               |             |           |  |
|   |         |       |                                 |                         | $b_{12}$  | 0,06 ; $ b_{12}  < h_{3S12} = 0,93 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |               |             |           |   | -0,57 ; $ b_{12}  < h_{3S12} = 0,64 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |               |             |           |  |
| Уравнение регрессии в нормализованных обозначениях факторов |         |       |                                 |                         | $R_{сж,2}=74,71-6,65 X_2-4,62 X_1^2$                          |  |               |             |           | $R_{сж,7}=87,36-4,99 X_2-3,59 X_1^2-1,43 X_2^2$                                     |   |               |             |           |  |
| Уравнение регрессии с натуральными значениями факторов      |         |       |                                 |                         | $R_{сж,2}=70.8088 + 1.848 x_1 - 0.0462 x_1^2 - 0.0255769 x_2$ |  |               |             |           | $R_{сж,7}=77.0667 + 1.436 x_1 - 0.0359 x_1^2 + 0.00492308 x_2 - 0.0000211538 x_2^2$ |   |               |             |           |  |
| $F$ критерий  |         |       |                                 |                         | 2,07 < $F_{кр.} = 3,16$                                       |  |               |             |           | 2,94 < $F_{кр.} = 3,16$   |   |               |             |           |  |

Продолжение таблицы 3.3

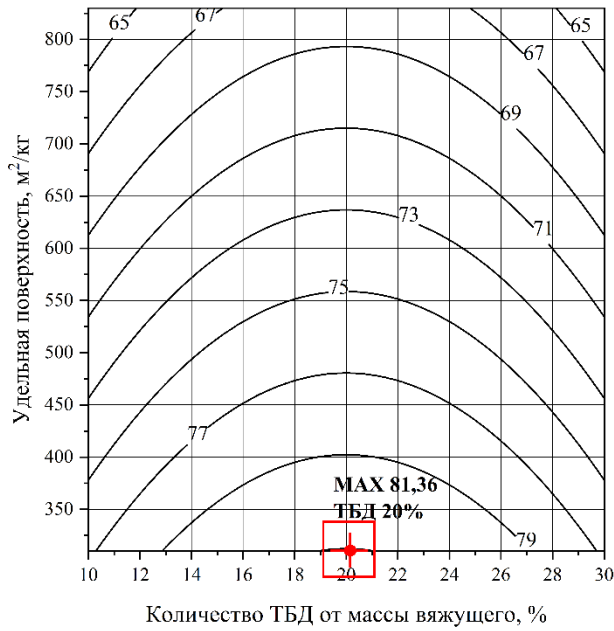
| № опыта   | Матрица |       | Натуральные значения переменных |  | $R_{сж,14}$ , Мпа   |               |               |             |   | $R_{сж,21}$ , Мпа   |               |               |             |           |
|---|---------|-------|---------------------------------|--|---|---------------|---------------|-------------|---|---|---------------|---------------|-------------|-----------|
|   | $X_1$   | $X_2$ | ТБД, %                          | $S_{уд}$ , м <sup>2</sup> /кг  | $\tilde{y}_1$   | $\tilde{y}_2$ | $\tilde{y}_3$ | $\tilde{y}$ | $\hat{y}$   | $\tilde{y}_1$   | $\tilde{y}_2$ | $\tilde{y}_3$ | $\tilde{y}$ | $\hat{y}$ |
| Контрольный   | -       | -     | -                               | -  | 88,4  | 90,6          | 90,4          | 89,8        | 0,0   | 98,5  | 98,6          | 102,4         | 99,8        | 0,0       |
| 1   | -1      | -1    | 10                              | 310  | 99,7  | 100,1         | 100,2         | 100,0       | 100,6   | 109,3   | 110,7         | 106,7         | 108,9       | 108,7     |
| 2   | 0       | -1    | 20                              | 310  | 104,3   | 105,6         | 101,7         | 103,9       | 104,3   | 110,0   | 108,4         | 113,4         | 110,6       | 110,6     |
| 3   | 1       | -1    | 30                              | 310  | 99,4  | 99,8          | 99,0          | 99,4        | 98,3  | 105,6   | 105,5         | 103,2         | 104,8       | 105,1     |
| 4   | -1      | 0     | 10                              | 570  | 100,1   | 100,2         | 95,5          | 98,6        | 97,3  | 104,5   | 105,6         | 103,9         | 104,7       | 104,9     |
| 5   | 0       | 0     | 20                              | 570  | 101,8   | 102,9         | 98,6          | 101,1       | 101,0   | 106,7   | 108,2         | 104,6         | 106,5       | 106,8     |
| 6   | 1       | 0     | 30                              | 570  | 92,1  | 93,7          | 94,7          | 93,5        | 95,0  | 102,2   | 101,2         | 102,0         | 101,8       | 101,3     |
| 7   | -1      | 1     | 10                              | 830  | 87,4  | 85,5          | 88,6          | 87,2        | 87,9  | 93,2  | 95,6          | 94,5          | 94,4        | 94,5      |
| 8   | 0       | 1     | 20                              | 830  | 90,2  | 91,0          | 94,8          | 92,0        | 91,6  | 95,8  | 98,4          | 95,8          | 96,7        | 96,4      |
| 9   | 1       | 1     | 30                              | 830  | 85,1  | 85,0          | 87,9          | 86,0        | 85,6  | 91,9  | 89,4          | 90,7          | 90,7        | 90,9      |
| Коэффициенты уравнения регрессии                            |         |       |                                 | $a_0$  | 100,99  |               |               |             |   | 106,79  |               |               |             |           |
|   |         |       |                                 | $b_0$  | 100,99  |               |               |             |   | 106,79  |               |               |             |           |
|   |         |       |                                 | $b_1$  | -1,15 ; $ b_1  > h_{1S1} = 0,89 \Rightarrow$ коэф-т значимый        |               |               |             |   | -1,8 ; $ b_1  > h_{1S1} = 0,77 \Rightarrow$ коэф-т значимый       |               |               |             |           |
|   |         |       |                                 | $b_2$  | -6,35 ; $ b_2  > h_{1S2} = 0,89 \Rightarrow$ коэф-т значимый        |               |               |             |   | -7,1 ; $ b_2  > h_{1S2} = 0,77 \Rightarrow$ коэф-т значимый       |               |               |             |           |
|   |         |       |                                 | $b_{11}$   | -4,88 ; $ b_{11}  > h_{2S11} = 1,54 \Rightarrow$ коэф-т значимый    |               |               |             |   | -3,71 ; $ b_{11}  > h_{2S11} = 1,33 \Rightarrow$ коэф-т значимый  |               |               |             |           |
|   |         |       |                                 | $b_{22}$   | -3 ; $ b_{22}  > h_{2S22} = 1,54 \Rightarrow$ коэф-т значимый       |               |               |             |   | -3,31 ; $ b_{22}  > h_{2S22} = 1,33 \Rightarrow$ коэф-т значимый  |               |               |             |           |
|   |         |       |                                 | $b_{12}$   | -0,13 ; $ b_{12}  < h_{3S12} = 1,09 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |               |               |             |   | 0,1 ; $ b_{12}  < h_{3S12} = 0,94 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |               |               |             |           |
| Уравнение регрессии в нормализованных обозначениях факторов |         |       |                                 | $R_{сж,14}=100,99-1,15 X_1-6,35 X_2-4,88 X_1^2-3 X_2^2$                          |   |               |               |             | $R_{сж,21}=106,79-1,8 X_1-7,1 X_2-3,71 X_1^2-3,31 X_2^2$                            |   |               |               |             |           |
| Уравнение регрессии с натуральными значениями факторов      |         |       |                                 | $R_{сж,14}=83.2725 + 1.837 x_1 - 0.0488 x_1^2 + 0.0261686 x_2 - (3 x_2^2)/67600$ |   |               |               |             | $R_{сж,21}=95.2068 + 1.304 x_1 - 0.0371 x_1^2 + 0.0285118 x_2 - 0.0000489645 x_2^2$ |   |               |               |             |           |
| $F$ критерий  |         |       |                                 | 2,01 < $F_{кр.} = 3,16 \Rightarrow$ модель адекватна                             |   |               |               |             | 0,29 < $F_{кр.} = 3,16 \Rightarrow$ модель адекватна                                |   |               |               |             |           |

Продолжение таблицы 3.3

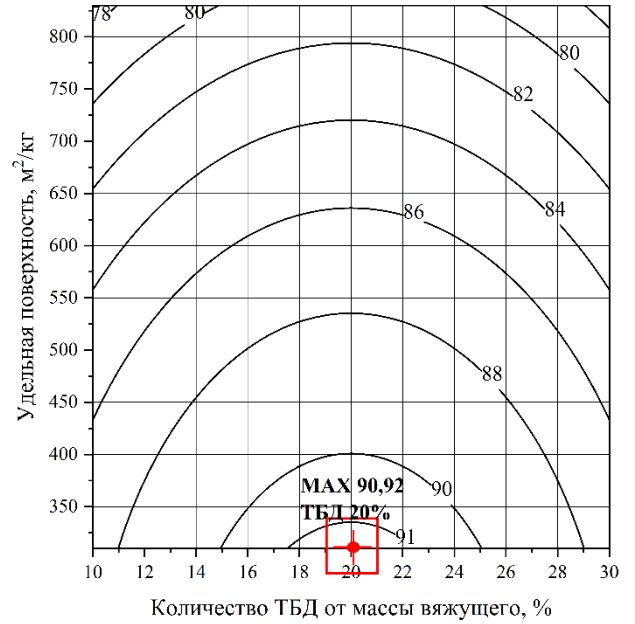
| № опыта   | Матрица |       | Натуральные значения переменных |   | $R_{сж,28}$ , Мпа   |               |               |             |   | $R_{сж,60}$ , Мпа   |               |               |             |           |
|---|---------|-------|---------------------------------|---|---|---------------|---------------|-------------|---|---|---------------|---------------|-------------|-----------|
|   | $X_1$   | $X_2$ | ТБД, %                          | Суд, м <sup>2</sup> /кг   | $\tilde{y}_1$   | $\tilde{y}_2$ | $\tilde{y}_3$ | $\tilde{y}$ | $\hat{y}$   | $\tilde{y}_1$   | $\tilde{y}_2$ | $\tilde{y}_3$ | $\tilde{y}$ | $\hat{y}$ |
| Контрольный   | -       | -     | -                               | -   | 105,1   | 106,4         | 104,2         | 105,2       |   | 108,8   | 110,8         | 107,5         | 109,0       | 0,0       |
| 1   | -1      | -1    | 10                              | 310   | 110,6   | 114,4         | 113,0         | 112,7       | 112,3   | 118,2   | 119,4         | 116,1         | 117,9       | 117,9     |
| 2   | 0       | -1    | 20                              | 310   | 114,2   | 113,9         | 112,8         | 113,7       | 113,6   | 117,8   | 121,3         | 118,3         | 119,1       | 119,3     |
| 3   | 1       | -1    | 30                              | 310   | 109,1   | 109,1         | 107,3         | 108,5       | 108,9   | 115,8   | 113,2         | 113,2         | 114,1       | 114,0     |
| 4   | -1      | 0     | 10                              | 570   | 106,2   | 106,8         | 110,6         | 107,9       | 108,4   | 114,1   | 113,7         | 111,3         | 113,0       | 113,7     |
| 5   | 0       | 0     | 20                              | 570   | 109,0   | 108,6         | 109,3         | 108,9       | 109,7   | 116,1   | 116,5         | 111,3         | 114,6       | 115,0     |
| 6   | 1       | 0     | 30                              | 570   | 107,3   | 108,4         | 103,2         | 106,3       | 105,0   | 111,3   | 112,4         | 108,8         | 110,9       | 109,8     |
| 7   | -1      | 1     | 10                              | 830   | 100,1   | 100,0         | 95,5          | 98,5        | 98,4  | 102,0   | 104,2         | 105,4         | 103,8       | 103,2     |
| 8   | 0       | 1     | 20                              | 830   | 102,4   | 102,2         | 96,9          | 100,5       | 99,8  | 105,9   | 103,9         | 105,7         | 105,2       | 104,6     |
| 9   | 1       | 1     | 30                              | 830   | 95,0  | 92,6          | 95,1          | 94,2        | 95,1  | 98,3  | 98,5          | 97,7          | 98,2        | 99,4      |
| Коэффициенты уравнения регрессии                            |         |       |                                 | $a_0$   | 109,72  |               |               |             |   | 115,04  |               |               |             |           |
|   |         |       |                                 | $b_0$   | 109,72  |               |               |             |   | 115,04  |               |               |             |           |
|   |         |       |                                 | $b_1$   | -1,68 ; $ b_1  > h_{1S1} = 1,01 \Rightarrow$ коэф-т значимый        |               |               |             |   | -1,94 ; $ b_1  > h_{1S1} = 0,86 \Rightarrow$ коэф-т значимый        |               |               |             |           |
|   |         |       |                                 | $b_2$   | -6,93 ; $ b_2  > h_{1S2} = 1,01 \Rightarrow$ коэф-т значимый        |               |               |             |   | -7,32 ; $ b_2  > h_{1S2} = 0,86 \Rightarrow$ коэф-т значимый        |               |               |             |           |
|   |         |       |                                 | $b_{11}$  | -3,02 ; $ b_{11}  > h_{2S11} = 1,75 \Rightarrow$ коэф-т значимый    |               |               |             |   | -3,33 ; $ b_{11}  > h_{2S11} = 1,48 \Rightarrow$ коэф-т значимый    |               |               |             |           |
|   |         |       |                                 | $b_{22}$  | -3,03 ; $ b_{22}  > h_{2S22} = 1,75 \Rightarrow$ коэф-т значимый    |               |               |             |   | -3,11 ; $ b_{22}  > h_{2S22} = 1,48 \Rightarrow$ коэф-т значимый    |               |               |             |           |
|   |         |       |                                 | $b_{12}$  | -0,03 ; $ b_{12}  < h_{3S12} = 1,24 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |               |               |             |   | -0,46 ; $ b_{12}  < h_{3S12} = 1,05 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |               |               |             |           |
| Уравнение регрессии в нормализованных обозначениях факторов |         |       |                                 | $R_{сж,28}=109,72-1,68 X_1-6,93 X_2-3,02 X_1^2-3,03 X_2^2$                      |   |               |               |             | $R_{сж,60}=115,04-1,94 X_1-7,32 X_2-3,33 X_{12}-3,11 X_{22}$                      |   |               |               |             |           |
| Уравнение регрессии с натуральными значениями факторов      |         |       |                                 | $R_{сж,28}=101,622 + 1,0388 x_1 - 0,03017 x_1^2 + 0,0244 x_2 - 0,0000448 x_2^2$ |   |               |               |             | $R_{сж,60}=106,7 + 1,138 x_1 - 0,0333 x_1^2 + 0,0242929 x_2 - 0,0000460059 x_2^2$ |   |               |               |             |           |
| $F$ критерий  |         |       |                                 | 1,01 < $F_{кр.} = 3,16 \Rightarrow$ модель адекватна                            |   |               |               |             | 1,29 < $F_{кр.} = 3,16 \Rightarrow$ модель адекватна                              |   |               |               |             |           |

Продолжение таблицы 3.3

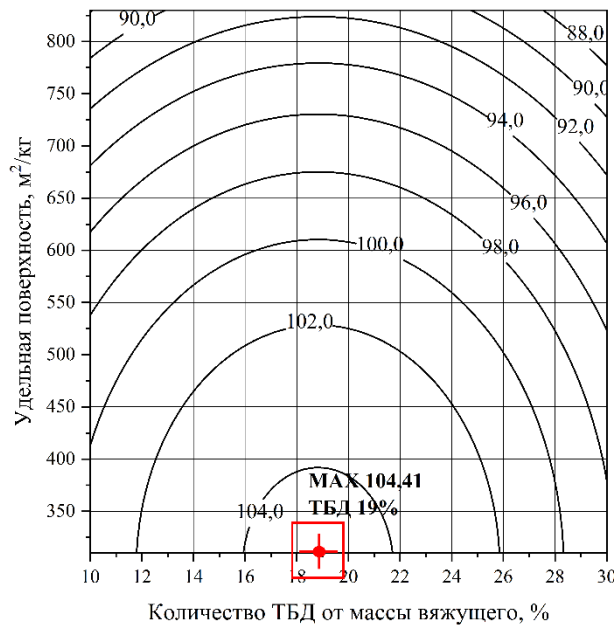
| № опыта   | Матрица |       | Натуральные значения переменных |   | В/Ц, %   |             |             |           |  | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>  |             |             |           |           |
|---|---------|-------|---------------------------------|---|--|-------------|-------------|-----------|--|---|-------------|-------------|-----------|-----------|
|   | $X_1$   | $X_2$ | ТБД, %                          | Суд, м <sup>2</sup> /кг   | $\bar{y}_1$  | $\bar{y}_2$ | $\bar{y}_3$ | $\bar{y}$ | $\hat{y}$  | $\bar{y}_1$   | $\bar{y}_2$ | $\bar{y}_3$ | $\bar{y}$ | $\hat{y}$ |
| Контрольный   | -       | -     | -                               | -   | 26,3   | 26,0        | 25,8        | 26,0      | -  | 2385,0  | 2449,3      | 2373,3      | 2402,5    | -         |
| 1   | -1      | -1    | 10                              | 310   | 27,0   | 26,5        | 26,8        | 26,8      | 26,9   | 2411,7  | 2412,9      | 2394,1      | 2406,3    | 2402,8    |
| 2   | 0       | -1    | 20                              | 310   | 29,3   | 29,0        | 28,8        | 29,0      | 28,8   | 2509,6  | 2534,0      | 2499,5      | 2514,4    | 2513,4    |
| 3   | 1       | -1    | 30                              | 310   | 30,8   | 31,0        | 30,5        | 30,8      | 30,7   | 2484,5  | 2542,6      | 2576,0      | 2534,4    | 2528,4    |
| 4   | -1      | 0     | 10                              | 570   | 27,5   | 26,5        | 27,0        | 27,0      | 26,9   | 2390,1  | 2445,1      | 2443,5      | 2426,3    | 2431,5    |
| 5   | 0       | 0     | 20                              | 570   | 28,3   | 28,5        | 28,0        | 28,3      | 28,5   | 2547,0  | 2498,9      | 2568,4      | 2538,1    | 2542,1    |
| 6   | 1       | 0     | 30                              | 570   | 29,8   | 29,5        | 30,8        | 30,0      | 30,1   | 2536,6  | 2503,9      | 2596,4      | 2545,6    | 2557,1    |
| 7   | -1      | 1     | 10                              | 830   | 26,8   | 27,0        | 27,3        | 27,0      | 26,9   | 2466,5  | 2509,4      | 2409,7      | 2461,9    | 2460,1    |
| 8   | 0       | 1     | 20                              | 830   | 27,8   | 28,3        | 28,0        | 28,0      | 28,2   | 2554,9  | 2580,8      | 2585,6      | 2573,8    | 2570,7    |
| 9   | 1       | 1     | 30                              | 830   | 29,5   | 30,0        | 29,8        | 29,8      | 29,5   | 2592,5  | 2613,6      | 2567,6      | 2591,3    | 2585,7    |
| Коэффициенты уравнения регрессии                            |         |       |                                 | $a_0$   | 28,33  |             |             |           |  | 2535,20   |             |             |           |           |
|   |         |       |                                 | $b_0$   | 28,50  |             |             |           |  | 2542,08   |             |             |           |           |
|   |         |       |                                 | $b_1$   | 1,63 ; $ b_1  > h_1s_1 = 0,18 \Rightarrow$ коэф-т значимый         |             |             |           |  | 62,81 ; $ b_1  > h_1s_1 = 16,78 \Rightarrow$ коэф-т значимый          |             |             |           |           |
|   |         |       |                                 | $b_2$   | -0,29 ; $ b_2  > h_2s_2 = 0,18 \Rightarrow$ коэф-т значимый        |             |             |           |  | 28,65 ; $ b_2  > h_2s_2 = 16,78 \Rightarrow$ коэф-т значимый          |             |             |           |           |
|   |         |       |                                 | $b_{11}$  | 0,13 ; $ b_{11}  < h_2s_{11} = 0,3 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |             |             |           |  | -47,8 ; $ b_{11}  < h_2s_{11} = 29,06 \Rightarrow$ коэф-т значимый    |             |             |           |           |
|   |         |       |                                 | $b_{22}$  | 0,13 ; $ b_{22}  < h_2s_{22} = 0,3 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |             |             |           |  | 10,32 ; $ b_{22}  < h_2s_{22} = 29,06 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |             |             |           |           |
|   |         |       |                                 | $b_{12}$  | -0,31 ; $ b_{12}  > h_3s_{12} = 0,21 \Rightarrow$ коэф-т значимый  |             |             |           |  | 0,31 ; $ b_{12}  > h_3s_{12} = 20,55 \Rightarrow$ коэф-т не значимый  |             |             |           |           |
| Уравнение регрессии в нормализованных обозначениях факторов |         |       |                                 | $V/C=28,5+1,63X_1-0,29 X_2-0,31 X_1 X_2$                            |  |             |             |           | $\rho=2542,08+62,81 X_1+28,65 X_2-47,8 X_1^2$            |   |             |             |           |           |
| Уравнение регрессии с натуральными значениями факторов      |         |       |                                 | $V/C=24,5165 + 0,230962 x_1 + 0,00126923 x_2 - 0,000119231 x_1 x_2$ |  |             |             |           | $\rho=2162,45 + 25,401 x_1 - 0,478 x_1^2 + 0,110192 x_2$ |   |             |             |           |           |
| $F$ критерий  |         |       |                                 | $2,04 < F_{кр.} = 3,16 \Rightarrow$ модель адекватна                |  |             |             |           | $0,23 < F_{кр.} = 3,16 \Rightarrow$ модель адекватна     |   |             |             |           |           |



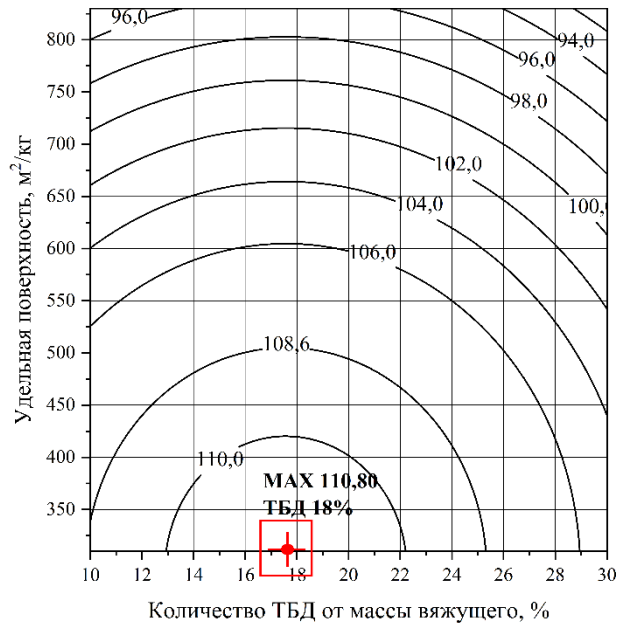
(а)



(б)

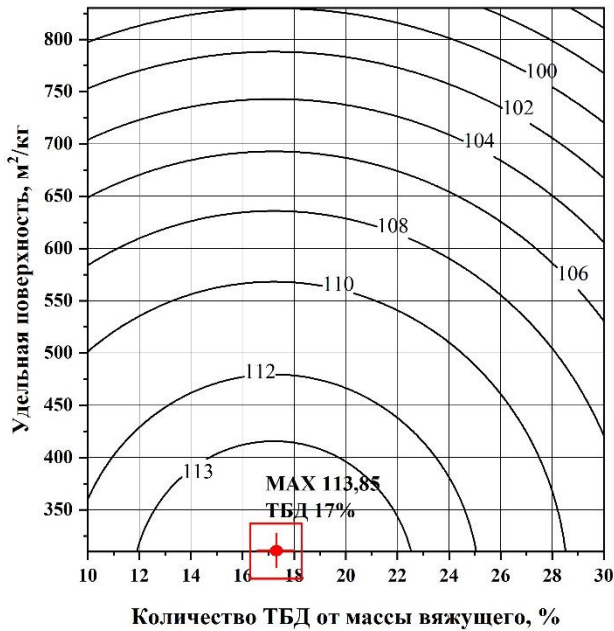


(в)

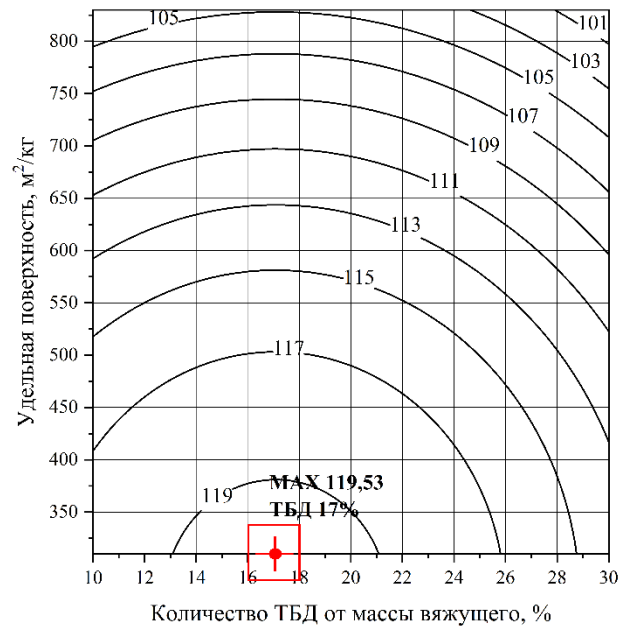


(г)

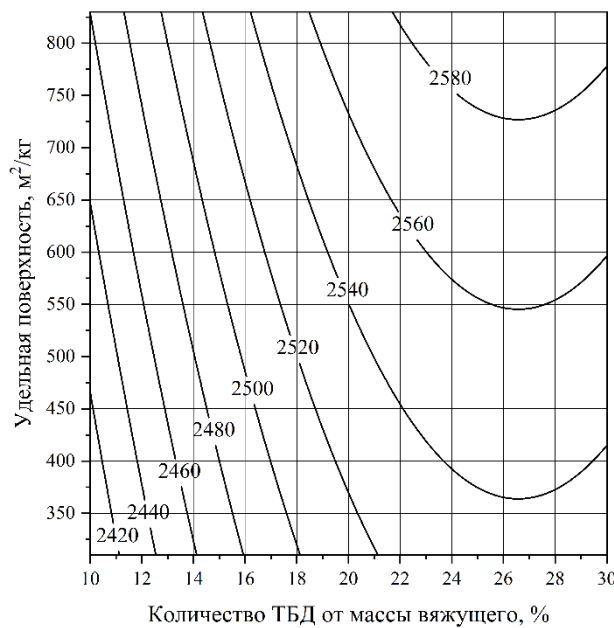
Рисунок 3.8 - Графическая интерпретация аналитических моделей зависимости прочности цементно-баритового камня при сжатии на 2 суток (а), 7 суток (б), 14 суток (в), 21 суток (г) от количества и тонкости помола ТБД



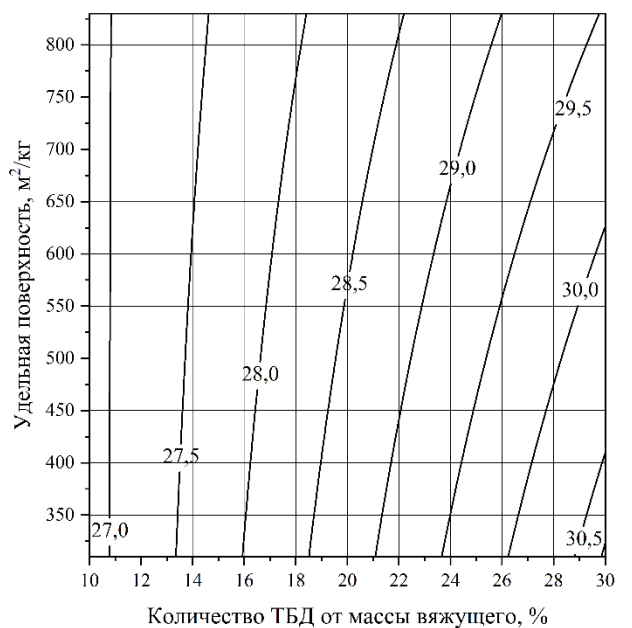
(а)



(б)



(в)



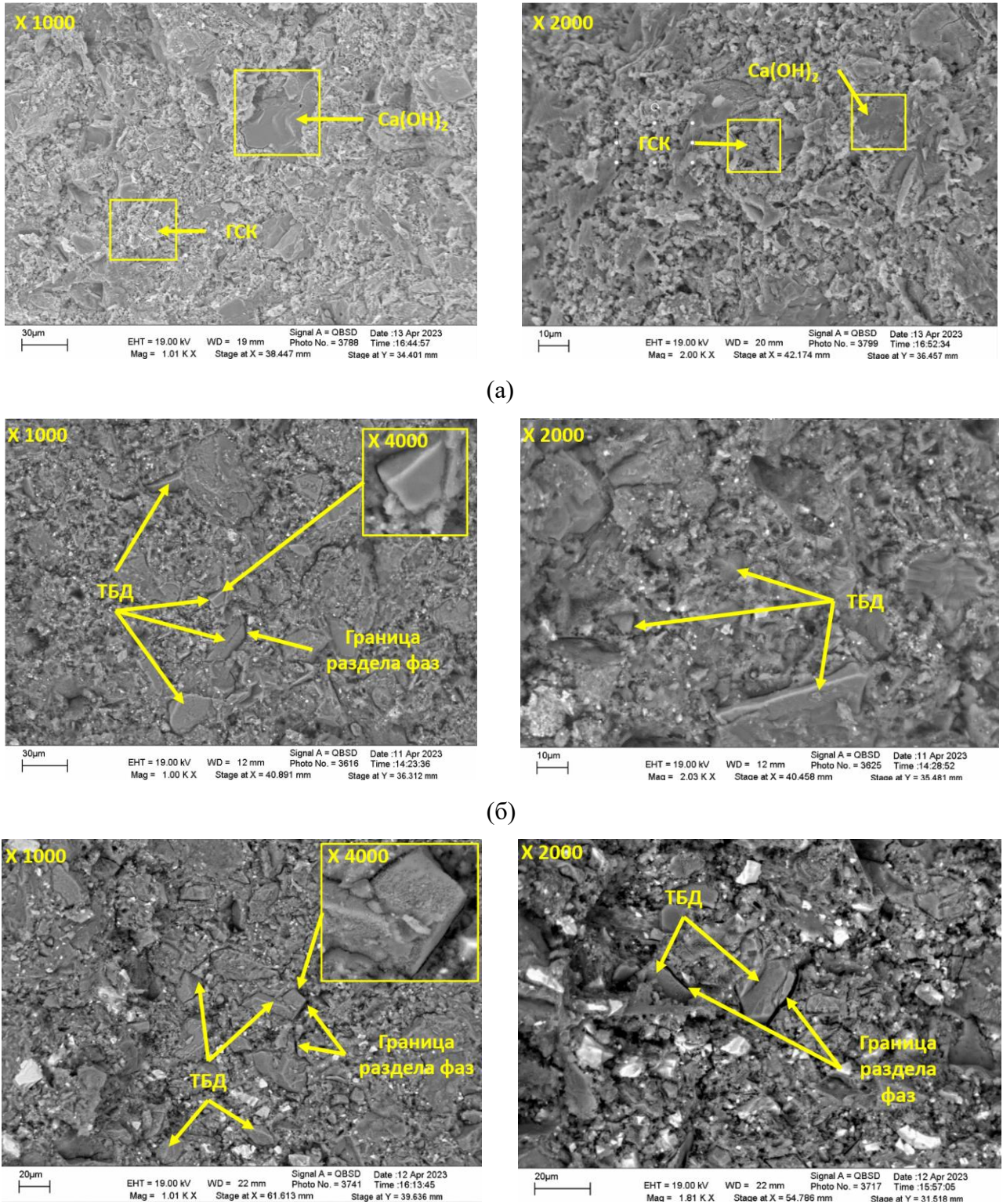
(г)

Рисунок 3.9 - Графическая интерпретация аналитических моделей зависимости прочности цементно-баритового камня при сжатии на 28 суток (а), 60 суток (б), плотности (в), водопотребности (г) от количества и тонкости помола ТБД

По полученным аналитическим моделям (рисунки 3.8, 3.9) видно, что увеличение количества ТБД до 17% от массы вяжущего способствует улучшению прочностных характеристик за счёт уплотнения структуры, а дальнейшее увеличение



количества ТБД приводит к снижению прочности композиционного материала за счёт разрыхления цементной матрицы [106, 107]. Это подтверждают результаты электронной микроскопии (рисунок 3.10).



(a)

(б)

(в)

Рисунок 3.10 - Электронные микрофотографии цементного камня без ТБД (а), с добавлением 10% ТБД (б), с добавлением 30% ТБД (в)

По полученным снимкам видно, что частицы ТБД в количестве 10% от массы вяжущего плотно встраиваются в матрицу, уплотняя её, что обеспечивает увеличение прочности. Введение добавки в количестве 30% от массы вяжущего приводит к разрыхлению структуры цементного камня. На микрофотографиях прослеживаются явно выраженные границы раздела фаз, что приводит к формированию микротрещин и снижению прочности затвердевшей матрицы.

Согласно полученным аналитическим моделям видно, что присутствует отрицательное влияние помола добавки на прочностные характеристики цементно-баритового камня. Данная проблема связана с образованием агломераций мелких частиц баритсодержащей добавки вокруг более крупных (рисунок 3.11).

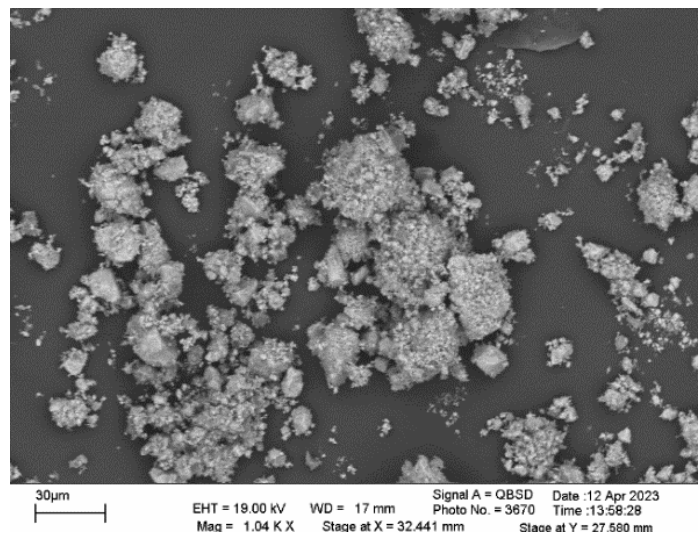


Рисунок 3.11 - Электронная микрофотография баритового концентрата после 60 мин. помола

Устранить указанный выше эффект можно путем применения поверхностно-активных веществ (ПАВ). Это обосновано тем, что ПАВ могут функционировать как диспергаторы, разрушая агломерации частиц и обеспечивая более равномерное распределение частиц в твердой матрице цементного камня. Это предполагает, что введение ПАВ в баритсодержащую добавку может повысить прочность цементного камня. Для подтверждения данной гипотезы было проведено экспериментальное испытание образцов цементно-баритового камня с добавлением гиперпластификатора. Гиперпластификатор вводился в объемах, обеспечивающих получение



цементно-баритового теста нормальной плотности при одинаковом водоцементном отношении для всех образцов.

Составы исследуемых образцов подобраны в соответствии с двухфакторным ортогональным центральным композиционным планом (см. раздел 2.2.10). Составы исследуемых образцов и результаты испытаний приведены в таблице 3.4 и на рисунке 3.12.

Таблица 3.4 - Результаты построения аналитических моделей зависимости прочности цементно-баритового камня с добавлением гиперпластификатора от количества и тонкости помола ТБД

| № опыта   | Матрица |       | Натуральные значения переменных |                         | В/Ц, %  | пластификатор, % | Rсж, МПа (ср) |               |               |             |           |
|---|---------|-------|---------------------------------|-------------------------|---|------------------|---------------|---------------|---------------|-------------|-----------|
|   | $x_1$   | $x_2$ | ТБД, %                          | Суд. м <sup>2</sup> /кг |   |                  | $\tilde{y}_1$ | $\tilde{y}_2$ | $\tilde{y}_3$ | $\tilde{y}$ | $\hat{y}$ |
| Контрольный   | -       | -     | -                               | -                       | 26  | 0                | 105,1         | 106,4         | 104,2         | 105,2       | 0,0       |
| 1   | -1      | -1    | 10                              | 310                     |   | 0,125            | 112,3         | 114,5         | 111,7         | 112,8       | 112,46    |
| 2   | 0       | -1    | 20                              | 310                     |   | 0,25             | 116,7         | 109,8         | 112,0         | 112,8       | 112,63    |
| 3   | 1       | -1    | 30                              | 310                     |   | 0,325            | 114,8         | 112,6         | 116,2         | 114,5       | 116,88    |
| 4   | -1      | 0     | 10                              | 570                     |   | 0,125            | 113,8         | 116,6         | 111,5         | 114,0       | 112,63    |
| 5   | 0       | 0     | 20                              | 570                     |   | 0,25             | 118,8         | 108,7         | 114,6         | 114,0       | 114,68    |
| 6   | 1       | 0     | 30                              | 570                     |   | 0,325            | 116,7         | 121,1         | 123,6         | 120,5       | 118,93    |
| 7   | -1      | 1     | 10                              | 830                     |   | 0,1              | 118,5         | 115,6         | 112,0         | 115,4       | 114,68    |
| 8   | 0       | 1     | 20                              | 830                     |   | 0,225            | 112,2         | 111,9         | 122,5         | 115,5       | 116,74    |
| 9   | 1       | 1     | 30                              | 830                     |   | 0,3              | 116,6         | 127,1         | 121,6         | 121,8       | 120,99    |
| $a_0$   |         |       |                                 |                         | 119,46  |                  |               |               |               |             |           |
| $b_0$   |         |       |                                 |                         | 118,93  |                  |               |               |               |             |           |
| $b_1$   |         |       |                                 |                         | 0,55 ; $ b_1  < h_{1s1} = 2,05 \Rightarrow$ коэф-т не значимый      |                  |               |               |               |             |           |
| $b_2$   |         |       |                                 |                         | 2,06 ; $ b_2  > h_{1s2} = 2,05 \Rightarrow$ коэф-т значимый         |                  |               |               |               |             |           |
| $b_{11}$  |         |       |                                 |                         | -4,25 ; $ b_{11}  > h_{2s11} = 3,56 \Rightarrow$ коэф-т значимый    |                  |               |               |               |             |           |
| $b_{22}$  |         |       |                                 |                         | -0,79 ; $ b_{22}  < h_{2s22} = 3,56 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |                  |               |               |               |             |           |
| $b_{12}$  |         |       |                                 |                         | -0,08 ; $ b_{12}  < h_{3s12} = 2,52 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |                  |               |               |               |             |           |
| Уравнение регрессии в нормализованных обозначениях факторов |         |       |                                 |                         | $118,93 + 2,06 X_2 - 4,25 X_1^2$                                    |                  |               |               |               |             |           |
| Уравнение регрессии с натуральными значениями факторов      |         |       |                                 |                         | $97,4138 + 1,7 x_1 - 0,0425 x_1^2 + 0,00792308 x_2$                 |                  |               |               |               |             |           |
| F критерий  |         |       |                                 |                         | $0,75 < F_{кр} = 3,16$  |                  |               |               |               |             |           |

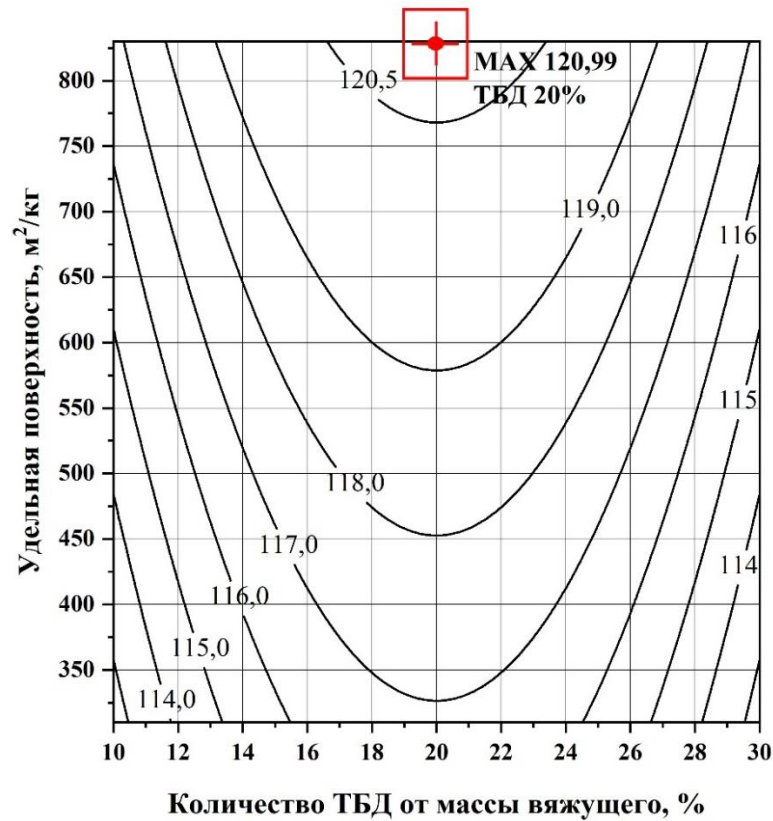


Рисунок 3.12 - Графическая интерпретация аналитических моделей зависимости прочности цементно-баритового камня с добавлением гиперпластификатора от количества и тонкости помола ТБД

Как видно по полученным данным, использование гиперпластификатора позволяет увеличить процентное содержание ТБД, при котором достигается максимальная прочность цементно-баритового камня, до 20%. Это связано с тем, что, ПАВ облегчают диспергирование частиц ТБД в цементной матрице, предотвращая образование агломератов, которые могут разрушать цементную матрицу. Разрушение агломераций частиц ТБД и их повышенная дисперсность способствуют равномерному распределению нагрузки в материале, улучшая его общую прочность в результате чего наибольшая прочность цементно-баритового камня достигается при наибольшей тонкости помола.

Увеличение количества добавки, содержащей тяжелый элемент барий, ожидается приводит к увеличению плотности композиционного материала. Также наблюдается увеличение плотности при увеличении дисперсности добавки, что обуславливается созданием более плотной упаковки частиц в единице объема (рисунок 3.9 (в), рисунок 3.13).

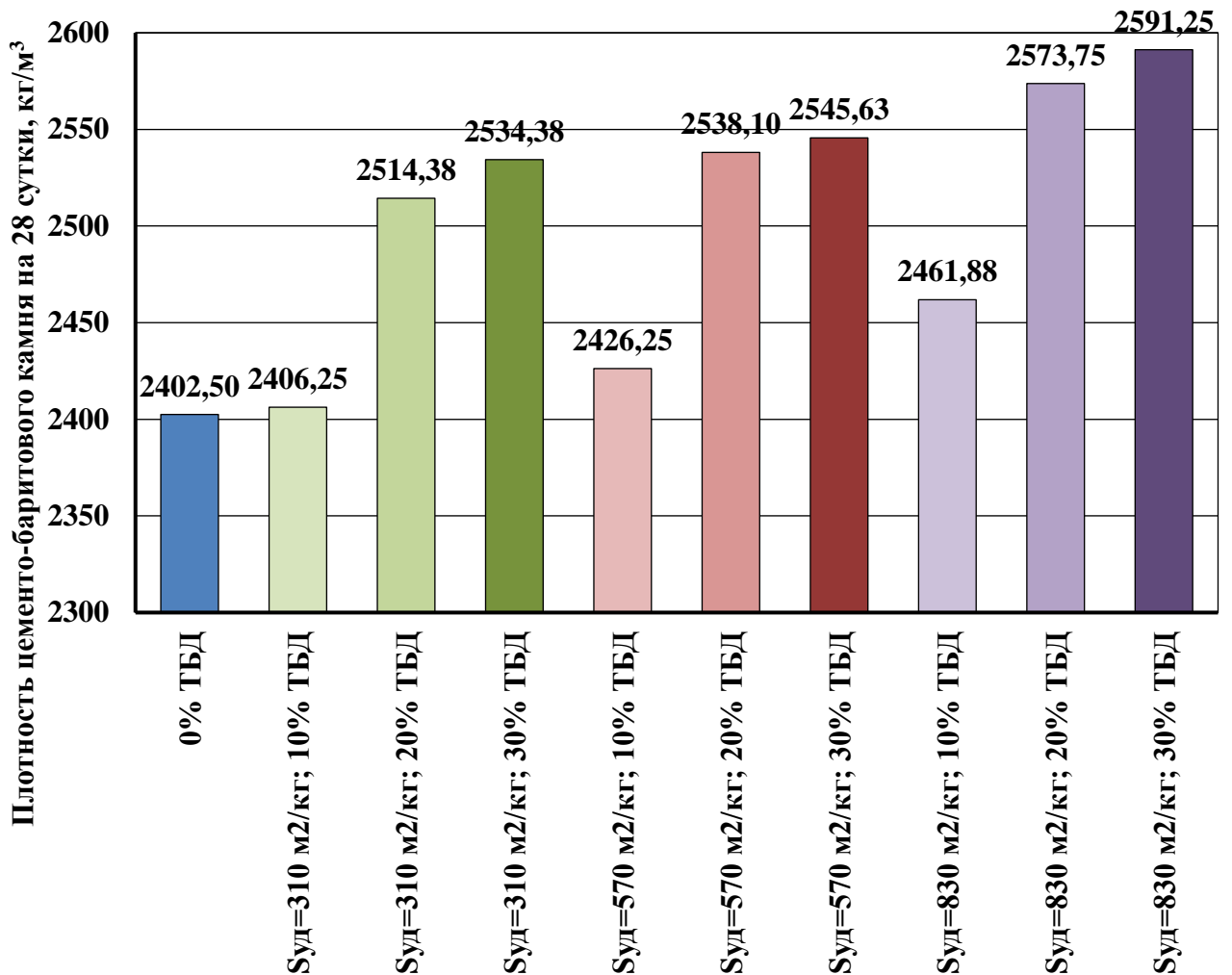


Рисунок 3.13 - Плотность образцов цементов с различным содержанием ТБД и различной ее дисперсностью

Установлено, что с увеличением количества добавки возрастает водоцементное отношение необходимое, для получения цементного теста нормальной густоты (рисунок 3.9 (г), рисунок 3.14). Это обусловлено возрастающей адсорбционной способностью тонкодисперсной баритсодержащей добавки. Сравнивая водопотребность образцов с разной дисперсностью добавки, но с одинаковым ее количеством можно отметить, что увеличение тонкости помола приводит снижению необходимого водоцементного отношения, что обусловлено тем, что высокодисперсный баритовый концентрат при создании более плотной упаковке частиц вытесняет часть жидкости из межзернового пространства.

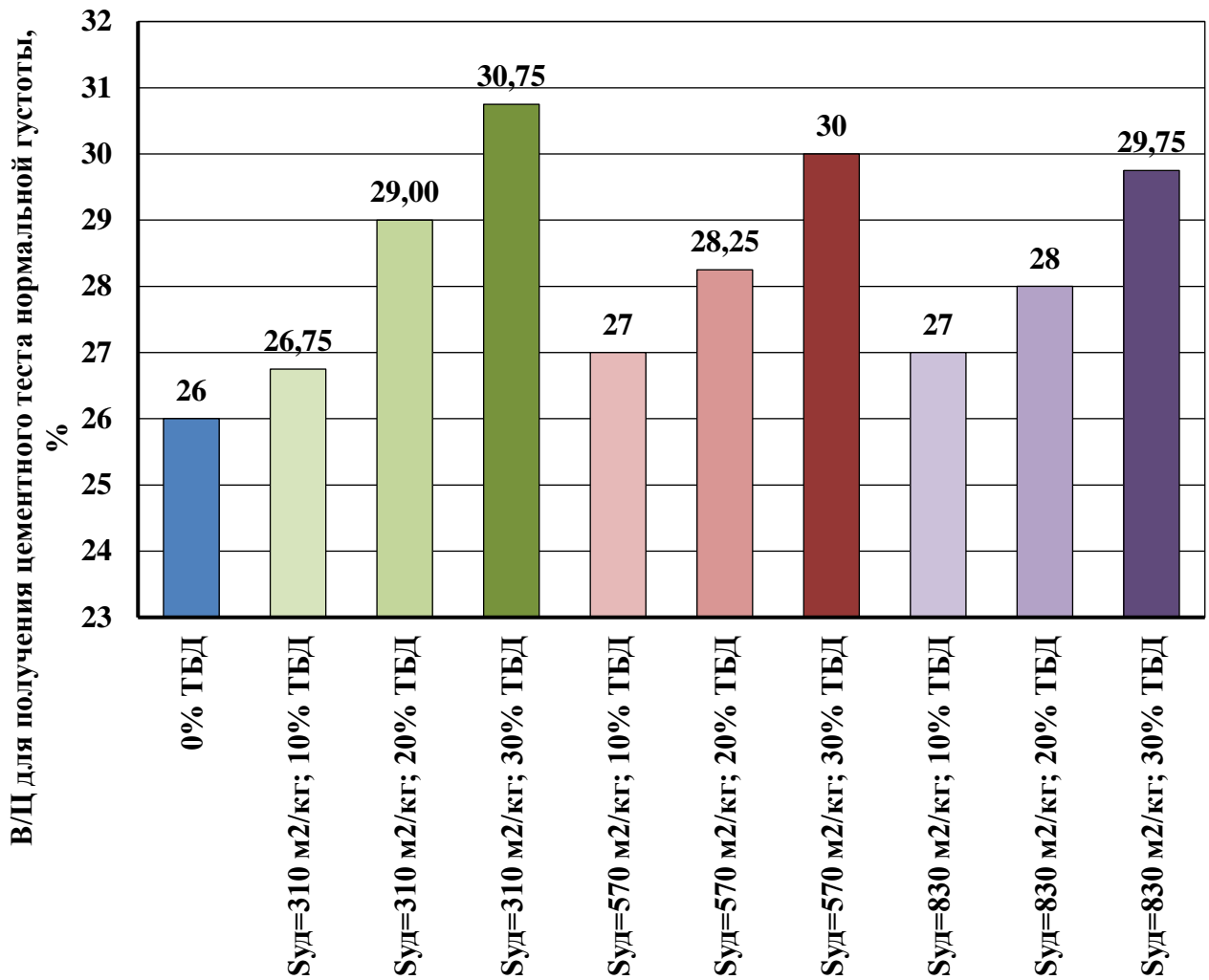


Рисунок 3.14 - Водоцементное отношение для получения цементного теста нормальной густоты цементов с различным содержанием ТБД и различной ее дисперсностью

ТБД с дисперсностью равной портландцементу ( $S_{уд} = 310 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) при 10% содержании не участвует в формировании структурного каркаса цементной матрицы, о чем свидетельствуют слабое влияние на сроки схватывания. С увеличением дисперсности ТБД и количества ее введения проявляется, наоборот, диспергирующий эффект, который затрудняет формирование структурного каркаса и замедляет процессы коагуляции цементного геля. Это приводит к удлинению сроков схватывания композиционного материала (рисунок 3.15).

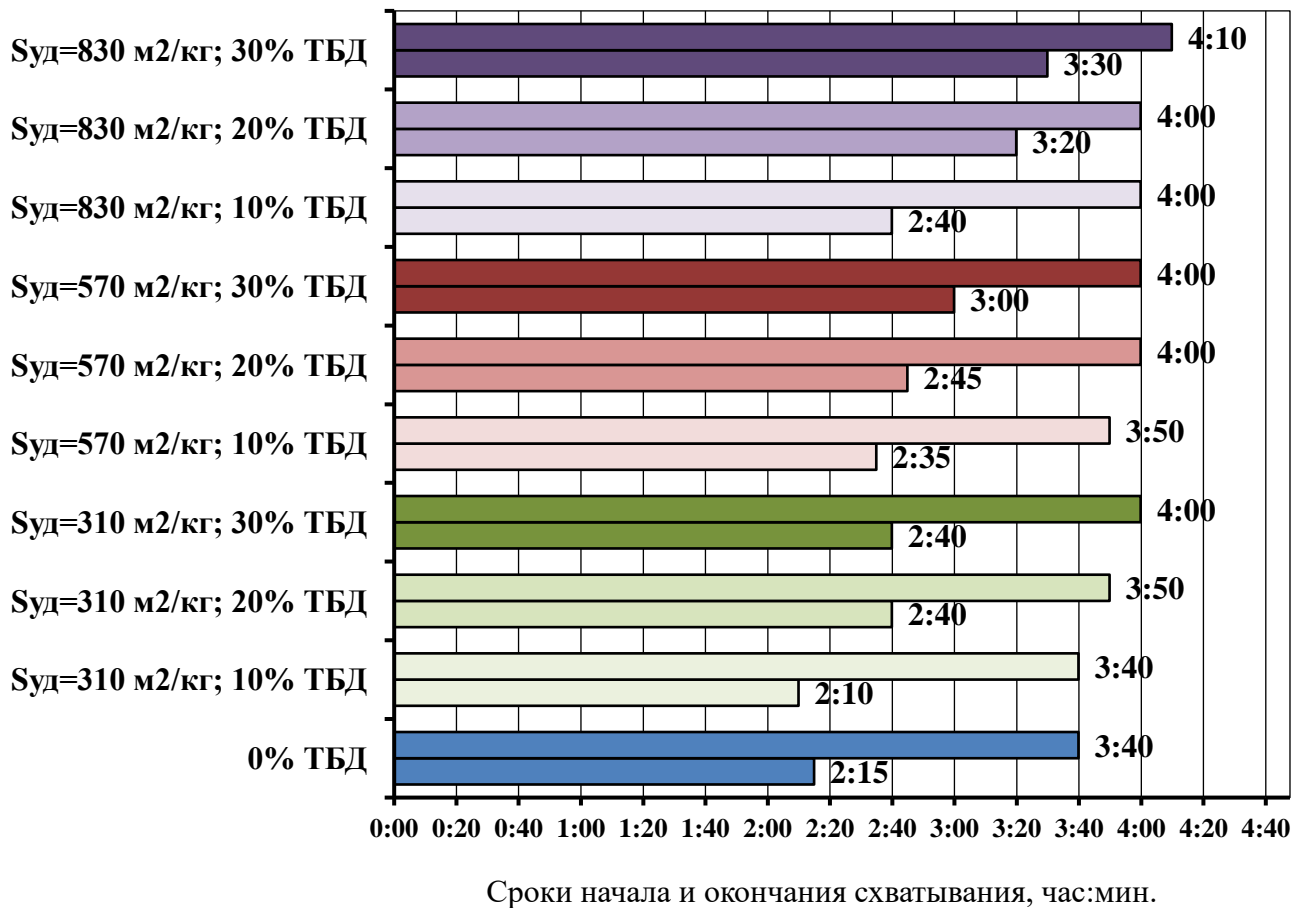


Рисунок 3.15 - Сроки схватывания цементно-баритового камня с различным содержанием ТБД и различной ее дисперсностью

Исследование динамики набора прочности цементно-баритового камня (рисунок 3.16) свидетельствует о том, что общая масса всех образцов демонстрирует прирост в 63-72% от финальной прочности, определенной на 28 суток, уже на вторые сутки от начала процесса твердения. Это указывает на высокую интенсивность процесса гидратации в начальной стадии.

В образцах, где удельная поверхность ТБД составляет до 570 м<sup>2</sup>/кг, динамика набора прочности совпадает с динамикой контрольного образца, что указывает на отсутствие существенного влияния ТБД в составе цементно-баритового камня на скорость набора прочности. При высокой тонкости помола наибольшее проявление негативного эффекта от образования агломераций проявляется после 14 суток твердения, поскольку с течением времени агломераты мелких частиц барита могут создавать зоны слабого сцепления в матрице, обусловленные неравномерным распределением частиц и образованием микропустот.

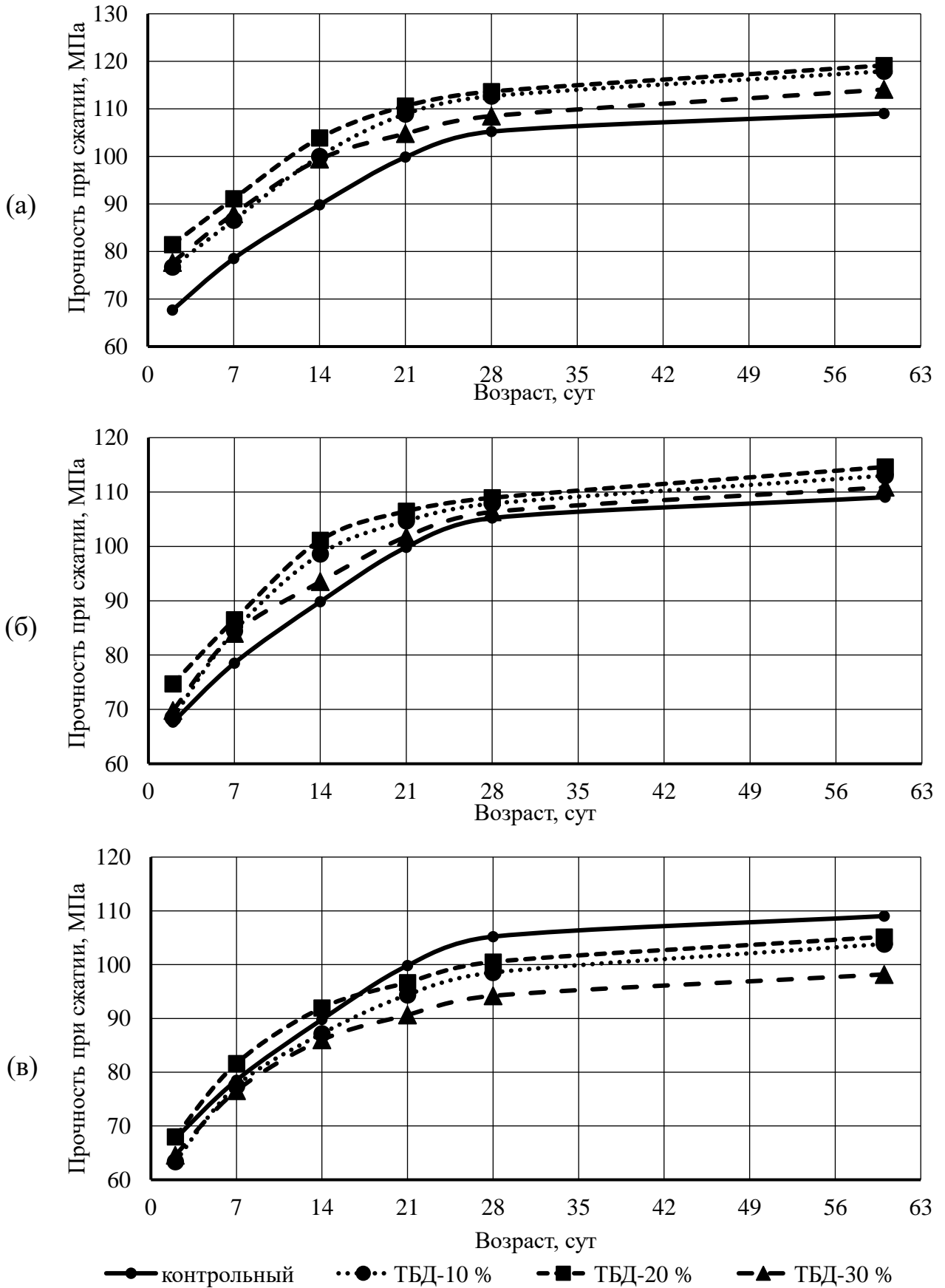


Рисунок 3.16 - Динамика набора прочности цементно-баритового камня при удельной поверхности ТБД  $310 \text{ м}^2/\text{кг}$  (а),  $570 \text{ м}^2/\text{кг}$  (б),  $830 \text{ м}^2/\text{кг}$  (в)

### **3.3 Влияние состава раствора пенообразователя на свойства пены для поризации цементного камня**

В процессе производства облегчённого радиационно-защитного материала, для формирования ячеистой поровой структуры применялись специальные пенообразующие добавки. Необходимо подчеркнуть, что ключевым аспектом, влияющим на характеристики строительной пены для изготовления поризованного цементного камня и пенобетона, выступает тип и качество используемого пенообразователя, что подчеркивает важность детального подбора раствора пенообразователя.

Среди основных требований, предъявляемых к пенообразователям, можно выделить высокую кратность и стойкость формируемой пены, при этом их применение не должно негативно влиять на свойства итогового продукта. [108].

Для изготовления строительной пены используются синтетические или белковые пенообразователи. Считается что белковые пенообразователи, получаемые путём частичного гидролиза белоксодержащего сырья в присутствии различных щелочей, являются более предпочтительными ввиду их производственно-технологических, санитарно-гигиенических и экологических преимуществ [109].

Известно, что пенообразователь оказывает пластифицирующий эффект на бетонную смесь [117, 118], благодаря отпадает необходимость использования дополнительных пластифицирующих добавок для диспергации агломераций частиц измельчённого баритового концентрата.

В рамках данного исследования проводилось сравнение растворов синтетического и белкового пенообразователя, в которых было различное процентное содержание пенообразователя. Строительная пена сравнивалась по таким показателям как кратность (рисунок 3.17) и устойчивость пены во времени (рисунок 3.18) по ГОСТ 23409.26-78.

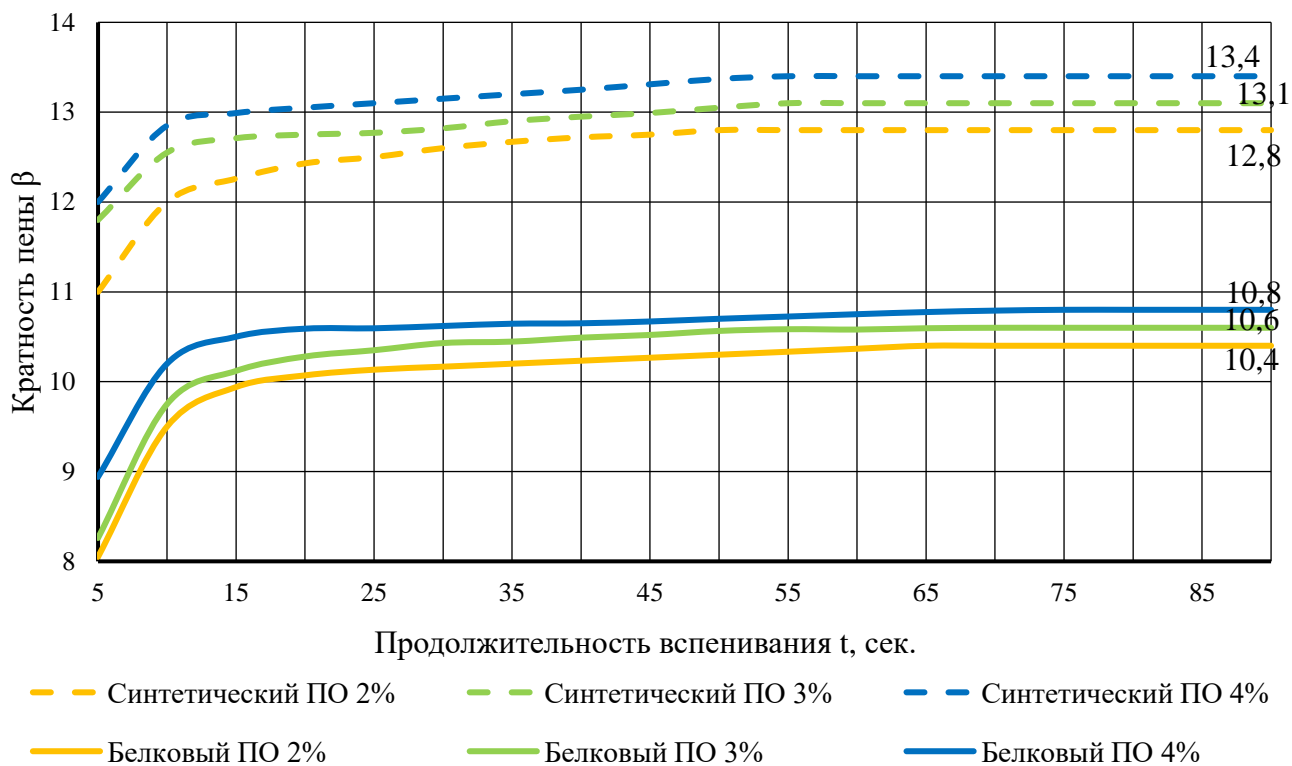


Рисунок 3.17 - Зависимость кратности пены от вида пенообразователя, его концентрации в растворе и продолжительности вспенивания

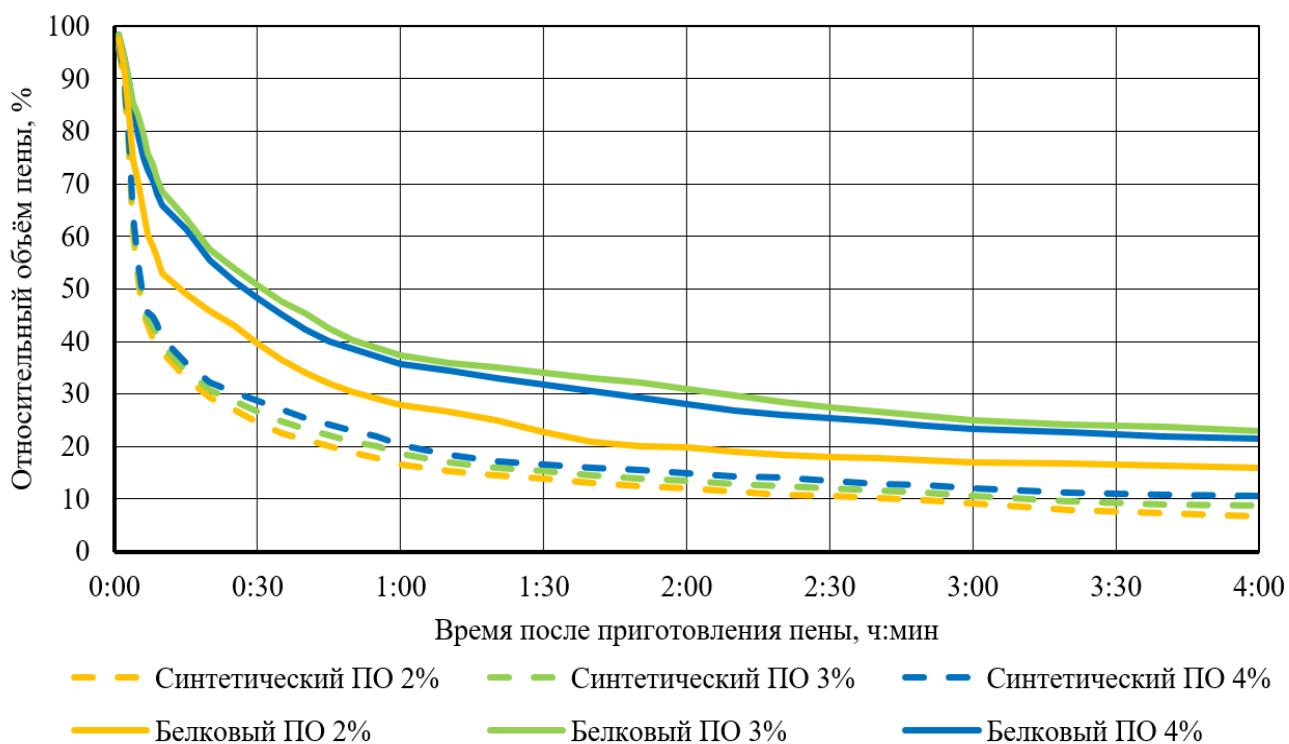


Рисунок 3.18 - Зависимость времени жизни пены от вида пенообразователя и его концентрации в растворе



Результаты сравнения демонстрируют, что синтетический пенообразователь имеет более высокую кратность вспенивания по сравнению с белковым. Однако время жизни пены, полученной с использованием синтетического пенообразователя ниже и через пол часа после вспенивания относительный объём сохранившейся пены, полученной из раствора синтетического пенообразователя ниже, на 22%, чем из белкового пенообразователя.

Также исследовалась стойкость пены в цементном тесте (рисунок 3.19). Наилучшим показателем стойкости пены в цементном тесте обладает 3-х процентный раствор белкового пенообразователя, принятый для дальнейшей работы.

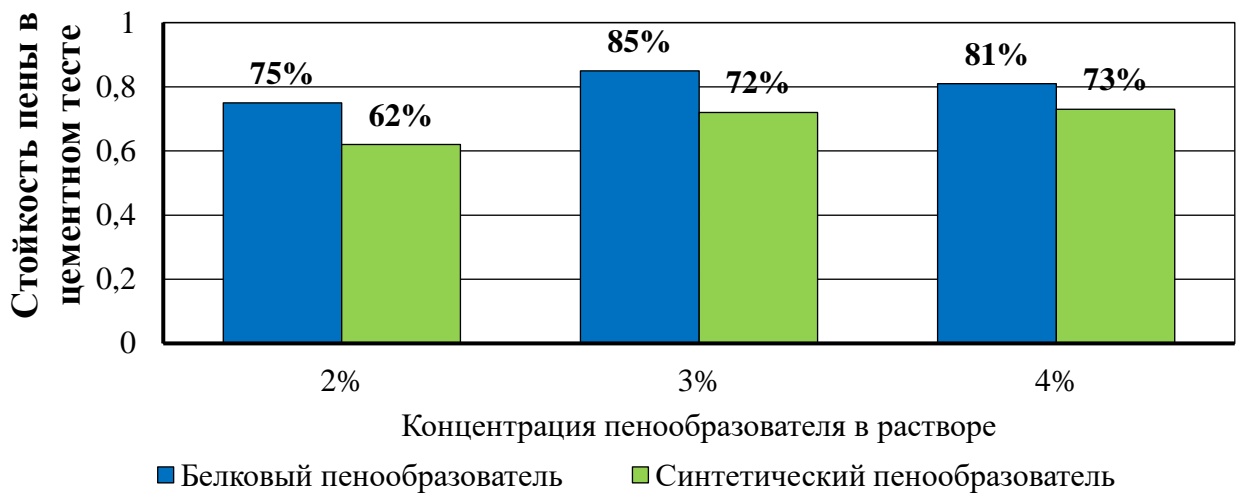


Рисунок 3.19 - Стойкость пены в цементном тесте в зависимости от вида пенообразователя и его концентрации в растворе

### 3.4 Формирование микроструктуры поризованного цементно-баритового камня

Процессы образования кристаллогидратов в структуре поризованного цементно-баритового камня в процессе набора прочности исследовалась при помощи рентгенофазового анализа (РФА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Для сравнения отобраны образцы поризованного цементно-баритового

камня и контрольный образец поризованного цементного камня на 2, 7, 14 и 28 сутки твердения [110].

### Рентгенофазовый анализ.

Рентгенограммы контрольного поризованного цементного камня и цементно-баритового камня представлены на рисунке 3.20 и рисунке 3.21 соответственно.

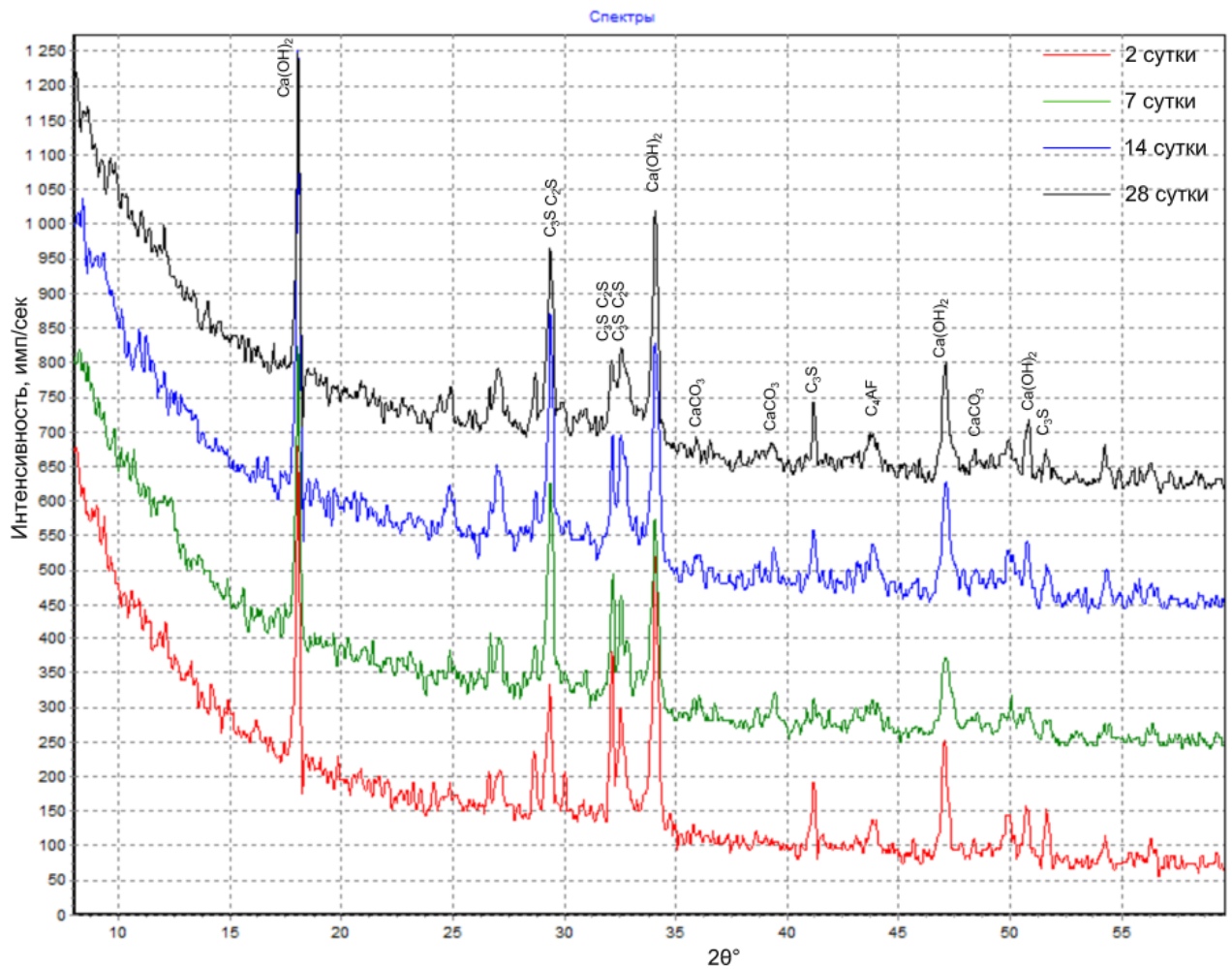


Рисунок 3.20 - Рентгенограммы контрольных образцов поризованного цементного камня в возрасте 2, 7, 14 и 28 суток

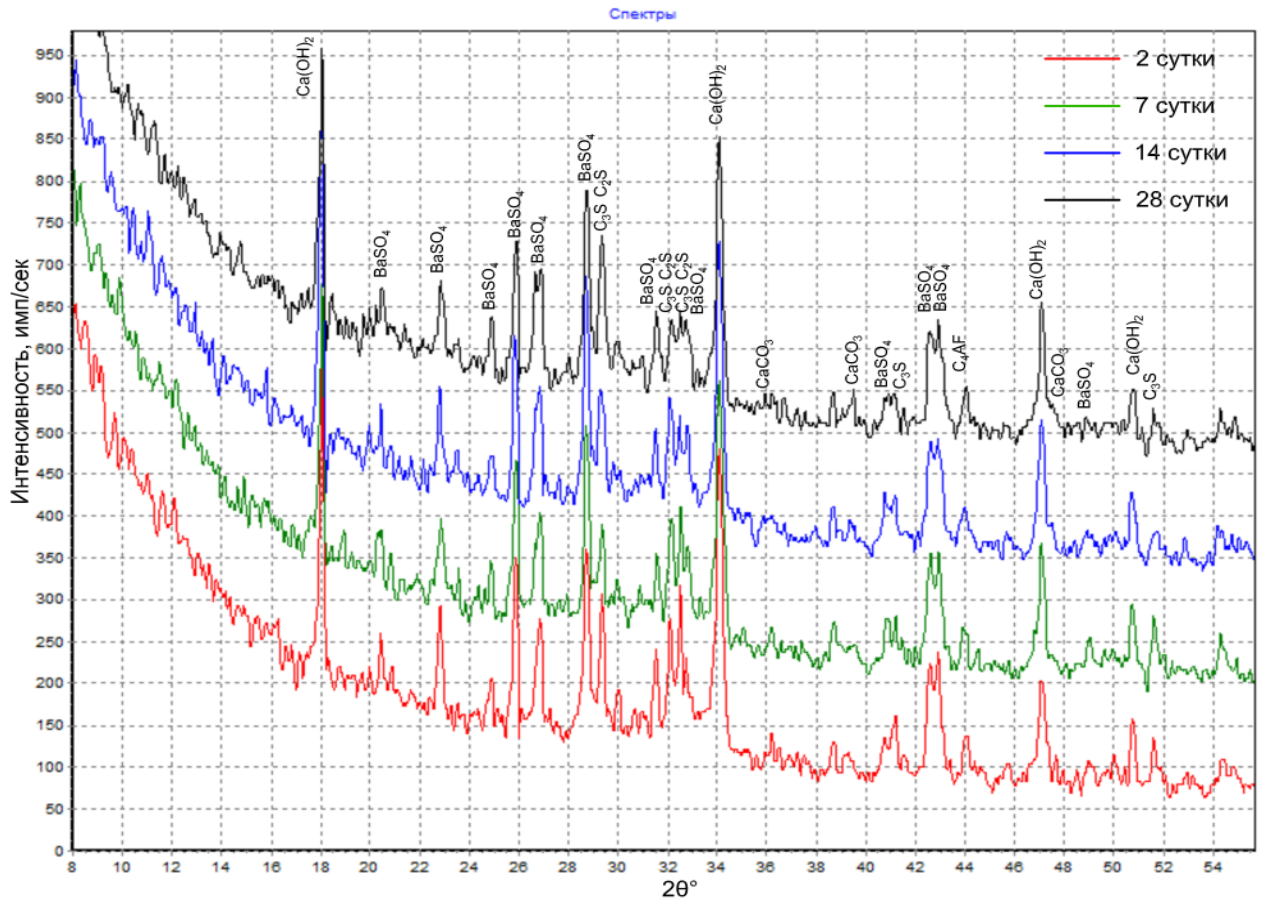


Рисунок 3.21 - Рентгенограммы поризованного цементно-баритового камня в возрасте 2, 7, 14 и 28 суток

Явно выраженные интенсивные пики гидроксида кальция наблюдаются с первых дней набора прочности поризованного цементно-баритового камня и контрольного цементного камня, что указывает на высокую скорость протекания реакции. Также наблюдается наличие пиков, характерных для алита и белита, что указывает на наличие не полностью прогидратированных зёрен цемента (рисунок 3.22). Дальнейшая гидратация протекает с переходом негидратированных зёрен в кристаллогидраты, в том числе происходит дальнейшая кристаллизация портландита, на что указывает снижение интенсивности пиков алита и белита (рисунок 3.23). Для обоих образцов свойственно образование карбоната кальция и его последующая аморфизация, на что указывает увеличение показателя отношения площади пика к его интенсивности, а также наблюдается уменьшение размеров кристаллитов карбоната кальция (рисунок 3.24).

На рентгенограммах поризованного цементно-баритового камня наблюдается большое количество интенсивных пиков, характерных для сернокислого бария, с интенсивностью равной соответствующим пикам рентгенограммы исходного баритового концентрата (рисунок 2.1). В периоде от 2 до 28 суток после формирования, не наблюдаются процессы кристаллизации/аморфизации или изменения размеров кристаллитов сернокислого бария (рисунок 3.25), что указывает на то, что баритовый концентрат не участвует в реакции гидратации, благодаря инертности сернокислого бария.

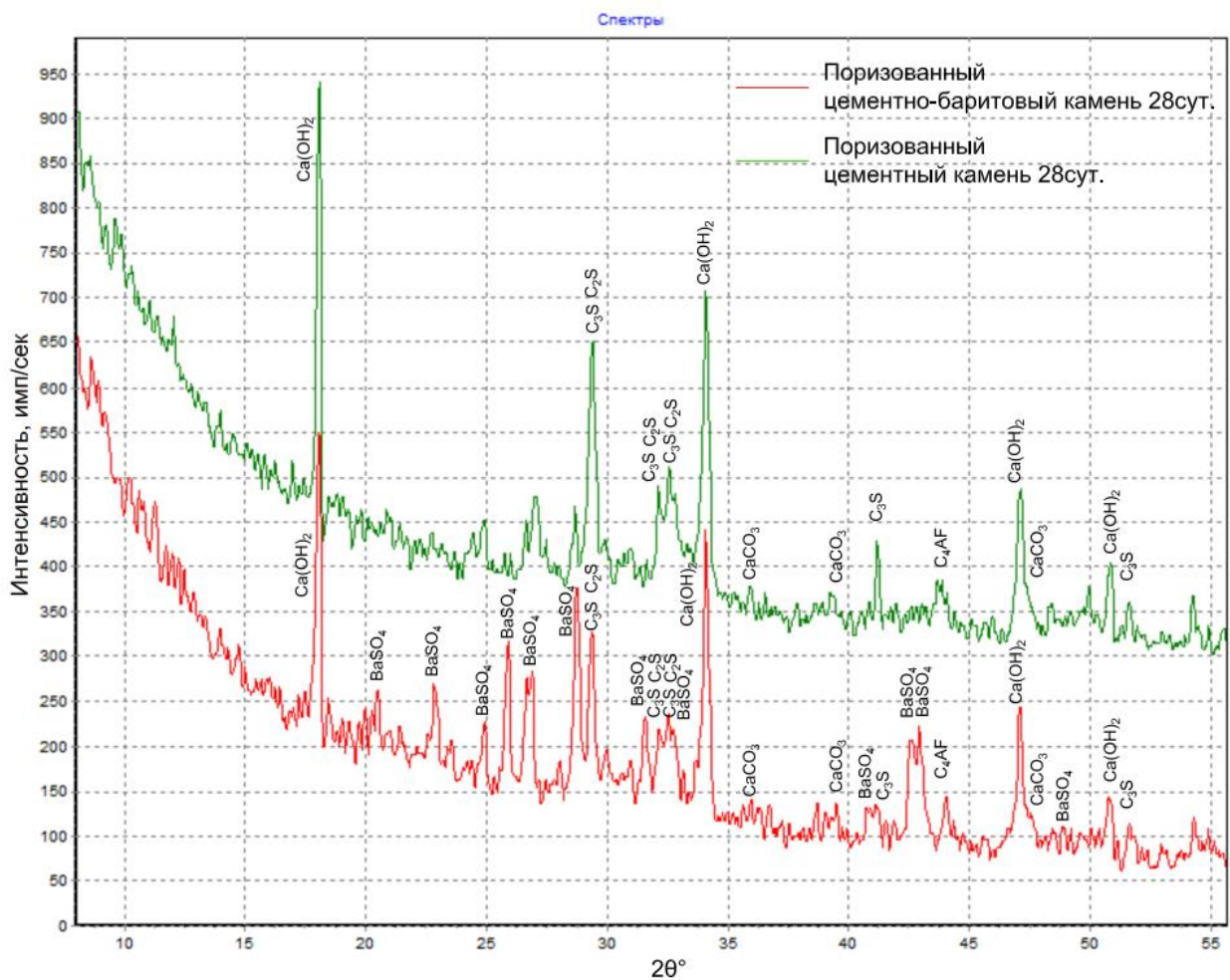


Рисунок 3.22 - Сравнение рентгенограмм поризованного цементно-баритового камня и контрольного поризованного цементного камня в возрасте 28 суток

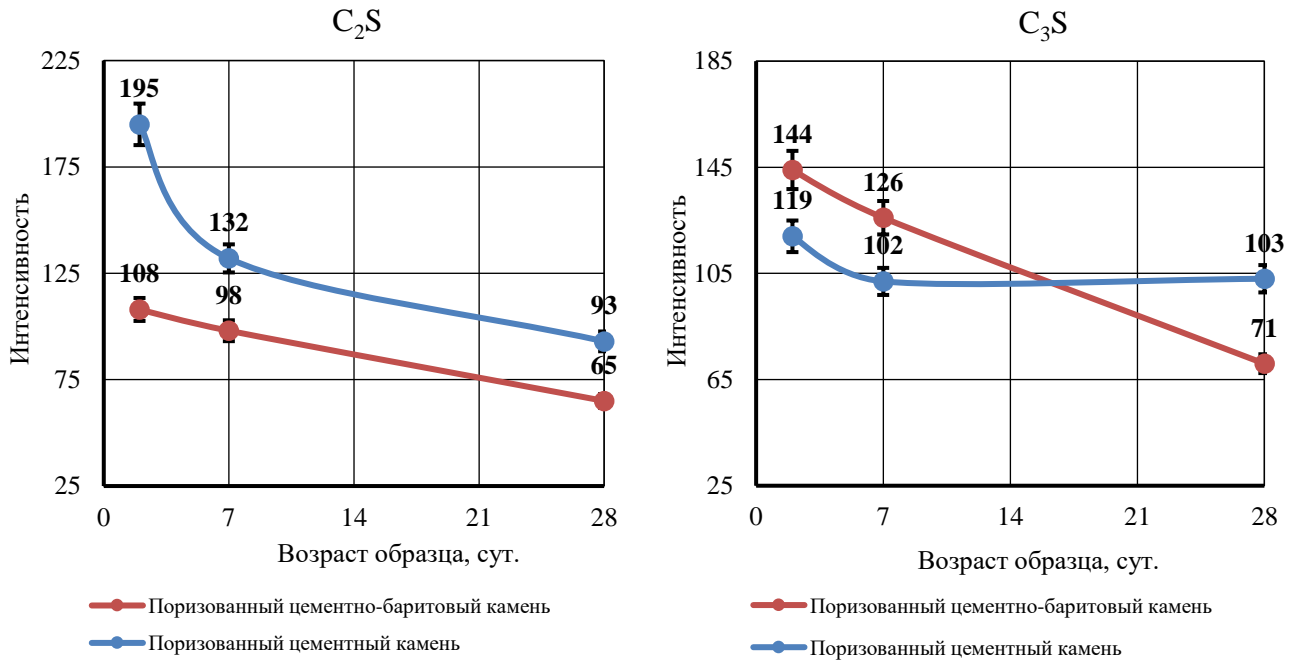


Рисунок 3.23 - Изменение интенсивности пика C<sub>2</sub>S (по пику d=2,788 нм) и C<sub>3</sub>S (по пику d= 2,753 нм) в зависимости от возраста образца

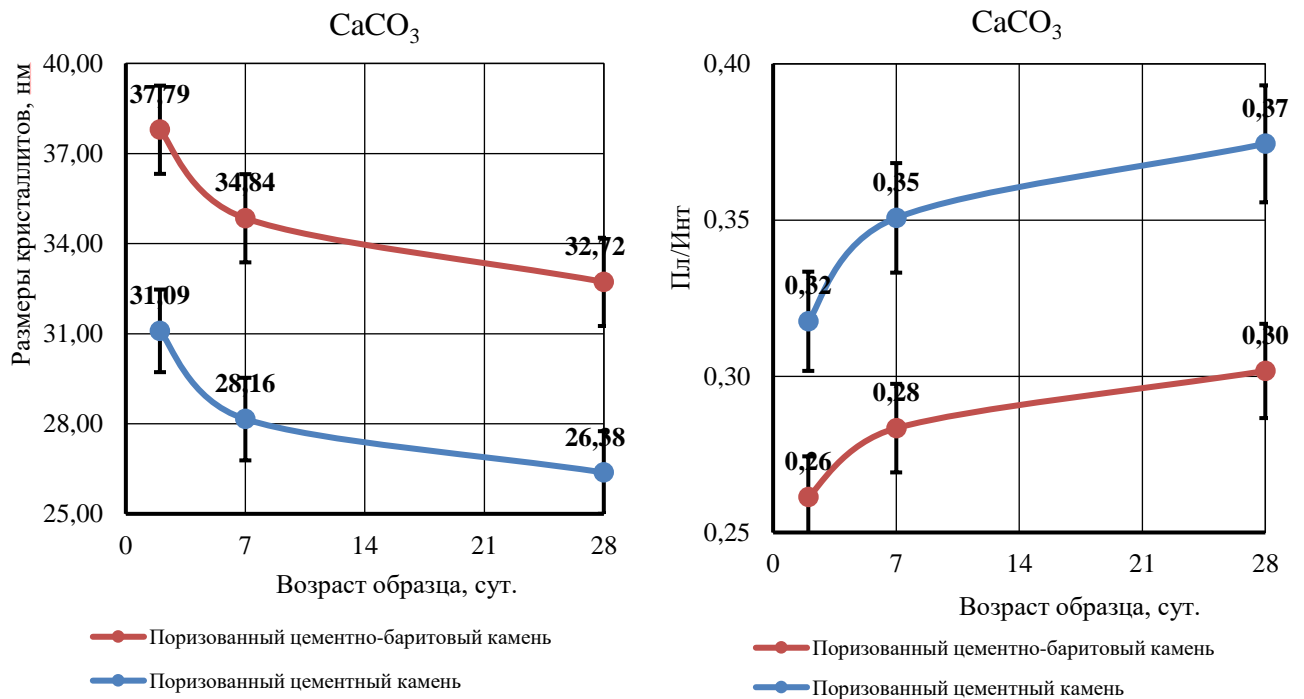


Рисунок 3.24 - Изменение размеров кристаллитов CaCO<sub>3</sub> (по пику d= 3,042 нм) и отношения площади пика CaCO<sub>3</sub> к его интенсивности в зависимости от возраста образца

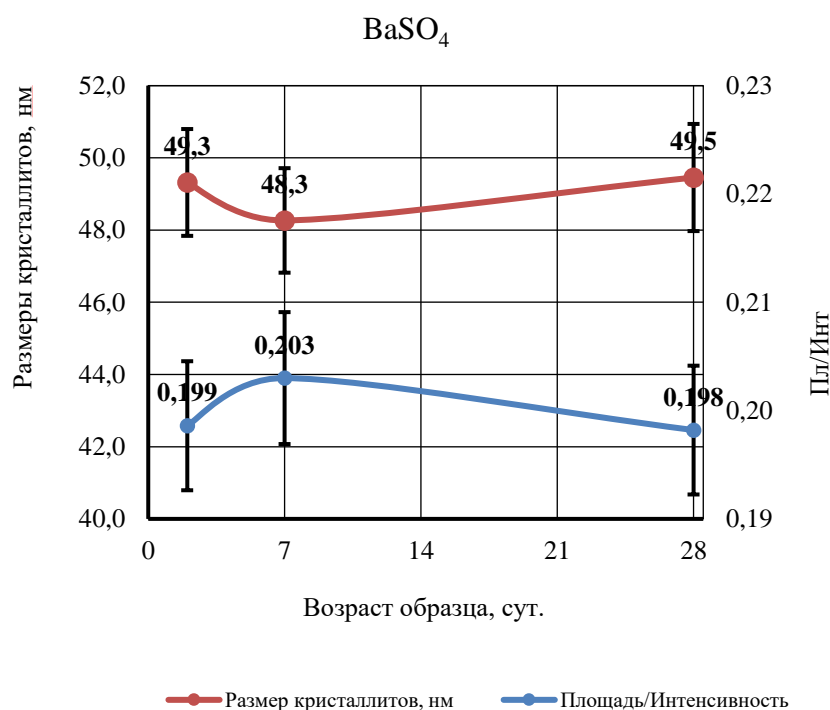


Рисунок 3.25 - Изменение размеров кристаллитов  $BaSO_4$  (по пику  $d= 3,442$  нм) и отношения площади пика  $BaSO_4$  к его интенсивности в зависимости от возраста образца

### **Дифференциальная сканирующая калориметрия.**

Исследование структурных и фазовых свойств поризованного цементно-баритового камня и контрольного образца поризованного цементного камня проводилось с применением дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Эксперименты были выполнены на 2, 7, 14 и 28 сутки твердения.

Для проведения анализа образцы подвергались нагреванию в диапазоне температур от 0 до  $1000^{\circ}C$ . Измерения ДСК осуществлялись для определения эндо- и экзотермических процессов, которые происходят при нагревании, что позволяет получить информацию о фазовых превращениях и термической стабильности исследуемых материалов.

Результаты проведенных исследований представлены на рисунках 3.26 – 3.29 и в таблице 3.5.

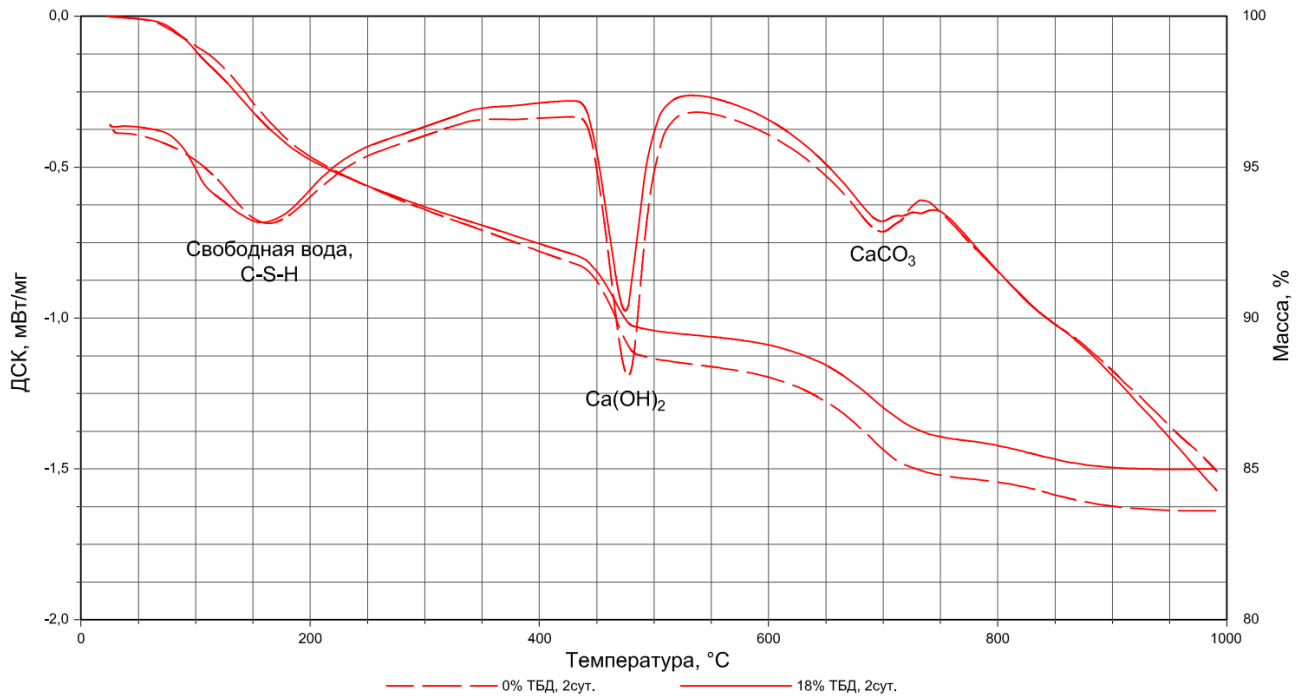


Рисунок 3.26 - Кривые ДСК на 2 сутки твердения поризованного цементного камня и поризованного цементно-баритового камня

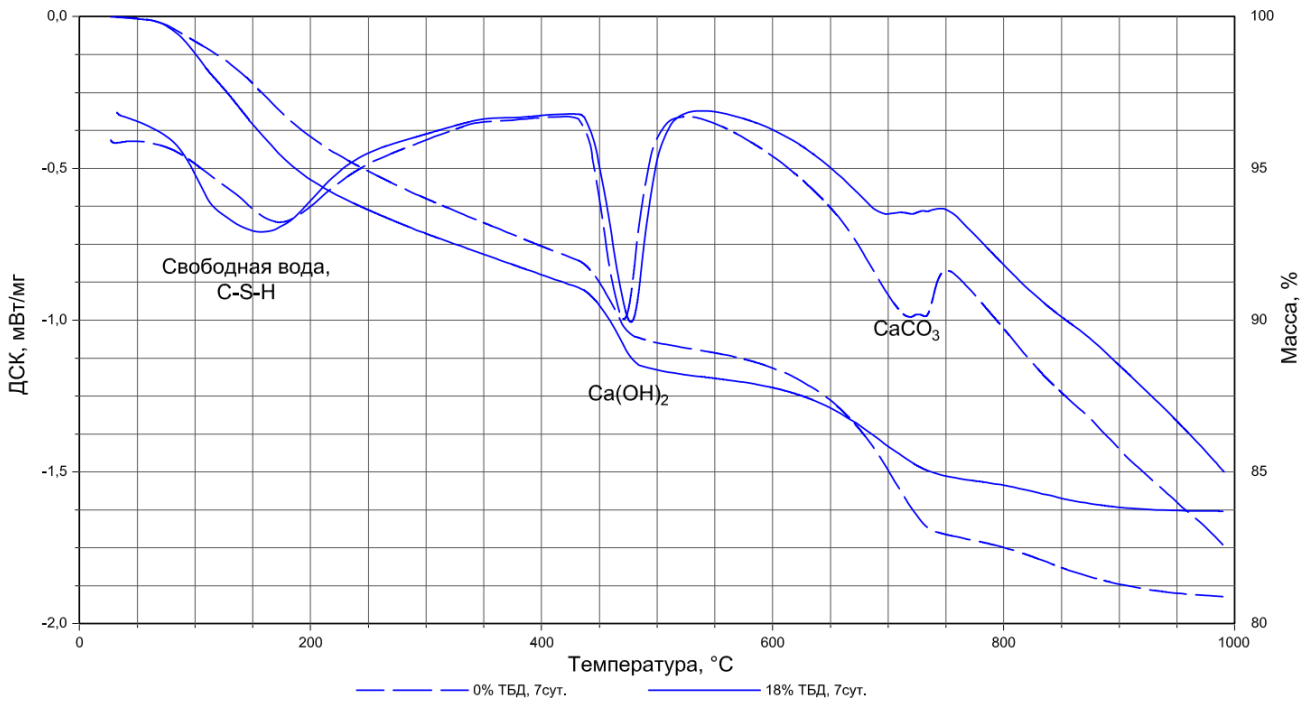


Рисунок 3.27 - Кривые ДСК на 7 сутки твердения поризованного цементного камня и поризованного цементно-баритового камня



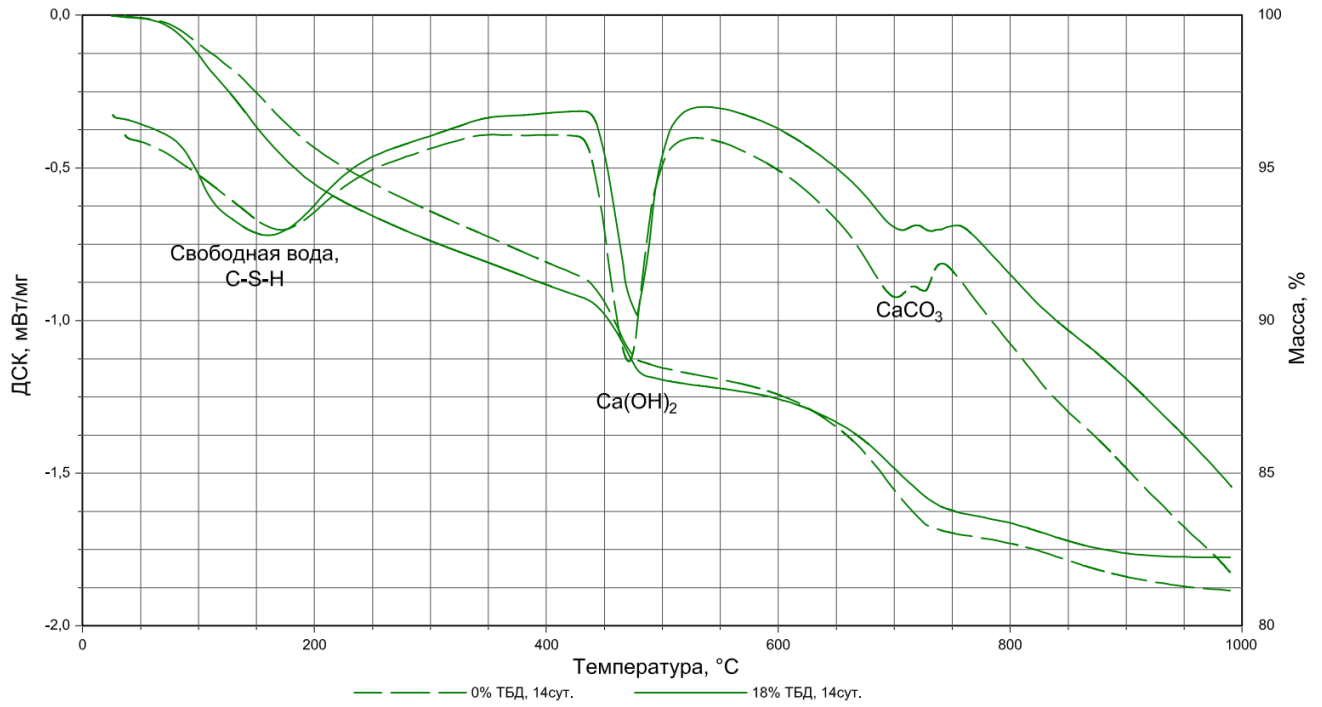


Рисунок 3.28 - Кривые ДСК на 14 сутки твердения поризованного цементного камня и поризованного цементно-баритового камня

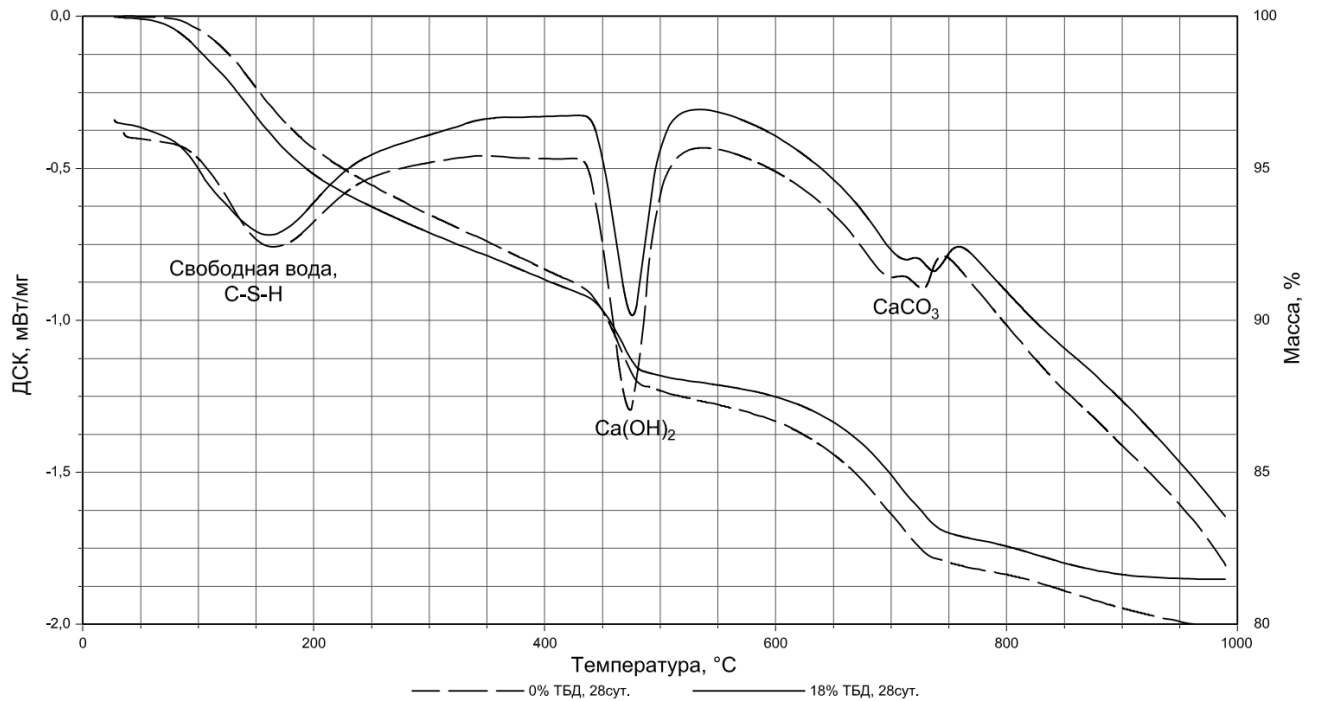


Рисунок 3.29 - Кривые ДСК на 28 сутки твердения поризованного цементного камня и поризованного цементно-баритового камня



Таблица 3.5 - Результаты дифференциальной сканирующей калориметрии

| Возраст образцов, сут. | Потери массы в интервале температур для образцов |                  |       |                           |       | Разница |       |
|------------------------|--|------------------|-------|---------------------------|-------|---------|-------|
|                        | инт., °С   | Цементный камень |       | Цементно-баритовый камень |       |         |       |
|                        |  | ΔМ, мг           | ΔМ, % | ΔМ, мг                    | ΔМ, % | ΔМ, мг  | ΔМ, % |
| 2                      | 75-210   | 2,39             | 4,88  | 2,49                      | 4,93  | -0,10   | -0,05 |
|                        | 210-440  | 1,71             | 3,49  | 1,57                      | 3,11  | 0,14    | 0,38  |
|                        | 440-490  | 1,42             | 2,89  | 1,16                      | 2,29  | 0,26    | 0,60  |
|                        | 490-650  | 0,75             | 1,53  | 0,61                      | 1,21  | 0,14    | 0,32  |
|                        | 650-740  | 1,15             | 2,35  | 1,16                      | 2,29  | 0,00    | 0,06  |
|                        | 740-1000   | 0,62             | 1,26  | 0,59                      | 1,17  | 0,03    | 0,09  |
|                        | ∑  | 8,04             | 16,40 | 7,58                      | 15,00 | 0,47    | 1,40  |
| 7                      | 75-210   | 1,89             | 4,23  | 3,19                      | 5,63  | -1,29   | -1,40 |
|                        | 210-440  | 1,80             | 4,03  | 1,98                      | 3,5   | -0,18   | 0,53  |
|                        | 440-490  | 1,07             | 2,39  | 1,38                      | 2,44  | -0,31   | -0,05 |
|                        | 490-650  | 0,90             | 2,00  | 0,76                      | 1,35  | 0,13    | 0,65  |
|                        | 650-740  | 1,93             | 4,31  | 1,21                      | 2,13  | 0,72    | 2,18  |
|                        | 740-1000   | 0,96             | 2,14  | 0,70                      | 1,24  | 0,26    | 0,90  |
|                        | ∑  | 8,55             | 19,10 | 9,22                      | 16,29 | -0,67   | 2,81  |
| 14                     | 75-210   | 2,08             | 4,61  | 3,31                      | 5,79  | -1,23   | -1,18 |
|                        | 210-440  | 1,91             | 4,24  | 2,07                      | 3,63  | -0,16   | 0,61  |
|                        | 440-490  | 1,17             | 2,59  | 1,39                      | 2,44  | -0,23   | 0,15  |
|                        | 490-650  | 0,93             | 2,06  | 0,84                      | 1,47  | 0,09    | 0,59  |
|                        | 650-740  | 1,51             | 3,35  | 1,57                      | 2,75  | -0,06   | 0,60  |
|                        | 740-1000   | 0,90             | 1,99  | 0,95                      | 1,67  | -0,06   | 0,32  |
|                        | ∑  | 8,50             | 18,84 | 10,15                     | 17,75 | -1,65   | 1,09  |
| 28                     | 75-210   | 2,09             | 4,62  | 2,97                      | 5,46  | -0,88   | -0,84 |
|                        | 210-440  | 2,05             | 4,52  | 2,09                      | 3,84  | -0,04   | 0,68  |
|                        | 440-490  | 1,38             | 3,05  | 1,32                      | 2,43  | 0,06    | 0,62  |
|                        | 490-650  | 1,01             | 2,24  | 0,89                      | 1,64  | 0,12    | 0,60  |
|                        | 650-740  | 1,53             | 3,39  | 1,81                      | 3,34  | -0,28   | 0,05  |
|                        | 740-1000   | 1,06             | 2,35  | 0,92                      | 1,70  | 0,14    | 0,65  |
|                        | ∑  | 9,13             | 20,17 | 10,00                     | 18,41 | -0,87   | 1,76  |

По полученным результатам видно, что для любого возраста образцов, характерна более активная потеря массы при наличии ТБД в составе композиции в диапазоне температур до 210°C. Это связано с тем, что частицы барита не вступают в

реакцию с водой и оставляют большее количество свободной влаги, которая активно испаряется в диапазоне температур от 30 до 120°C [111], вместе с тем происходит дегидратация C-S-H геля. Поскольку барит не вступает в химические взаимодействия с остальными компонентами системы и не влияет на процессы кристаллообразования, а образование кристаллогидратов происходит только при гидратации цемента, то общая потеря массы у образцов с ТБД ниже, так происходит частичная замена цемента.

Процессы разложения портландита ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) протекают одинаково в контрольных образцах и образцах с добавлением ТБД в диапазоне температур 480 – 500 °С. Для всех образцов характерен эндоэффект в диапазоне температур от 700 до 740°C, характерный для процессов декарбонизации кальцита ( $\text{CaCO}_3$ ) [112]. Судя по потерям в массе в этом диапазоне температур количество образовавшегося карбоната кальция при карбонизации образцов с ТБД на воздухе на 5% ниже, что подтверждает ранее сделанный вывод об образовании более плотной структуры цементного камня в присутствии ТБД. Экзотермический эффект в диапазоне температур 780 °С связан с перекристаллизацией обезвоженных гидросиликатов кальция.

Характер изменения линий теплового потока указывает на то, что в изученном диапазоне температур все физико-химические процессы в исследуемых материалах протекают при одинаковых температурах, что связано с химической стабильностью баритового сырья. Сульфат бария ( $\text{BaSO}_4$ ) является химически стабильным соединением и не разлагается при обычных условиях окружающей среды. Однако, при нагревании до достаточно высокой температуры сульфат бария может разлагаться. Известно, что, приблизительная температура начала разложения сульфата бария находится в диапазоне 1100-1580°C [79, 113, 114] При этой температуре сульфат бария распадается на оксид бария ( $\text{BaO}$ ) и диоксид серы ( $\text{SO}_2$ ) согласно следующей реакции:  $2\text{BaSO}_4 \rightarrow 2\text{BaO} + 2\text{SO}_2 + \text{O}_2$  [115].

### 3.5 Выводы по главе 3

1) С увеличением времени помола баритового концентрата происходит аморфизации частиц барита. При этом размер кристаллитов снижается. Помол баритового концентрат в шаровой мельнице более 45 мин. не приводит к существенным изменениям показателя дисперсности частиц.

2) Увеличение количества ТБД до 17% от массы вяжущего способствует улучшению прочностных характеристик за счёт уплотнения структуры, а дальнейшее увеличение количества ТБД приводит к снижению прочности композиционного материала за счёт разрыхления цементной матрицы

3) Увеличение тонкости помола ТБД негативно влияет на прочностные характеристики цементно-баритового камня по причине образованием агломераций мелких частиц баритсодержащей добавки вокруг более крупных. Использование ПАВ позволяет диспергировать данные агломерации и увеличить процентное содержание ТБД, при котором достигается максимальная прочность, до 20%. Разрушение агломераций частиц ТБД и их повышенная дисперсность способствуют равномерному распределению нагрузки в материале, улучшая его общую прочность в результате чего наибольшая прочность цементно-баритового камня достигается при наибольшей тонкости помола.

4) Увеличение количества ТБД приводит к увеличению плотности композиционного материала. Также наблюдается увеличение плотности при увеличении дисперсности добавки, что обуславливается созданием более плотной упаковкой частиц в единице объема

5) С увеличением количества добавки и ее дисперсности, возрастает водоцементное отношение необходимое, для получения цементного теста нормальной густоты. Это обусловлено возрастающей адсорбционной способностью тонкодисперсной баритсодержащей добавки. Сравнивая водопотребность образцов с разной дисперсностью добавки, но с одинаковым ее количеством можно отметить, что уве-

личение тонкости помола приводит снижению необходимого водоцементного отношения, что обусловлено тем, что высокодисперсный баритовый концентрат при создании более плотной упаковке частиц вытесняет часть жидкости из межзернового пространства.

6). ТБД с дисперсностью равной портландцементу ( $S_{уд} = 310 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) при 10% содержании не участвует в формировании структурного каркаса цементной матрицы, о чем свидетельствуют одинаковые сроки начала схватывания. С увеличением дисперсности ТБД и количества ее введения проявляется, наоборот, диспергирующий эффект, который затрудняет формирование структурного каркаса и замедляет процессы коагуляции цементного геля. Это приводит к удлинению сроков схватывания композиционного материала

7) При сравнении составов растворов пенообразователей для производства строительной пены установлено, что время жизни пены, полученной с использованием синтетического пенообразователя ниже и через пол часа после вспенивания относительный объём сохранившейся пены ниже на 22%, чем из белкового пенообразователя. Стойкость пены в цементном тесте полученной с использованием 3-% раствора белкового пенообразователя выше на 4%, чем у пены, полученной с использованием 4-% раствора и на 12% выше по сравнению с 4-% раствором синтетического пенообразователя.

8) На рентгенограммах поризованного цементно-баритового камня наблюдается большое количество интенсивных пиков, характерных для сернокислого бария, с интенсивностью равной соответствующим пикам рентгенограммы исходного баритового концентрата. В периоде от 2 до 28 суток после формования, не наблюдаются процессы кристаллизации/аморфизации или изменения размеров кристаллитов сернокислого бария, что указывает на то, что баритовый концентрат не участвует в реакции гидратации, благодаря инертности сернокислого бария.

9) Судя по потерям в массе при ДСК в диапазоне температур от 700 до 740°C количество образовавшегося карбоната кальция при карбонизации образцов с ТБД на воздухе на 5% ниже, что подтверждает ранее сделанный вывод об образовании более плотной структуры цементного камня в присутствии ТБД.

## ГЛАВА 4. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОРИЗОВАННОГО БАРИТСОДЕРЖАЩЕГО БЕТОНА.

### 4.1 Свойства баритсодержащего пенобетона монотропной структуры

Пенобетон получают в результате твердения раствора, состоящего из цемента, песка, воды и строительной пены. Заданная плотность бетона достигается изменением соотношения компонентов. Процесс получения безавтоклавного пенобетона включает следующие процессы: дозирование исходных сырьевых материалов, приготовление пенобетонной смеси и укладка ее в подготовленную форму, твердение изделий [116].

Для изучения влияния ТБД на структуру и свойства ячеистых бетонов, а также установления влияния всех компонентов на свойства системы, исследованы физико-механические характеристики образцов пенобетонов различных составов.

Для трёхфакторного плана уравнение (2.1) имеет вид:

$$y(b, x) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (4.1)$$

Для обеспечения ортогональности преобразовываем модель (4.1) следующим образом:

$$y(b, x) = a_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}(x_1^2 - \beta) + b_{22}(x_2^2 - \beta) + b_{33}(x_3^2 - \beta) + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (4.2)$$

Для перехода от закодированных матричных значений к натуральным используются следующие уравнения:

$$X_1 = \frac{x_1 - 58}{19}$$

$$X_2 = \frac{x_2 - 48}{5}$$

$$X_3 = \frac{x_3 - 24}{8}$$

где  $x_1$  - количество песка [38%; 77%];  $x_2$  - количество раствора пенообразователя [43%; 53%];  $x_3$  - количество ТБД [17%; 32%]. Проценты даны относительно массы вяжущего.

При оценке значимости коэффициентов рассчитывается произведение  $h_i s_i$  по формуле (2.14). Коэффициенты считаются значимо отличающимися от нуля, когда выполняется условие  $|b_i| > h_i s_i$ .

При оценке адекватности модели  $F$ -критерий рассчитывается по формуле (2.7). Модель считается адекватно описывающей исследуемые показатели, если  $F < F_{кр}$ .

Составы исследуемых образцов подобраны в соответствии с трёхфакторным ортогональным центральным композиционным планом (см. раздел 2.2.10) и представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Составы исследуемых образцов

| № Состав а | Матрица |        |        | Натуральные значения переменных       |                       |          |                       |          |                       |
|------------|---------|--------|--------|---------------------------------------|-----------------------|----------|-----------------------|----------|-----------------------|
|            | $x_1$   | $x_2$  | $x_3$  | Процентное отношение к массе вяжущего |                       |          |                       |          |                       |
|            |         |        |        | Песок                                 |                       | р-р ПО   |                       | ТБД      |                       |
|            |         |        |        | Значение                              | Интервал варьирования | Значение | Интервал варьирования | Значение | Интервал варьирования |
| 1          | 1       | 1      | 1      | 77%                                   | 19%                   | 53%      | 5%                    | 32%      | 8%                    |
| 2          | -1      | 1      | 1      | 38%                                   |                       | 53%      |                       | 32%      |                       |
| 3          | 1       | -1     | 1      | 77%                                   |                       | 43%      |                       | 32%      |                       |
| 4          | 1       | 1      | -1     | 77%                                   |                       | 53%      |                       | 17%      |                       |
| 5          | -1      | -1     | -1     | 38%                                   |                       | 43%      |                       | 17%      |                       |
| 6          | 1       | -1     | -1     | 77%                                   |                       | 43%      |                       | 17%      |                       |
| 7          | -1      | 1      | -1     | 38%                                   |                       | 53%      |                       | 17%      |                       |
| 8          | -1      | -1     | 1      | 38%                                   |                       | 43%      |                       | 32%      |                       |
| 9          | 1,215   | 0      | 0      | 81%                                   |                       | 48%      |                       | 24%      |                       |
| 10         | -1,215  | 0      | 0      | 34%                                   |                       | 48%      |                       | 24%      |                       |
| 11         | 0       | 1,215  | 0      | 58%                                   |                       | 54%      |                       | 24%      |                       |
| 12         | 0       | -1,215 | 0      | 58%                                   |                       | 42%      |                       | 24%      |                       |
| 13         | 0       | 0      | 1,215  | 58%                                   |                       | 48%      |                       | 34%      |                       |
| 14         | 0       | 0      | -1,215 | 58%                                   |                       | 48%      |                       | 15%      |                       |
| 15         | 0       | 0      | 0      | 58%                                   |                       | 48%      |                       | 24%      |                       |

Результаты построения аналитических моделей приведены в таблице 4.2 и на рисунках 4.1, 4.2.

Таблица 4.2 - Результаты построения аналитических моделей зависимости физико-механических характеристик баритсо-державшего пенобетона от содержания компонентов смеси

| № опыта   | Матрица  |  |        | $R_{сж,2}$ , Мпа  |   |               |             |           | $R_{сж,7}$ , Мпа   |               |               |   |           |  |  |  |
|---|----------|--|--------|---|---|---------------|-------------|-----------|--|---------------|---------------|---|-----------|--|--|--|
|   | $X_1$    | $X_2$  | $X_3$  | $\tilde{y}_1$   | $\tilde{y}_2$   | $\tilde{y}_3$ | $\tilde{y}$ | $\hat{y}$ | $\tilde{y}_1$  | $\tilde{y}_2$ | $\tilde{y}_3$ | $\tilde{y}$   | $\hat{y}$ |  |  |  |
| 1   | 1        | 1  | 1      | 8,20  | 7,61  | 7,98          | 7,93        | 7,59      | 10,98  | 10,56         | 10,18         | 10,58   | 10,19     |  |  |  |
| 2   | -1       | 1  | 1      | 6,96  | 7,79  | 6,64          | 7,13        | 7,25      | 10,19  | 9,19          | 8,70          | 9,36  | 9,63      |  |  |  |
| 3   | 1        | -1   | 1      | 13,93   | 13,80   | 14,70         | 14,14       | 14,18     | 17,03  | 17,76         | 18,44         | 17,74   | 18,03     |  |  |  |
| 4   | 1        | 1  | -1     | 5,32  | 4,98  | 5,07          | 5,12        | 5,24      | 7,73   | 7,38          | 7,76          | 7,62  | 7,62      |  |  |  |
| 5   | -1       | -1   | -1     | 7,53  | 7,52  | 8,25          | 7,77        | 8,02      | 10,90  | 10,48         | 11,32         | 10,90   | 11,31     |  |  |  |
| 6   | 1        | -1   | -1     | 12,02   | 12,17   | 10,87         | 11,69       | 11,83     | 16,89  | 16,99         | 18,46         | 17,45   | 17,16     |  |  |  |
| 7   | -1       | 1  | -1     | 5,31  | 5,28  | 4,63          | 5,08        | 4,90      | 7,63   | 7,40          | 6,95          | 7,33  | 7,06      |  |  |  |
| 8   | -1       | -1   | 1      | 10,37   | 10,24   | 10,20         | 10,27       | 10,37     | 11,79  | 11,63         | 13,15         | 12,19   | 12,18     |  |  |  |
| 9   | 1,215    | 0  | 0      | 7,72  | 8,00  | 8,12          | 7,95        | 8,01      | 9,98   | 10,13         | 10,96         | 10,36   | 10,73     |  |  |  |
| 10  | -1,215   | 0  | 0      | 5,97  | 5,86  | 5,30          | 5,71        | 5,49      | 7,52   | 6,50          | 7,32          | 7,11  | 6,84      |  |  |  |
| 11  | 0        | 1,215  | 0      | 6,08  | 6,13  | 5,75          | 5,99        | 6,25      | 8,20   | 8,35          | 7,36          | 7,97  | 8,31      |  |  |  |
| 12  | 0        | -1,215   | 0      | 12,04   | 12,60   | 13,03         | 12,56       | 12,15     | 16,36  | 15,23         | 16,36         | 15,98   | 15,66     |  |  |  |
| 13  | 0        | 0  | 1,215  | 9,11  | 9,78  | 9,27          | 9,39        | 9,49      | 11,44  | 10,57         | 10,92         | 10,97   | 10,85     |  |  |  |
| 14  | 0        | 0  | -1,215 | 6,91  | 7,16  | 6,58          | 6,88        | 6,63      | 8,99   | 8,75          | 8,15          | 8,63  | 8,76      |  |  |  |
| 15  | 0        | 0  | 0      | 6,80  | 7,34  | 7,32          | 7,15        | 7,36      | 8,73   | 9,30          | 8,77          | 8,93  | 8,78      |  |  |  |
| Коэффициенты уравнения регрессии                            | $a_0$    | 7,36   |        |   |   |               |             |           | 8,80   |               |               |   |           |  |  |  |
|   | $b_0$    | 7,36   |        |   |   |               |             |           | 8,78   |               |               |   |           |  |  |  |
|   | $b_1$    | 1,04 ; $ b_1  > h_{1S1} = 0,14 \Rightarrow$ коэф-т значимый        |        |   |   |               |             |           | 1,6 ; $ b_1  > h_{1S1} = 0,2 \Rightarrow$ коэф-т значимый  |               |               |   |           |  |  |  |
|   | $b_2$    | -2,43 ; $ b_2  > h_{1S2} = 0,14 \Rightarrow$ коэф-т значимый       |        |   |   |               |             |           | -3,02 ; $ b_2  > h_{1S2} = 0,2 \Rightarrow$ коэф-т значимый  |               |               |   |           |  |  |  |
|   | $b_3$    | 1,18 ; $ b_3  > h_{1S3} = 0,14 \Rightarrow$ коэф-т значимый        |        |   |   |               |             |           | 0,86 ; $ b_3  > h_{1S3} = 0,2 \Rightarrow$ коэф-т значимый   |               |               |   |           |  |  |  |
|   | $b_{11}$ | -0,41 ; $ b_{11}  > h_{2S11} = 0,22 \Rightarrow$ коэф-т значимый   |        |   |   |               |             |           | -0,03 ; $ b_{11}  < h_{2S11} = 0,32 \Rightarrow$ коэф-т не значимый  |               |               |   |           |  |  |  |
|   | $b_{22}$ | 1,25 ; $ b_{22}  > h_{2S22} = 0,22 \Rightarrow$ коэф-т значимый    |        |   |   |               |             |           | 2,17 ; $ b_{22}  > h_{2S22} = 0,32 \Rightarrow$ коэф-т значимый  |               |               |   |           |  |  |  |
|   | $b_{33}$ | 0,48 ; $ b_{33}  > h_{2S33} = 0,22 \Rightarrow$ коэф-т значимый    |        |   |   |               |             |           | 0,7 ; $ b_{33}  > h_{2S33} = 0,32 \Rightarrow$ коэф-т значимый   |               |               |   |           |  |  |  |
|   | $b_{12}$ | -0,87 ; $ b_{12}  > h_{3S12} = 0,17 \Rightarrow$ коэф-т значимый   |        |   |   |               |             |           | -1,32 ; $ b_{12}  > h_{3S12} = 0,24 \Rightarrow$ коэф-т значимый   |               |               |   |           |  |  |  |
|   | $b_{13}$ | 0,09 ; $ b_{13}  < h_{3S13} = 0,17 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |        |   |   |               |             |           | -0,01 ; $ b_{13}  < h_{3S13} = 0,24 \Rightarrow$ коэф-т не значимый  |               |               |   |           |  |  |  |
|   |          |  |        | $b_{23}$  | -0,01 ; $ b_{23}  < h_{3S23} = 0,17 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |               |             |           |  |               |               | 0,42 ; $ b_{23}  > h_{3S23} = 0,24 \Rightarrow$ коэф-т значимый |           |  |  |  |
| Уравнение регрессии в нормализованных обозначениях факторов |          |  |        | $R_{сж,2} = 7,36 + 1,04 X_1 - 2,43 X_2 + 1,18 X_3 - 0,41 X_1^2 + 1,25 X_2^2 + 0,48 X_3^2 - 0,87 X_1 X_2$                                      |   |               |             |           | $R_{сж,7} = 8,78 + 1,6 X_1 - 3,02 X_2 + 0,86 X_3 + 2,17 X_2^2 + 0,7 X_3^2 - 1,32 X_1 X_2 + 0,42 X_2 X_3$                                     |               |               |   |           |  |  |  |
| Уравнение регрессии с натуральными значениями факторов      |          |  |        | $R_{сж,2} = 124,654 + 0,634237 x_1 - 0,00110873 x_1^2 - 5,15792 x_2 - 0,00940578 x_1 x_2 + 0,0540281 x_2^2 - 0,235338 x_3 + 0,00799168 x_3^2$ |   |               |             |           | $R_{сж,7} = 228,703 + 0,769345 x_1 - 9,09691 x_2 - 0,0142708 x_1 x_2 + 0,0937928 x_2^2 - 0,995987 x_3 + 0,0112668 x_2 x_3 + 0,0116545 x_3^2$ |               |               |   |           |  |  |  |
| $F$ критерий  |          |  |        | $0,87 < F_{кр} = 2,53 \Rightarrow$ модель адекватна   |   |               |             |           | $0,7 < F_{кр} = 2,53 \Rightarrow$ модель адекватна   |               |               |   |           |  |  |  |

Продолжение таблицы 4.2

| № опыта   | Матрица  |   |        | $R_{сж,14}$ , Мпа |             |             |           |   | $R_{сж,28}$ , Мпа   |             |             |           |           |
|---|--|---|--------|-------------------|-------------|-------------|-----------|---|---|-------------|-------------|-----------|-----------|
|   | $X_1$  | $X_2$   | $X_3$  | $\bar{y}_1$       | $\bar{y}_2$ | $\bar{y}_3$ | $\bar{y}$ | $\bar{y}$   | $\bar{y}_1$   | $\bar{y}_2$ | $\bar{y}_3$ | $\bar{y}$ | $\bar{y}$ |
| 1   | 1  | 1   | 1      | 11,86             | 11,90       | 10,95       | 11,57     | 11,10   | 12,90   | 12,90       | 14,88       | 13,56     | 12,69     |
| 2   | -1   | 1   | 1      | 9,11              | 9,46        | 9,12        | 9,23      | 9,20  | 10,46   | 9,08        | 9,02        | 9,52      | 10,54     |
| 3   | 1  | -1  | 1      | 18,98             | 18,71       | 17,03       | 18,24     | 18,96   | 17,51   | 20,04       | 17,48       | 18,35     | 18,93     |
| 4   | 1  | 1   | -1     | 9,33              | 9,27        | 8,78        | 9,13      | 9,38  | 10,52   | 9,17        | 9,25        | 9,65      | 10,40     |
| 5   | -1   | -1  | -1     | 12,44             | 12,14       | 11,10       | 11,90     | 12,13   | 11,04   | 10,93       | 12,65       | 11,54     | 12,78     |
| 6   | 1  | -1  | -1     | 18,43             | 18,18       | 16,39       | 17,67     | 17,25   | 17,48   | 17,44       | 16,80       | 17,24     | 16,64     |
| 7   | -1   | 1   | -1     | 7,53              | 7,32        | 7,69        | 7,51      | 7,48  | 7,98  | 9,23        | 8,02        | 8,41      | 8,24      |
| 8   | -1   | -1  | 1      | 13,04             | 12,98       | 14,83       | 13,62     | 13,84   | 16,83   | 14,62       | 14,64       | 15,36     | 15,07     |
| 9   | 1,215  | 0   | 0      | 11,58             | 13,34       | 12,56       | 12,49     | 12,69   | 11,36   | 11,15       | 12,83       | 11,78     | 12,65     |
| 10  | -1,215   | 0   | 0      | 8,58              | 8,78        | 8,07        | 8,48      | 8,43  | 9,96  | 9,65        | 9,51        | 9,71      | 8,99      |
| 11  | 0  | 1,215   | 0      | 8,98              | 9,47        | 9,23        | 9,23      | 9,50  | 11,36   | 11,53       | 11,52       | 11,47     | 11,00     |
| 12  | 0  | -1,215  | 0      | 17,95             | 17,69       | 17,40       | 17,68     | 17,10   | 18,84   | 18,43       | 17,23       | 18,17     | 17,55     |
| 13  | 0  | 0   | 1,215  | 11,74             | 11,61       | 12,95       | 12,10     | 11,60   | 11,79   | 12,58       | 12,66       | 12,34     | 12,21     |
| 14  | 0  | 0   | -1,215 | 9,95              | 9,61        | 9,52        | 9,69      | 9,52  | 11,09   | 9,77        | 9,76        | 10,21     | 9,43      |
| 15  | 0  | 0   | 0      | 10,22             | 9,82        | 10,65       | 10,23     | 10,56   | 10,17   | 10,11       | 11,63       | 10,64     | 10,82     |
| Коэффициенты уравнения регрессии                            | $a_0$  | 10,58   |        |                   |             |             |           |   | 11,18   |             |             |           |           |
|   | $b_0$  | 10,56   |        |                   |             |             |           |   | 10,82   |             |             |           |           |
|   | $b_1$  | 1,75 ; $ b_1  > h_{1S1} = 0,23 \Rightarrow$ коэф-т значимый         |        |                   |             |             |           |   | 1,5 ; $ b_1  > h_{1S1} = 0,31 \Rightarrow$ коэф-т значимый          |             |             |           |           |
|   | $b_2$  | -3,13 ; $ b_2  > h_{1S2} = 0,23 \Rightarrow$ коэф-т значимый        |        |                   |             |             |           |   | -2,69 ; $ b_2  > h_{1S2} = 0,31 \Rightarrow$ коэф-т значимый        |             |             |           |           |
|   | $b_3$  | 0,86 ; $ b_3  > h_{1S3} = 0,23 \Rightarrow$ коэф-т значимый         |        |                   |             |             |           |   | 1,15 ; $ b_3  > h_{1S3} = 0,31 \Rightarrow$ коэф-т значимый         |             |             |           |           |
|   | $b_{11}$   | -0,16 ; $ b_{11}  < h_{2S11} = 0,36 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |        |                   |             |             |           |   | -0,42 ; $ b_{11}  < h_{2S11} = 0,48 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |             |             |           |           |
|   | $b_{22}$   | 1,86 ; $ b_{22}  > h_{2S22} = 0,36 \Rightarrow$ коэф-т значимый     |        |                   |             |             |           |   | 2,34 ; $ b_{22}  > h_{2S22} = 0,48 \Rightarrow$ коэф-т значимый     |             |             |           |           |
|   | $b_{33}$   | 0,12 ; $ b_{33}  < h_{2S33} = 0,36 \Rightarrow$ коэф-т не значимый  |        |                   |             |             |           |   | -0,06 ; $ b_{33}  < h_{2S33} = 0,48 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |             |             |           |           |
|   | $b_{12}$   | -0,8 ; $ b_{12}  > h_{3S12} = 0,27 \Rightarrow$ коэф-т значимый     |        |                   |             |             |           |   | -0,43 ; $ b_{12}  > h_{3S12} = 0,37 \Rightarrow$ коэф-т значимый    |             |             |           |           |
|   | $b_{13}$   | -0,05 ; $ b_{13}  < h_{3S13} = 0,27 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |        |                   |             |             |           |   | 0,1 ; $ b_{13}  < h_{3S13} = 0,37 \Rightarrow$ коэф-т не значимый   |             |             |           |           |
| $b_{23}$  | 0,23 ; $ b_{23}  < h_{3S23} = 0,27 \Rightarrow$ коэф-т не значимый                                       |   |        |                   |             |             |           | 0,1 ; $ b_{23}  < h_{3S23} = 0,37 \Rightarrow$ коэф-т не значимый                                       |   |             |             |           |           |
| Уравнение регрессии в нормализованных обозначениях факторов | $R_{сж,14} = 10,56 + 1,75 X_1 - 3,13 X_2 + 0,86 X_3 + 1,86 X_2^2 - 0,8 X_1 X_2$                          |   |        |                   |             |             |           | $R_{сж,28} = 10,82 + 1,5 X_1 - 2,69 X_2 + 1,15 X_3 + 2,34 X_2^2 - 0,43 X_1 X_2$                         |   |             |             |           |           |
| Уравнение регрессии с натуральными значениями факторов      | $R_{сж,14} = 195,761 + 0,506847 x_1 - 7,88244 x_2 - 0,00864899 x_1 x_2 + 0,0803938 x_2^2 + 0,110968 x_3$ |   |        |                   |             |             |           | $R_{сж,28} = 250,521 + 0,301519 x_1 - 10,0167 x_2 - 0,00464883 x_1 x_2 + 0,101141 x_2^2 + 0,148387 x_3$ |   |             |             |           |           |
| F критерий  | 0,93 < $F_{кр} = 2,53 \Rightarrow$ модель адекватна  |   |        |                   |             |             |           | 1,96 < $F_{кр} = 2,53 \Rightarrow$ модель адекватна   |   |             |             |           |           |



Продолжение таблицы 4.2

| № опыта   | Матрица  |  |        | $R_{изг,2}, \text{ Мпа}$ |             |             |           |   | $R_{изг,7}, \text{ Мпа}$  |             |             |           |           |
|---|--|--|--------|--------------------------|-------------|-------------|-----------|---|---|-------------|-------------|-----------|-----------|
|   | $X_1$  | $X_2$  | $X_3$  | $\bar{y}_1$              | $\bar{y}_2$ | $\bar{y}_3$ | $\bar{y}$ | $\hat{y}$   | $\bar{y}_1$   | $\bar{y}_2$ | $\bar{y}_3$ | $\bar{y}$ | $\hat{y}$ |
| 1   | 1  | 1  | 1      | 2,50                     | 2,58        | 2,76        | 2,61      | 2,50  | 2,89  | 2,76        | 3,00        | 2,89      | 2,77      |
| 2   | -1   | 1  | 1      | 2,16                     | 2,14        | 1,94        | 2,08      | 2,12  | 2,29  | 2,28        | 2,54        | 2,37      | 2,43      |
| 3   | 1  | -1   | 1      | 3,74                     | 3,59        | 3,83        | 3,72      | 3,75  | 4,10  | 4,01        | 3,99        | 4,04      | 4,09      |
| 4   | 1  | 1  | -1     | 2,34                     | 2,27        | 2,32        | 2,31      | 2,33  | 2,55  | 2,55        | 2,61        | 2,57      | 2,57      |
| 5   | -1   | -1   | -1     | 2,41                     | 2,48        | 2,54        | 2,48      | 2,58  | 2,83  | 3,08        | 2,91        | 2,94      | 3,08      |
| 6   | 1  | -1   | -1     | 3,16                     | 3,31        | 3,12        | 3,20      | 3,17  | 3,80  | 3,75        | 3,55        | 3,70      | 3,61      |
| 7   | -1   | 1  | -1     | 2,07                     | 1,95        | 1,96        | 1,99      | 1,95  | 2,27  | 2,24        | 2,30        | 2,27      | 2,23      |
| 8   | -1   | -1   | 1      | 3,21                     | 3,01        | 3,27        | 3,17      | 3,16  | 3,48  | 3,42        | 3,87        | 3,59      | 3,56      |
| 9   | 1,215  | 0  | 0      | 2,63                     | 2,73        | 2,85        | 2,74      | 2,81  | 2,97  | 2,90        | 3,13        | 3,00      | 3,13      |
| 10  | -1,215   | 0  | 0      | 2,44                     | 2,33        | 2,13        | 2,30      | 2,22  | 2,61  | 2,60        | 2,91        | 2,71      | 2,60      |
| 11  | 0  | 1,215  | 0      | 2,31                     | 2,15        | 2,20        | 2,22      | 2,29  | 2,48  | 2,42        | 2,41        | 2,44      | 2,52      |
| 12  | 0  | -1,215   | 0      | 3,59                     | 3,49        | 3,43        | 3,51      | 3,43  | 4,05  | 4,00        | 3,61        | 3,89      | 3,84      |
| 13  | 0  | 0  | 1,215  | 2,88                     | 2,83        | 2,87        | 2,86      | 2,89  | 3,16  | 3,32        | 3,10        | 3,19      | 3,17      |
| 14  | 0  | 0  | -1,215 | 2,56                     | 2,54        | 2,39        | 2,50      | 2,44  | 2,93  | 2,87        | 2,62        | 2,81      | 2,76      |
| 15  | 0  | 0  | 0      | 2,51                     | 2,68        | 2,73        | 2,64      | 2,66  | 2,78  | 2,97        | 3,01        | 2,92      | 2,97      |
| Коэффициенты уравнения регрессии                            | $a_0$  | 2,66   |        |                          |             |             |           |   | 2,94  |             |             |           |           |
|   | $b_0$  | 2,66   |        |                          |             |             |           |   | 2,92  |             |             |           |           |
|   | $b_1$  | 0,24 ; $ b_1  > h_{1S1} = 0,04 \Rightarrow$ коэф-т значимый        |        |                          |             |             |           |   | 0,22 ; $ b_1  > h_{1S1} = 0,05 \Rightarrow$ коэф-т значимый         |             |             |           |           |
|   | $b_2$  | -0,47 ; $ b_2  > h_{1S2} = 0,04 \Rightarrow$ коэф-т значимый       |        |                          |             |             |           |   | -0,54 ; $ b_2  > h_{1S2} = 0,05 \Rightarrow$ коэф-т значимый        |             |             |           |           |
|   | $b_3$  | 0,19 ; $ b_3  > h_{1S3} = 0,04 \Rightarrow$ коэф-т значимый        |        |                          |             |             |           |   | 0,17 ; $ b_3  > h_{1S3} = 0,05 \Rightarrow$ коэф-т значимый         |             |             |           |           |
|   | $b_{11}$   | -0,1 ; $ b_{11}  > h_{2S11} = 0,06 \Rightarrow$ коэф-т значимый    |        |                          |             |             |           |   | -0,07 ; $ b_{11}  < h_{2S11} = 0,08 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |             |             |           |           |
|   | $b_{22}$   | 0,13 ; $ b_{22}  > h_{2S22} = 0,06 \Rightarrow$ коэф-т значимый    |        |                          |             |             |           |   | 0,14 ; $ b_{22}  > h_{2S22} = 0,08 \Rightarrow$ коэф-т значимый     |             |             |           |           |
|   | $b_{33}$   | 0,01 ; $ b_{33}  < h_{2S33} = 0,06 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |        |                          |             |             |           |   | 0,03 ; $ b_{33}  < h_{2S33} = 0,08 \Rightarrow$ коэф-т не значимый  |             |             |           |           |
|   | $b_{12}$   | -0,05 ; $ b_{12}  > h_{3S12} = 0,04 \Rightarrow$ коэф-т значимый   |        |                          |             |             |           |   | -0,05 ; $ b_{12}  < h_{3S12} = 0,06 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |             |             |           |           |
|   | $b_{13}$   | 0,01 ; $ b_{13}  < h_{3S13} = 0,04 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |        |                          |             |             |           |   | -0,01 ; $ b_{13}  < h_{3S13} = 0,06 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |             |             |           |           |
| $b_{23}$  | -0,1 ; $ b_{23}  > h_{3S23} = 0,04 \Rightarrow$ коэф-т значимый  |  |        |                          |             |             |           | -0,07 ; $ b_{23}  > h_{3S23} = 0,06 \Rightarrow$ коэф-т значимый  |   |             |             |           |           |
| Уравнение регрессии в нормализованных обозначениях факторов | $R_{изг,2} = 2,66 + 0,24 X_1 - 0,47 X_2 + 0,19 X_3 - 0,1 X_1^2 + 0,13 X_2^2 - 0,05 X_1 X_2 - 0,1 X_2 X_3$  |  |        |                          |             |             |           | $R_{изг,7} = 2,92 + 0,22 X_1 - 0,54 X_2 + 0,17 X_3 + 0,14 X_2^2 - 0,07 X_2 X_3$                             |   |             |             |           |           |
| Уравнение регрессии с натуральными значениями факторов      | $R_{изг,2} = 13,5056 + 0,069672 x_1 - 0,000270422 x_1^2 - 0,541791 x_2 - 0,000540562 x_1 x_2 + 0,00561892 x_2^2 + 0,153495 x_3 - 0,00268258 x_2 x_3$ |  |        |                          |             |             |           | $R_{изг,7} = 18,9248 + 0,0114405 x_1 - 0,648608 x_2 + 0,00605115 x_2^2 + 0,112221 x_3 - 0,00187781 x_2 x_3$ |   |             |             |           |           |
| $F$ критерий  | $1,02 < F_{кр} = 2,53 \Rightarrow$ модель адекватна  |  |        |                          |             |             |           | $1,35 < F_{кр} = 2,53 \Rightarrow$ модель адекватна   |   |             |             |           |           |

Продолжение таблицы 4.2

| №<br>опыт<br>а  | Матрица   |   |        | $R_{изг,14}, \text{ Мпа}$ |             |             |           |   | $R_{изг,28}, \text{ Мпа}$   |             |             |           |           |
|---|---|---|--------|---------------------------|-------------|-------------|-----------|---|---|-------------|-------------|-----------|-----------|
|   | $X_1$   | $X_2$   | $X_3$  | $\bar{y}_1$               | $\bar{y}_2$ | $\bar{y}_3$ | $\bar{y}$ | $\hat{y}$   | $\bar{y}_1$   | $\bar{y}_2$ | $\bar{y}_3$ | $\bar{y}$ | $\hat{y}$ |
| 1   | 1   | 1   | 1      | 3,04                      | 3,08        | 2,73        | 2,95      | 2,82  | 3,04  | 3,20        | 3,17        | 3,14      | 3,00      |
| 2   | -1  | 1   | 1      | 2,46                      | 2,63        | 2,45        | 2,52      | 2,61  | 2,56  | 2,64        | 2,39        | 2,53      | 2,59      |
| 3   | 1   | -1  | 1      | 4,22                      | 4,31        | 3,80        | 4,11      | 4,21  | 4,44  | 4,52        | 4,22        | 4,39      | 4,43      |
| 4   | 1   | 1   | -1     | 2,76                      | 2,76        | 2,52        | 2,68      | 2,77  | 2,66  | 2,71        | 2,96        | 2,78      | 2,81      |
| 5   | -1  | -1  | -1     | 2,96                      | 3,02        | 2,81        | 2,93      | 3,08  | 3,11  | 3,00        | 3,16        | 3,09      | 3,27      |
| 6   | 1   | -1  | -1     | 3,92                      | 3,91        | 3,83        | 3,89      | 3,82  | 4,24  | 3,88        | 4,13        | 4,08      | 3,94      |
| 7   | -1  | 1   | -1     | 2,45                      | 2,42        | 2,27        | 2,38      | 2,30  | 2,41  | 2,49        | 2,31        | 2,41      | 2,40      |
| 8   | -1  | -1  | 1      | 3,88                      | 3,79        | 3,72        | 3,80      | 3,73  | 4,03  | 4,07        | 3,54        | 3,88      | 3,76      |
| 9   | 1,215   | 0   | 0      | 3,03                      | 3,18        | 3,50        | 3,24      | 3,30  | 3,25  | 3,31        | 3,15        | 3,24      | 3,40      |
| 10  | -1,215  | 0   | 0      | 2,75                      | 2,85        | 2,63        | 2,75      | 2,72  | 2,75  | 2,97        | 2,80        | 2,84      | 2,75      |
| 11  | 0   | 1,215   | 0      | 2,45                      | 2,46        | 2,73        | 2,55      | 2,58  | 2,65  | 2,55        | 2,66        | 2,62      | 2,67      |
| 12  | 0   | -1,215  | 0      | 4,02                      | 4,06        | 3,84        | 3,97      | 3,90  | 3,92  | 4,06        | 4,17        | 4,05      | 4,07      |
| 13  | 0   | 0   | 1,215  | 3,24                      | 3,09        | 3,37        | 3,23      | 3,22  | 3,23  | 3,20        | 3,35        | 3,26      | 3,28      |
| 14  | 0   | 0   | -1,215 | 2,79                      | 2,80        | 3,03        | 2,87      | 2,80  | 3,16  | 2,89        | 3,04        | 3,03      | 2,87      |
| 15  | 0   | 0   | 0      | 3,01                      | 2,95        | 2,97        | 2,98      | 3,01  | 2,90  | 2,97        | 3,07        | 2,98      | 3,07      |
| Коэффициенты уравнения регрессии                            | $a_0$   | 3,01  |        |                           |             |             |           |   | 3,02  |             |             |           |           |
|   | $b_0$   | 3,01  |        |                           |             |             |           |   | 3,07  |             |             |           |           |
|   | $b_1$   | 0,24 ; $ b_1  > h_{1S1} = 0,05 \Rightarrow$ коэф-т значимый         |        |                           |             |             |           |   | 0,27 ; $ b_1  > h_{1S1} = 0,05 \Rightarrow$ коэф-т значимый         |             |             |           |           |
|   | $b_2$   | -0,54 ; $ b_2  > h_{1S2} = 0,05 \Rightarrow$ коэф-т значимый        |        |                           |             |             |           |   | -0,58 ; $ b_2  > h_{1S2} = 0,05 \Rightarrow$ коэф-т значимый        |             |             |           |           |
|   | $b_3$   | 0,18 ; $ b_3  > h_{1S3} = 0,05 \Rightarrow$ коэф-т значимый         |        |                           |             |             |           |   | 0,17 ; $ b_3  > h_{1S3} = 0,05 \Rightarrow$ коэф-т значимый         |             |             |           |           |
|   | $b_{11}$  | -0,02 ; $ b_{11}  < h_{2S11} = 0,08 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |        |                           |             |             |           |   | 0 ; $ b_{11}  < h_{2S11} = 0,08 \Rightarrow$ коэф-т не значимый     |             |             |           |           |
|   | $b_{22}$  | 0,16 ; $ b_{22}  > h_{2S22} = 0,08 \Rightarrow$ коэф-т значимый     |        |                           |             |             |           |   | 0,2 ; $ b_{22}  > h_{2S22} = 0,08 \Rightarrow$ коэф-т значимый      |             |             |           |           |
|   | $b_{33}$  | 0,02 ; $ b_{33}  < h_{2S33} = 0,08 \Rightarrow$ коэф-т не значимый  |        |                           |             |             |           |   | 0,07 ; $ b_{33}  < h_{2S33} = 0,08 \Rightarrow$ коэф-т не значимый  |             |             |           |           |
|   | $b_{12}$  | -0,07 ; $ b_{12}  > h_{3S12} = 0,06 \Rightarrow$ коэф-т значимый    |        |                           |             |             |           |   | -0,06 ; $ b_{12}  > h_{3S12} = 0,06 \Rightarrow$ коэф-т значимый    |             |             |           |           |
|   | $b_{13}$  | -0,06 ; $ b_{13}  > h_{3S13} = 0,06 \Rightarrow$ коэф-т значимый    |        |                           |             |             |           |   | -0,03 ; $ b_{13}  < h_{3S13} = 0,06 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |             |             |           |           |
| $b_{23}$  | -0,09 ; $ b_{23}  > h_{3S23} = 0,06 \Rightarrow$ коэф-т значимый  |   |        |                           |             |             |           | -0,08 ; $ b_{23}  > h_{3S23} = 0,06 \Rightarrow$ коэф-т значимый  |   |             |             |           |           |
| Уравнение регрессии в нормализованных обозначениях факторов | $R_{изг,14} = 3,01 + 0,24 X_1 - 0,54 X_2 + 0,18 X_3 + 0,16 X_2^2 - 0,07 X_1 X_2 - 0,06 X_1 X_3 - 0,09 X_2 X_3$  |   |        |                           |             |             |           | $R_{изг,28} = 3,07 + 0,27 X_1 - 0,58 X_2 + 0,17 X_3 + 0,2 X_2^2 - 0,06 X_1 X_2 - 0,08 X_2 X_3$                                    |   |             |             |           |           |
| Уравнение регрессии с натуральными значениями факторов      | $R_{изг,14} = 17,7093 + 0,0588125 x_1 - 0,67806 x_2 - 0,000759549 x_1 x_2 + 0,00694444 x_2^2 + 0,162863 x_3 - 0,000403226 x_1 x_3 - 0,00241935 x_2 x_3$ |   |        |                           |             |             |           | $R_{изг,28} = 23,2076 + 0,0452288 x_1 - 0,862373 x_2 - 0,000648675 x_1 x_2 + 0,0086445 x_2^2 + 0,125118 x_3 - 0,00214607 x_2 x_3$ |   |             |             |           |           |
| F критерий  | $0,94 < F_{кр} = 2,53 \Rightarrow$ модель адекватна   |   |        |                           |             |             |           | $1,81 < F_{кр} = 2,53 \Rightarrow$ модель адекватна   |   |             |             |           |           |

Продолжение таблицы 4.2

| №<br>опыт<br>а  | Матрица  |        |        | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>   |   |             |           |           |  |
|---|----------|--------|--------|--|---|-------------|-----------|-----------|--|
|   | $X_1$    | $X_2$  | $X_3$  | $\bar{y}_1$  | $\bar{y}_2$   | $\bar{y}_3$ | $\bar{y}$ | $\bar{y}$ |  |
| 1   | 1        | 1      | 1      | 1727,07  | 1658,43   | 1767,04     | 1717,51   | 1661,82   |  |
| 2   | -1       | 1      | 1      | 1382,22  | 1452,93   | 1375,55     | 1403,57   | 1473,89   |  |
| 3   | 1        | -1     | 1      | 1954,70  | 1987,25   | 1765,01     | 1902,32   | 1931,10   |  |
| 4   | 1        | 1      | -1     | 1516,47  | 1571,31   | 1433,98     | 1507,25   | 1524,59   |  |
| 5   | -1       | -1     | -1     | 1564,06  | 1490,53   | 1561,48     | 1538,69   | 1605,93   |  |
| 6   | 1        | -1     | -1     | 1867,27  | 1858,87   | 1725,34     | 1817,16   | 1793,86   |  |
| 7   | -1       | 1      | -1     | 1370,91  | 1320,17   | 1451,93     | 1381,00   | 1336,65   |  |
| 8   | -1       | -1     | 1      | 1713,66  | 1816,94   | 1721,04     | 1750,55   | 1743,16   |  |
| 9   | 1,215    | 0      | 0      | 1783,71  | 1667,26   | 1658,95     | 1703,31   | 1748,05   |  |
| 10  | -1,215   | 0      | 0      | 1548,76  | 1532,68   | 1636,42     | 1572,62   | 1519,70   |  |
| 11  | 0        | 1,215  | 0      | 1480,75  | 1505,24   | 1427,41     | 1471,13   | 1470,29   |  |
| 12  | 0        | -1,215 | 0      | 1888,17  | 1930,52   | 1768,22     | 1862,30   | 1797,46   |  |
| 13  | 0        | 0      | 1,215  | 1661,39  | 1775,45   | 1735,30     | 1724,05   | 1717,25   |  |
| 14  | 0        | 0      | -1,215 | 1564,21  | 1562,14   | 1498,34     | 1541,56   | 1550,51   |  |
| 15  | 0        | 0      | 0      | 1625,39  | 1589,55   | 1630,37     | 1615,10   | 1633,88   |  |
| Коэффициенты уравнения регрессии                            | $a_0$    |        |        |  | 1640,75   |             |           |           |  |
|   | $b_0$    |        |        |  | 1633,88   |             |           |           |  |
|   | $b_1$    |        |        |  | 93,97 ; $ b_1  > h_{1S1} = 22,86 \Rightarrow$ коэф-т значимый         |             |           |           |  |
|   | $b_2$    |        |        |  | -134,64 ; $ b_2  > h_{1S2} = 22,86 \Rightarrow$ коэф-т значимый       |             |           |           |  |
|   | $b_3$    |        |        |  | 68,62 ; $ b_3  > h_{1S3} = 22,86 \Rightarrow$ коэф-т значимый         |             |           |           |  |
|   | $b_{11}$ |        |        |  | -8,48 ; $ b_{11}  < h_{2S11} = 36,27 \Rightarrow$ коэф-т не значимый  |             |           |           |  |
|   | $b_{22}$ |        |        |  | 11,04 ; $ b_{22}  < h_{2S22} = 36,27 \Rightarrow$ коэф-т не значимый  |             |           |           |  |
|   | $b_{33}$ |        |        |  | -11,97 ; $ b_{33}  < h_{2S33} = 36,27 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |             |           |           |  |
|   | $b_{12}$ |        |        |  | 1,24 ; $ b_{12}  < h_{3S12} = 27,38 \Rightarrow$ коэф-т не значимый   |             |           |           |  |
|   | $b_{13}$ |        |        |  | 7,62 ; $ b_{13}  < h_{3S13} = 27,38 \Rightarrow$ коэф-т не значимый   |             |           |           |  |
| $b_{23}$  |          |        |        | -8,02 ; $ b_{23}  < h_{3S23} = 27,38 \Rightarrow$ коэф-т не значимый |   |             |           |           |  |
| Уравнение регрессии в нормализованных обозначениях факторов |          |        |        | $\rho = 1633,88 + 93,97 X_1 - 134,64 X_2 + 68,62 X_3$                |   |             |           |           |  |
| Уравнение регрессии с натуральными значениями факторов      |          |        |        | $\rho = 2483,1 + 4,88664 x_1 - 27,9917 x_2 + 8,85419 x_3$            |   |             |           |           |  |
| $F$ критерий  |          |        |        | $1,25 < F_{кр} = 2,53 \Rightarrow$ модель адекватна                  |   |             |           |           |  |

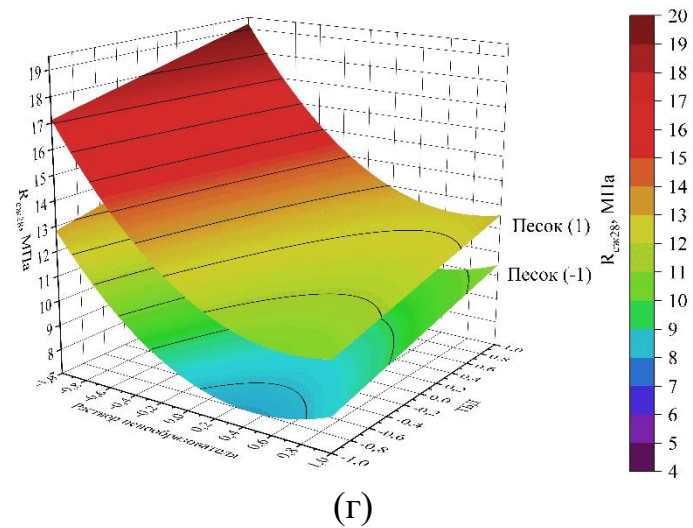
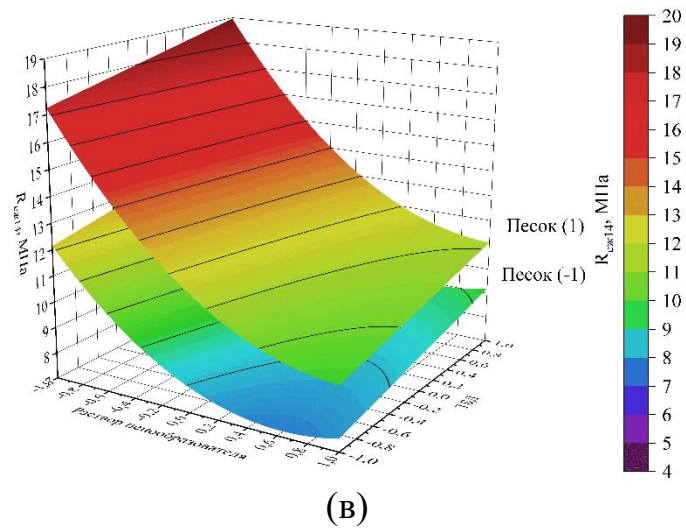
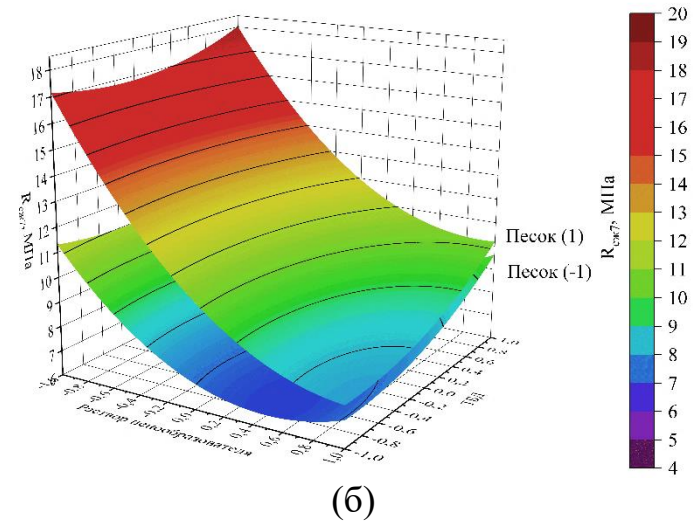
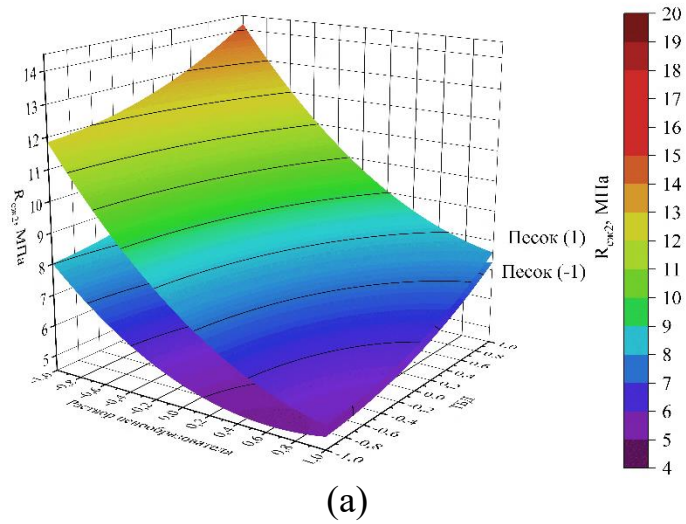


Рисунок 4.1 - Графическая интерпретация аналитических моделей зависимости прочности при сжатии баритсо-держащего пенобетона на 2 суток (а), 7 суток (б), 14 суток (в), 28 суток (г) от содержания компонентов смеси

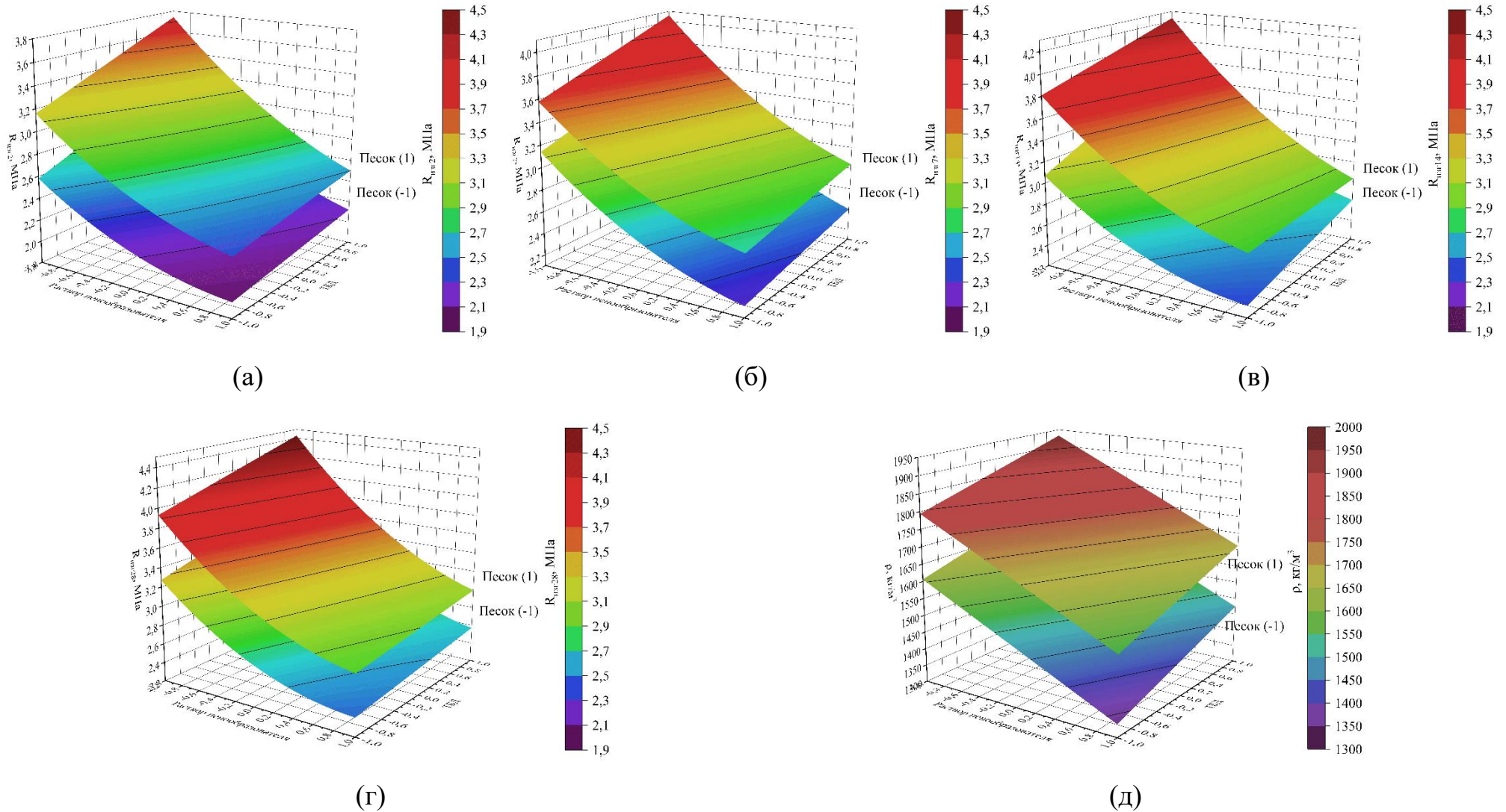


Рисунок 4.2 - Графическая интерпретация аналитических моделей зависимости прочности при изгибе баритсодержащего пенобетона на 2 сутки (а), 7 сутки (б), 14 сутки (в), 28 сутки (г) и плотности (д) от содержания компонентов смеси

По полученным аналитическим моделям можно сделать вывод, что в отличие от не поризованных составов цементно-баритового камня, введение баритовой добавки не приводит к снижению прочности баритосодержащего пенобетона. Результаты выполненных экспериментов показывают, что увеличение количества кварцевого песка и баритосодержащей добавки способствует увеличению плотности, прочности материала на сжатие и на изгиб, а увеличение количества раствора пенообразователя, приводит к снижению данных показателей [119, 120].

На графиках (рисунки 4.3, 4.4) рассмотрена динамика набора прочности образцов в возрасте от 2 до 28 суток. Указаны результаты для составов с натуральными значениями входных параметров согласно таблице 4.1. Представленные результаты показывают, что интенсивный набор прочности на сжатие протекает в первые 7 суток, а затем вплоть до 28 суток прирост прочности происходит, но менее интенсивно.

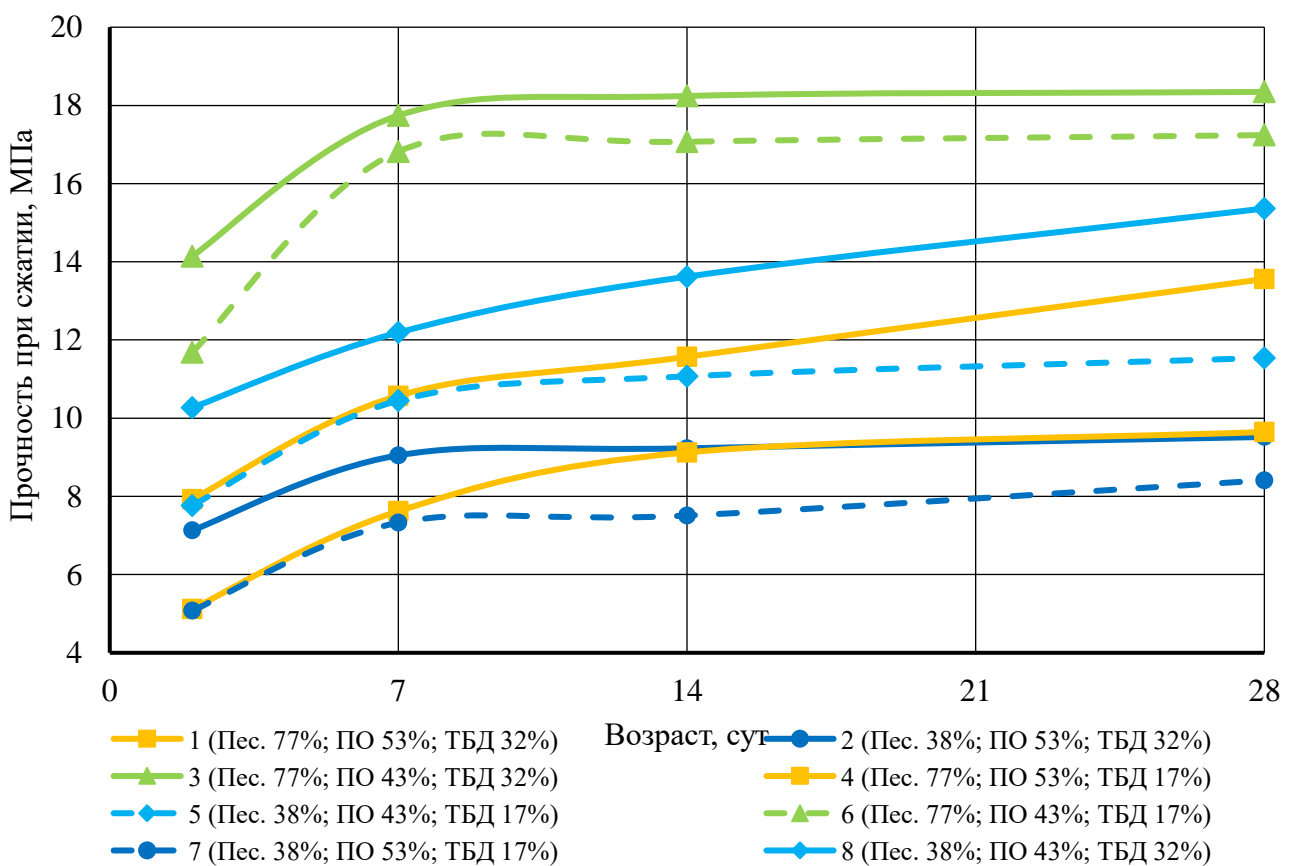


Рисунок 4.3 - Динамика набора прочности при сжатии в зависимости от возраста образца

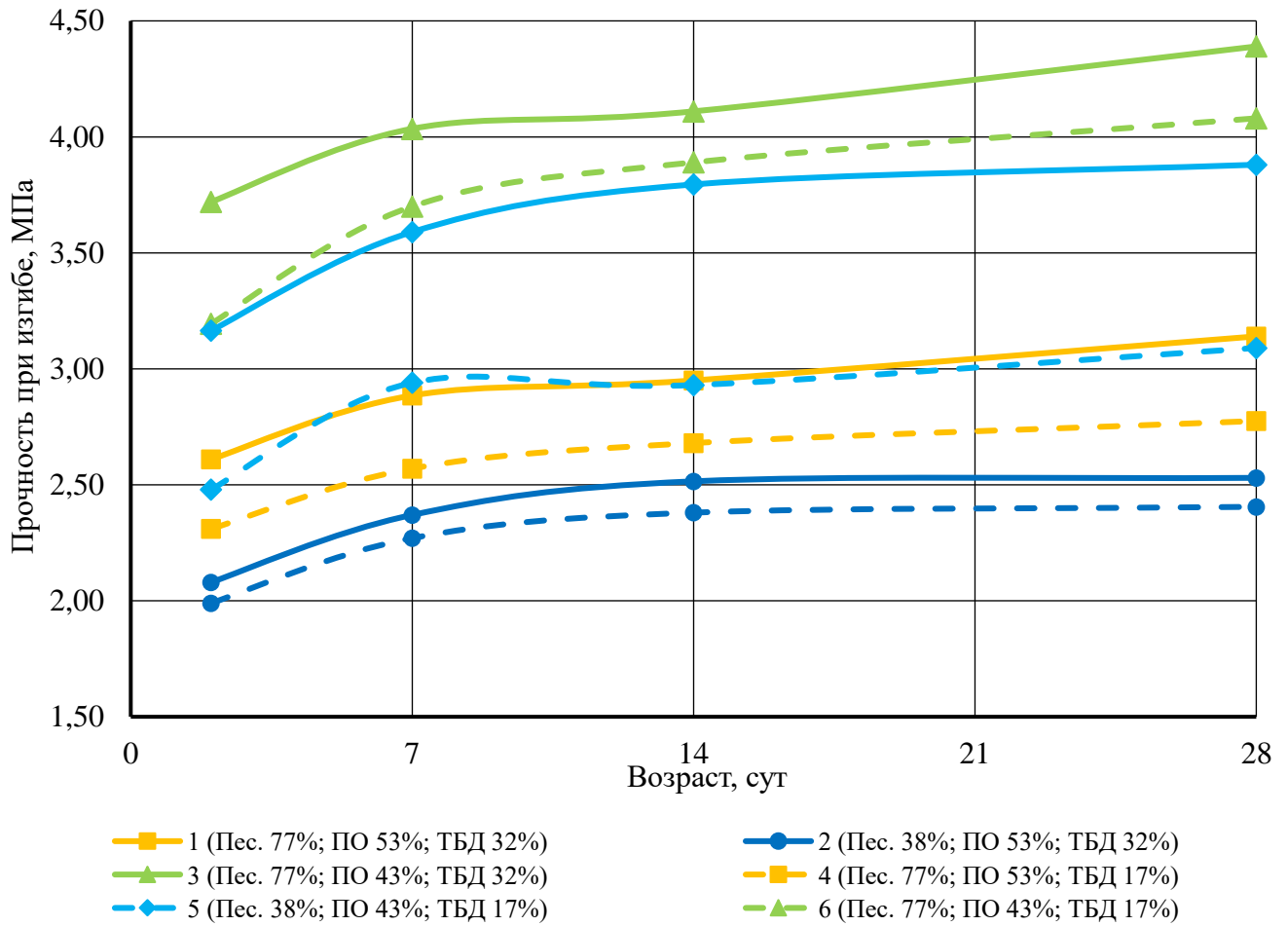


Рисунок 4.4 - Динамика набора прочности при изгибе в зависимости от возраста образца

Для установления влияния тонкости помола ТБД на свойства получаемого материала, дополнительно исследованы образцы пенобетона, составляющие ядро композиционного плана (составы №1-8) в соответствии с таблицей 4.1, с заменой ТБД с удельной поверхностью 310 м<sup>2</sup>/кг на ТБД с удельной поверхностью 830 м<sup>2</sup>/кг, а также исследованы контрольные образцы без введения ТБД.

На гистограммах представлены результаты исследования прочности образцов при сжатии (рисунок 4.5), прочности образцов при изгибе (рисунок 4.6) и плотности (рисунок 4.7) при различном содержании компонентов системы.



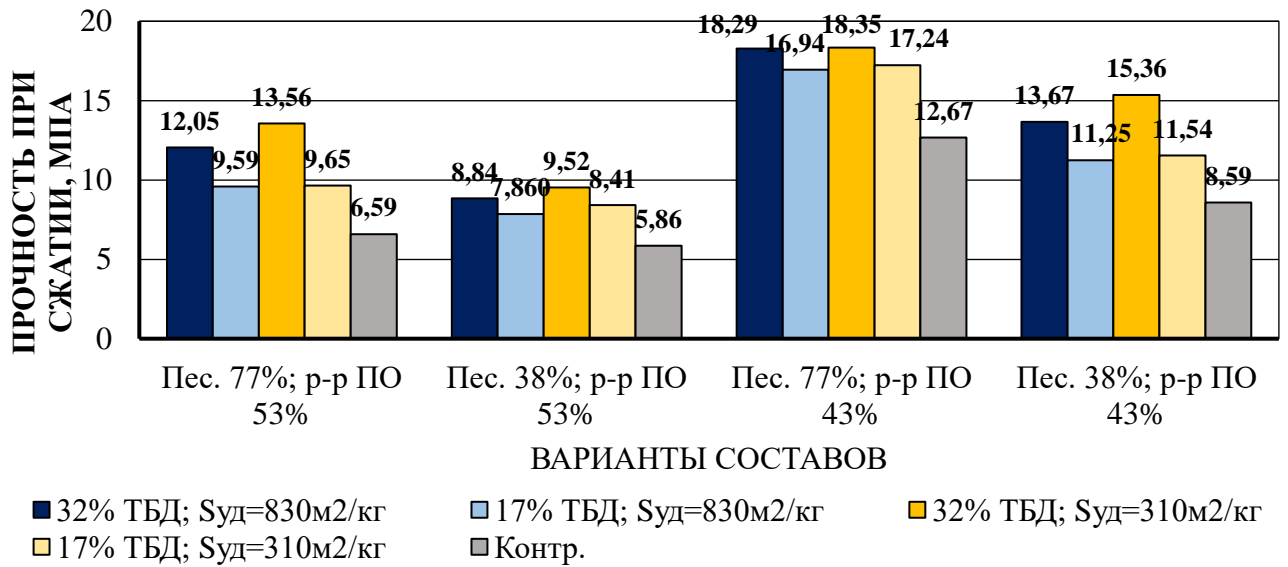


Рисунок 4.5 - Прочность исследуемых образцов на сжатие на 28 сутки

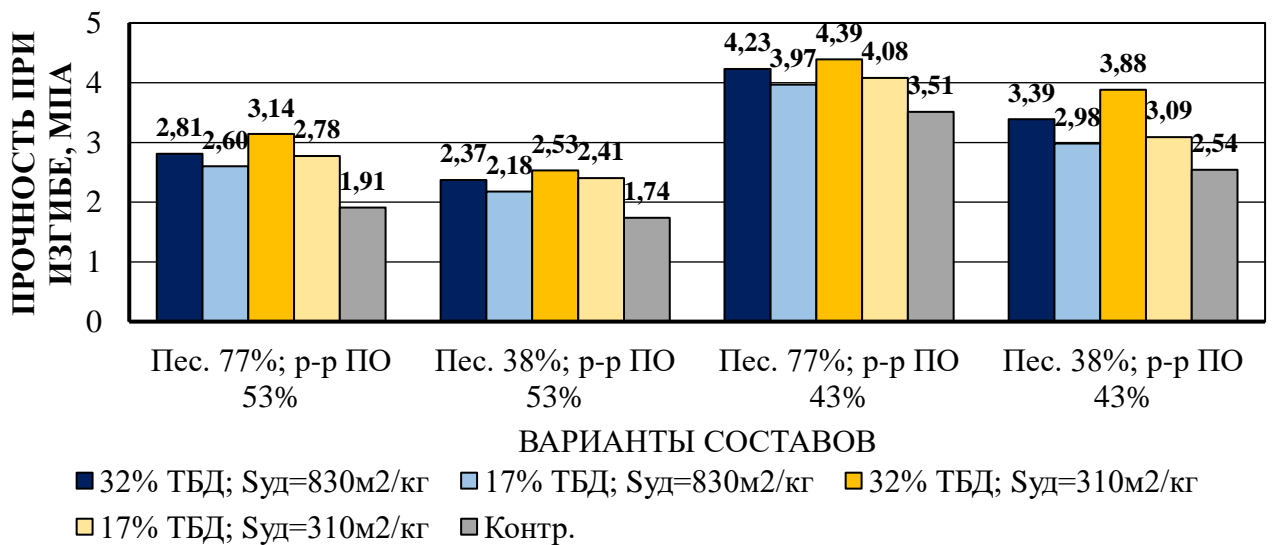


Рисунок 4.6 - Прочность исследуемых образцов при изгибе на 28 сутки

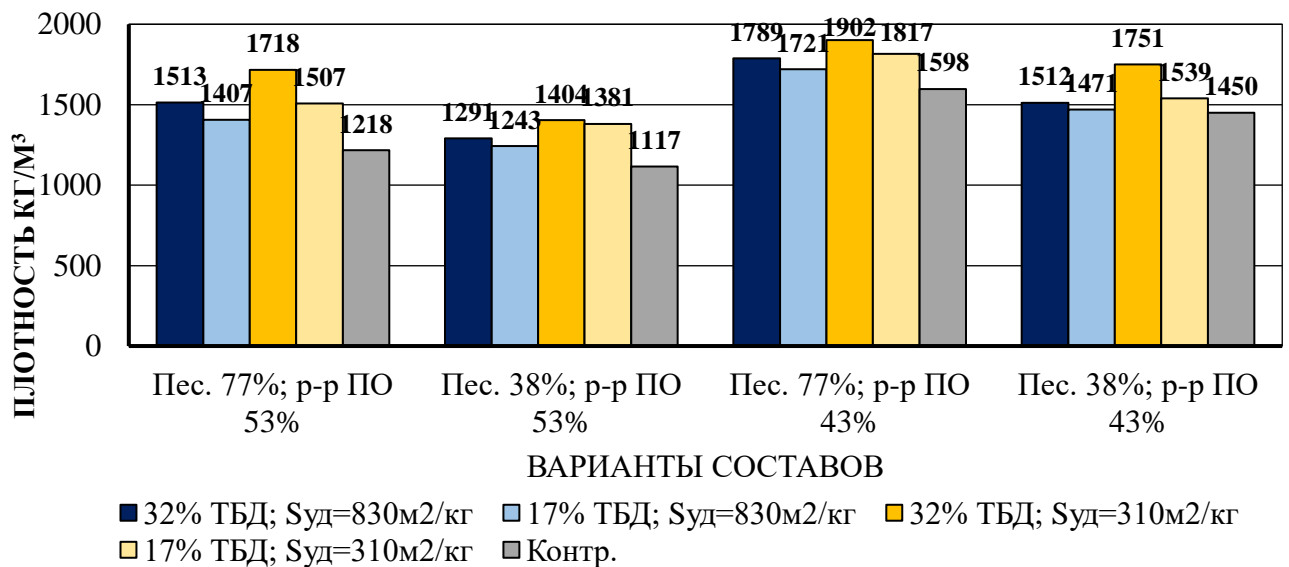


Рисунок 4.7 - Плотность исследуемых образцов на 28 сутки



Полученные данные демонстрируют, что увеличение количества баритсодержащей добавки способствует увеличению плотности пенобетона, однако при увеличении удельной поверхности ТБД наблюдается снижение плотности (рисунок 4.7). Это связано с тем, что частицы меньшего диаметра лучше встраиваются в ячейки пор не разрушая их, в то время как наличие более крупных частиц способствует более активно разрушению ячеек и схлопыванию строительной пены. Это подтверждается замером коэффициента использования пены, равного отношению объема исходной пеномассы к объему получаемой пенобетонной смеси (рисунок 4.8). При одинаковом соотношении компонентов смеси при увеличении дисперсности ТБД наблюдается увеличение коэффициента использования пены на 6-10%.

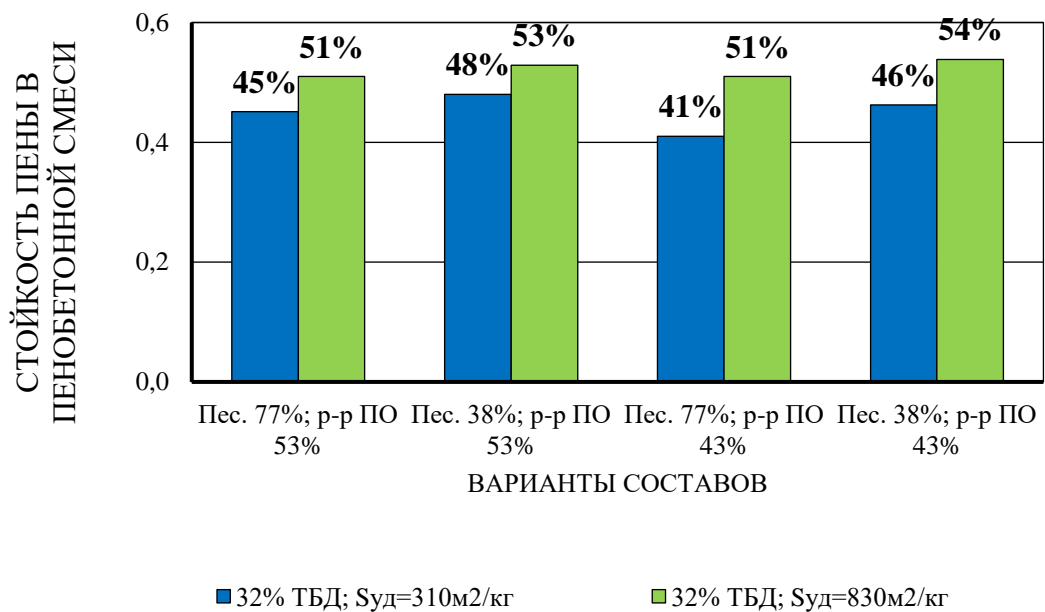


Рисунок 4.8 - Стойкость пены в пенобетонной смеси

По этой причине при увеличении количества добавки увеличивается прочность пенобетона, но при увеличении тонкости помола прочность снижается из-за снижения плотности. Однако при увеличении дисперсности добавки наблюдается рост прочности на единицу плотности (рисунок 4.9). Следовательно, при одинаковой плотности пенобетон, содержащий более тонкодисперсную добавку, обладает более высокими прочностными свойствами.

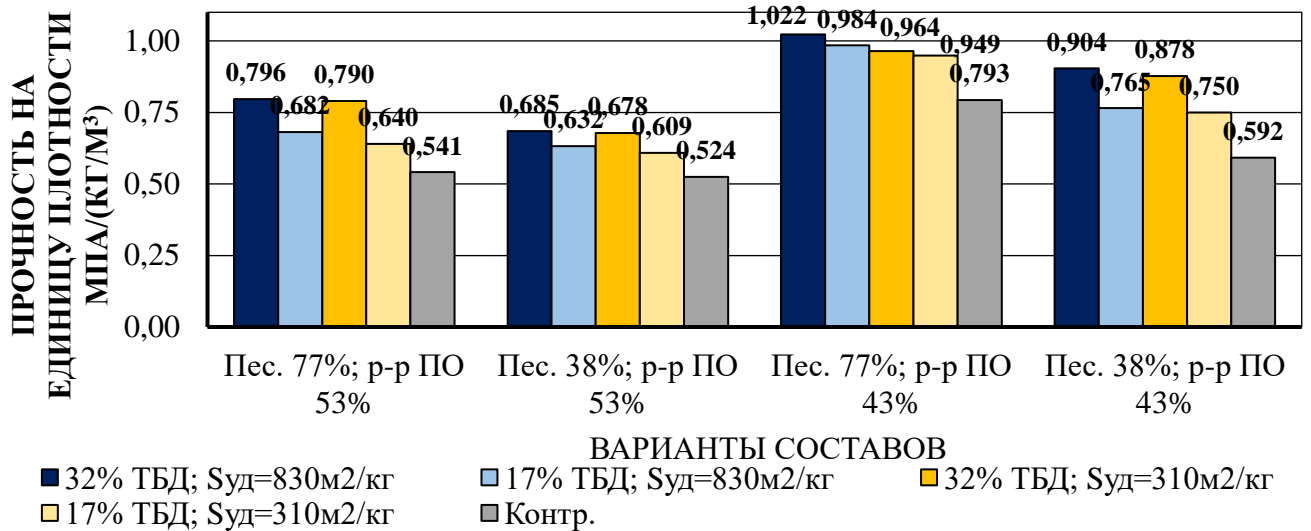


Рисунок 4.9 - Прочность образцов пенобетона на единицу плотности

По причине того, что к одной из негативных характеристик баритовых бетонов относят высокий показатель усадки, был определён показатель усадки при высыхании. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 25485-2019. Показатель усадки при высыхании  $\varepsilon$ , мм/м вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = \varepsilon_5 - \varepsilon_{35}, \quad (4.2)$$

где  $\varepsilon_5$  – значение усадки при высыхании образца от его водонасыщенного состояния до влажности 5 % по массе, мм/м;

$\varepsilon_{35}$  – значение усадки при высыхании образца от его водонасыщенного состояния до влажности 35 % по массе, мм/м;

Результаты испытания усадки при высыхании представлены в таблице 4.3. На рисунке 4.10 приведены кривые усадки при высыхании в зависимости от влажности пенобетона (по массе).

Таблица 4.3 - Показатели усадки при высыхании образцов пенобетона

| Процентное отношение компонентов системы к массе вяжущего | Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | Усадка при высыхании, мм/м |                    |               |
|---|---------------------------------------|----------------------------|--------------------|---------------|
|   |                                       | $\varepsilon_5$            | $\varepsilon_{35}$ | $\varepsilon$ |
| Пес. 77%; ПО 53%; ТБД 0%                                  | 1218                                  | 3,05                       | 0,09               | 2,96          |
| Пес. 77%; ПО 53%; ТБД 32%                                 | 1513                                  | 2,14                       | 0,05               | 2,09          |
| Пес. 38%; ПО 53%; ТБД 0%                                  | 1117                                  | 3,31                       | 0,06               | 3,25          |
| Пес. 38%; ПО 53%; ТБД 32%                                 | 1291                                  | 2,93                       | 0,17               | 2,76          |
| Пес. 77%; ПО 43%; ТБД 0%                                  | 1598                                  | 1,94                       | 0,1                | 1,84          |
| Пес. 77%; ПО 43%; ТБД 32%                                 | 1789                                  | 1,74                       | 0,07               | 1,67          |
| Пес. 38%; ПО 43%; ТБД 0%                                  | 1450                                  | 2,84                       | 0,12               | 2,72          |
| Пес. 38%; ПО 43%; ТБД 32%                                 | 1512                                  | 2,43                       | 0,1                | 2,33          |

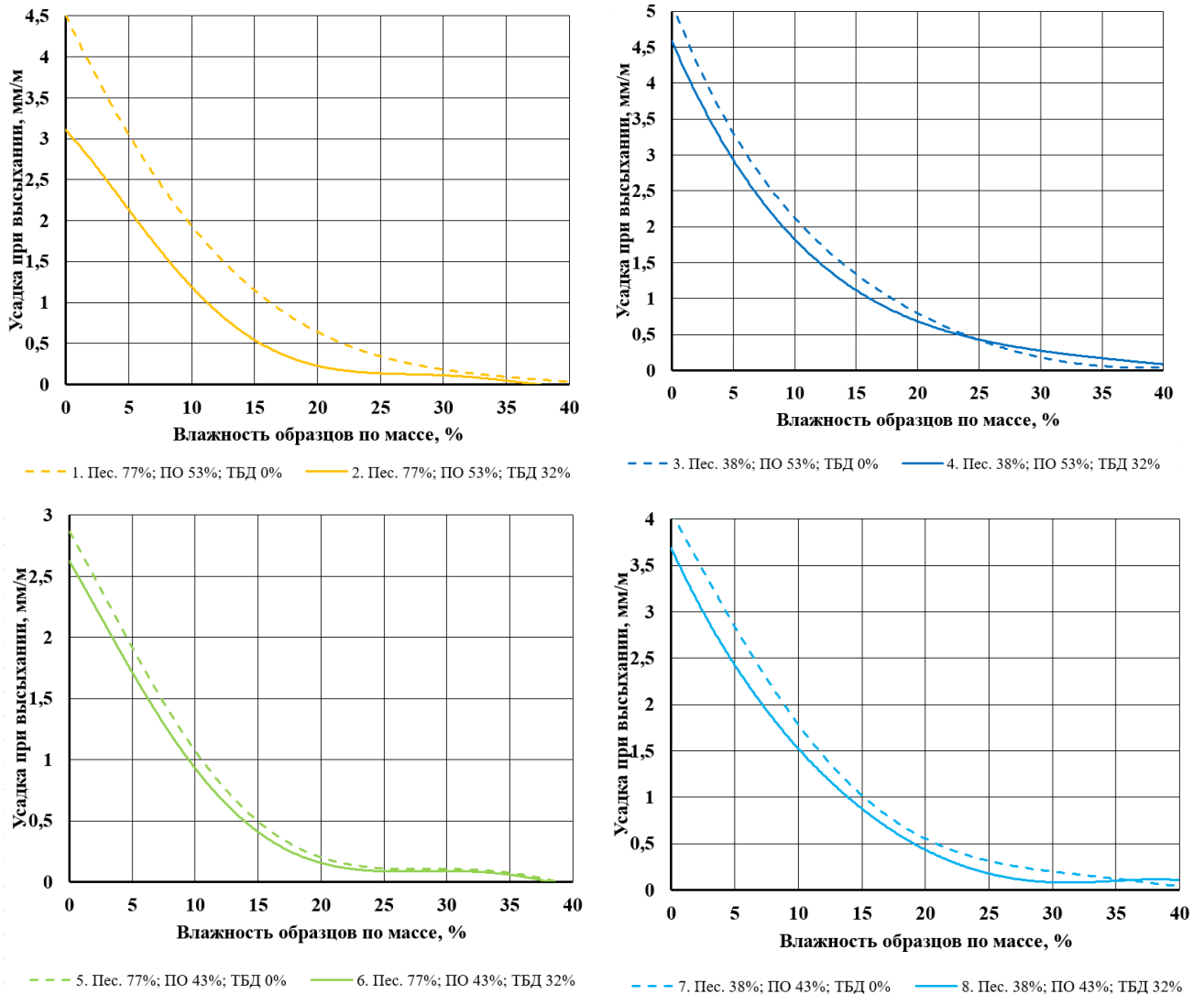


Рисунок 4.10 - Кривые усадки при высыхании образцов пенобетона

Полученные данные демонстрируют, что показатель усадки обратно пропорционален плотности пенобетона. Данное свойство основано на физическом процессе, при котором основное изменение линейных размеров образца пенобетона происходит за счет испарения содержащейся в нем свободной влаги.

Величина усадки при высыхании пенобетона, содержащего ТБД, варьируется в пределах от 1,67 до 2,76 мм/м. Эта величина зависит от конкретного состава материала, в частности от содержания в нем различных компонентов системы. Данный диапазон значений усадки находится в пределах, установленных ГОСТ 25485-

2019 для ячеистых бетонов (3 мм/м). Таким образом, с учетом проведенных исследований, установлено, что применение ТБД в составе пенобетона не ведет к превышению нормативных пределов усадки.

#### **4.2 Свойства баритсодержащего пеногазобетона вариотропной структуры**

Для получения ячеистых бетонов, с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами, предлагается использование технологии направленного формирования вариотропной ячеистой структуры бетонных изделий. Ячеистые бетоны переменной плотности характеризуются повышенными прочностными и эксплуатационными характеристиками, за счёт увеличения плотности от центральной части к граням и возможности формирования участков повышенной плотности в наиболее нагруженных зонах. При этом за счёт снижения плотности в слабо нагруженных зонах изделия удаётся добиться пониженной средней плотности изделия, что позволяет облегчить массу конструкции и обеспечить тепло- и звукоизоляционные свойства. Эта технология позволяет улучшить характеристики изделий без увеличения материалоемкости и технологических затрат [121-123].

Существуют различные способы обеспечения вариотропности структуры бетонных изделий. Существует технология, при которой бетонные смеси с различной плотностью укладываются послойно, для формирования единого материала, состоящего из нескольких слоёв, где каждый слой выполняет отдельную функцию: защитную, теплоизоляционную и несущую [124, 125]. Однако более технологичным является решение, предлагающее обеспечение вариотропности за счёт введение в состав бетонной смеси газообразователя и укладки в специальные перфорированные формы [126, 127].

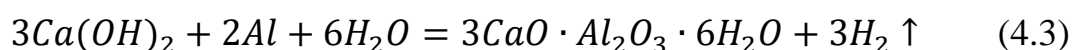
Один из наиболее существенных вопросов, связанных с производством вариотропного материала, заключается в принципах управления процессом создания

желаемой ячеистой структуры. Для этого используются различные способы, включая изменение температуры, воздействие вибрацией и добавление различных добавок, запускающих процесс газообразования [128].

Для получения конструкционно-теплоизоляционных изделий на основе ячеистых бетонов с вариотропной структурой был разработан метод, основанный на технологии производства пено- и газобетонов. Для этого была использована формовочная смесь, состоящая из мелкого заполнителя, пенообразователя, цементного вяжущего, газообразователя, воды и регуляторов процессов газообразования. Этот метод позволяет обеспечить формирование вариотропных ячеистых бетонов с заданными структурой и свойствами.

Для получения пеногазобетонных блоков с вариотропной структурой (рисунок 4.11) необходимо обеспечить специальную подготовку опалубочной формы. Форма должна иметь перфорационные отверстия различной конфигурации и размера через которые будет происходить газовыделение. Затем необходимо разработать композицию пеногазобетона, которая будет содержать определенные добавки для создания пористой структуры внутри блоков. Это могут быть добавки, ускоряющие процесс затвердевания бетона, или газообразующие добавки. Бетонная смесь заливается в перфорированную форму, где она затвердевает. Затем блок вынимается из формы и проходит дополнительную обработку, если это необходимо, например, шлифовку или обработку поверхности.

Процесс газообразования происходит за счёт реакции происходящей при взаимодействии цемента с алюминием (4.2), одним из продуктов которой является газ водород.



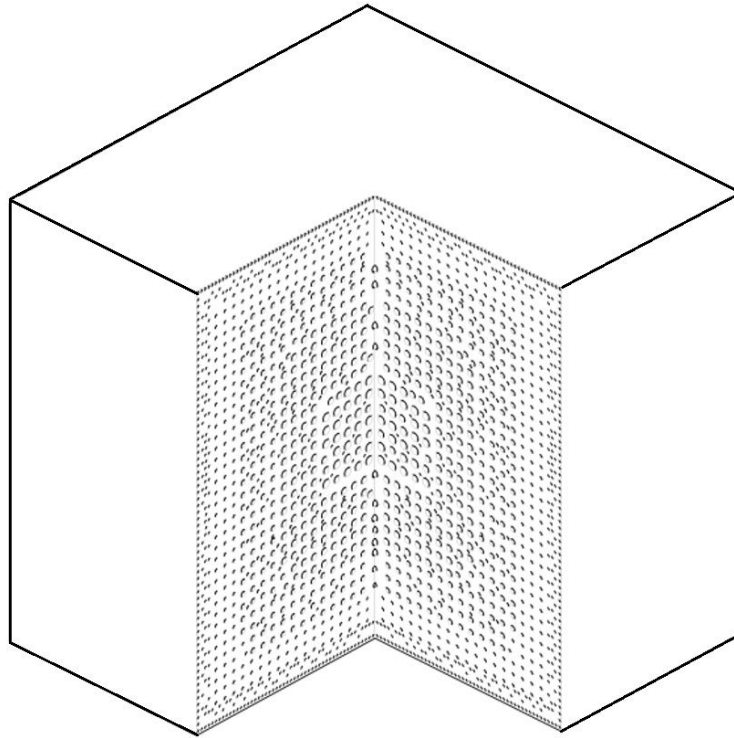


Рисунок 4.11 - Характер распределения пор вариотропного ячеистого бетона

Варьирование свойств производится за счёт изменения коэффициента перфорации ( $K_{\text{перф.}}$ ), т.е. отношения площади отверстий к площади поверхности формы и за счёт процента заполнения формы бетонной смесью ( $K_3$ ).

Коэффициент перфорации формы ( $K_{\text{перф.}}$ ) вычислялся как отношение площади отверстий к площади поверхности формы:  $K_{\text{перф.}} = \frac{S_{\text{отв.}} \cdot n}{a \cdot b}$ ,

где  $S_{\text{отв.}}$  – площадь одного отверстия,  $n$  – количество отверстий на одной вертикальной грани,  $a$ ,  $b$  – размеры вертикальной грани.

Коэффициент заполнения формы определяется по формуле  $K_3 = K_1/K_2$ , где  $K_1$  – объем формовочной смеси,  $K_2$  – объем формы.

Для изготовления образцов вариотропных пеногазобетонов в состав подобранных ранее моноотропных пенобетонов вводятся газообразователь в виде алюминиевой пудры и фтористый натрий для регулирования скорости реакции.

Существующие исследования показывают, что оптимальным для ускорения процессов начала и окончания газообразования является соотношением алюминиевой пудры и фтористого натрия является  $\text{Al}:\text{NaF} = 1:1$  [126, 129].

Было изготовлено 2 вида форм размером 10x10x10 см с различными коэффициентами перфорации (рисунок 4.12).

Форма №1 содержит по одной вертикальной стороне  $n=25$  отверстий диаметром  $d=2$  мм на расстоянии 20 мм друг от друга и  $n=75$  отверстий диаметром  $d=1$  мм на расстоянии 10 мм друг от друга.  $K_{\text{перф.}} = 0,0137$

Форма №2 содержит по одной вертикальной стороне  $n=25$  отверстий диаметром  $d=0,5$  мм на расстоянии 20 мм друг от друга и  $n=75$  отверстий диаметром  $d=1$  мм на расстоянии 10 мм друг от друга.  $K_{\text{перф.}} = 0,0064$

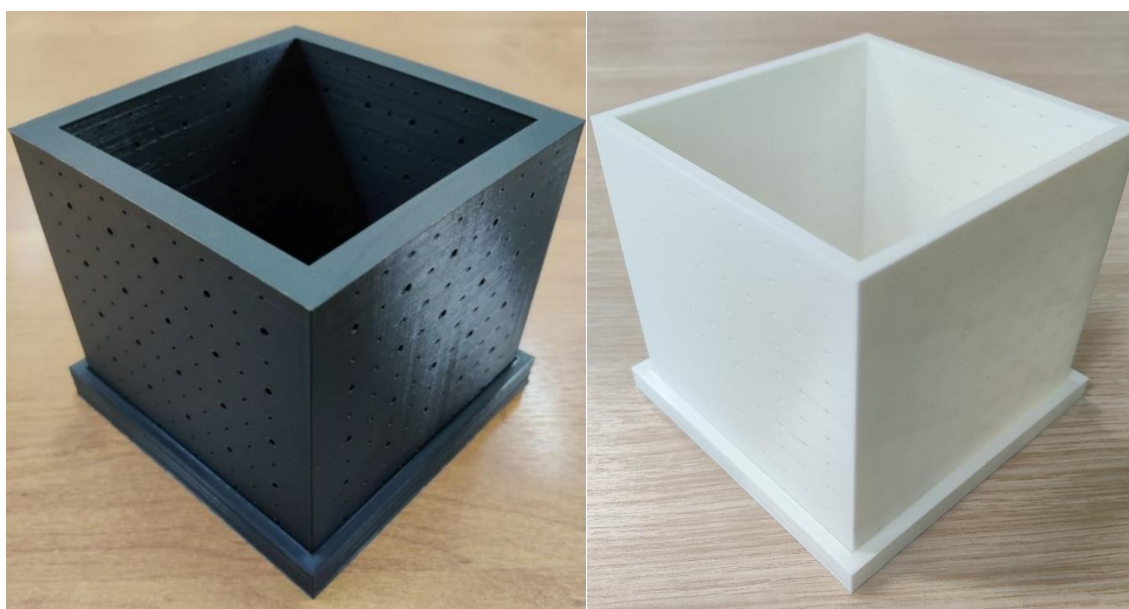


Рисунок 4.12 - Перфорированные формы, распечатанные на 3D принтере

На основании полученных ранее свойств баритсодержащих пенобетонов мотротропной структуры, был определен состав, для получения образцов пеногазобетона вариотропной структуры (табл. 4.4).

Таблица 4.4 - Состав исследованных образцов

| Цемент,<br>г | Песок,<br>г | Вода,<br>мл | ПО, мл | ТБД, г | ПАП-<br>1, г | NaF, г |
|--------------|-------------|-------------|--------|--------|--------------|--------|
| 2080         | 800         | 873         | 27     | 343,2  | 10,4         | 10,4   |

Измерялись показатели плотности образца в различных точках сечения (рисунок 4.13) для определения изменения показателей от периферии к центру, а также измерялись средняя плотность и прочность изделия (рисунок 4.14).

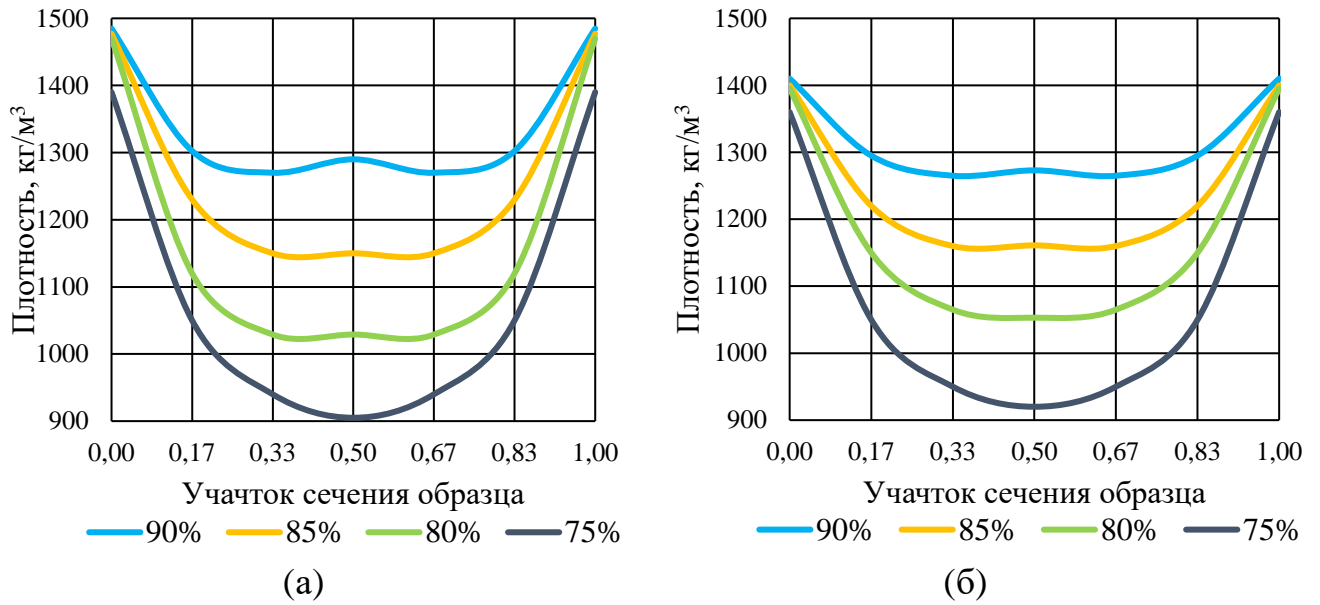


Рисунок 4.13- Распределение плотности пеногазобетона в различных участках сечения при коэффициенте перфорации  $K_{перф.} = 0,0137$  (а) и  $K_{перф.} = 0,0064$  (б)

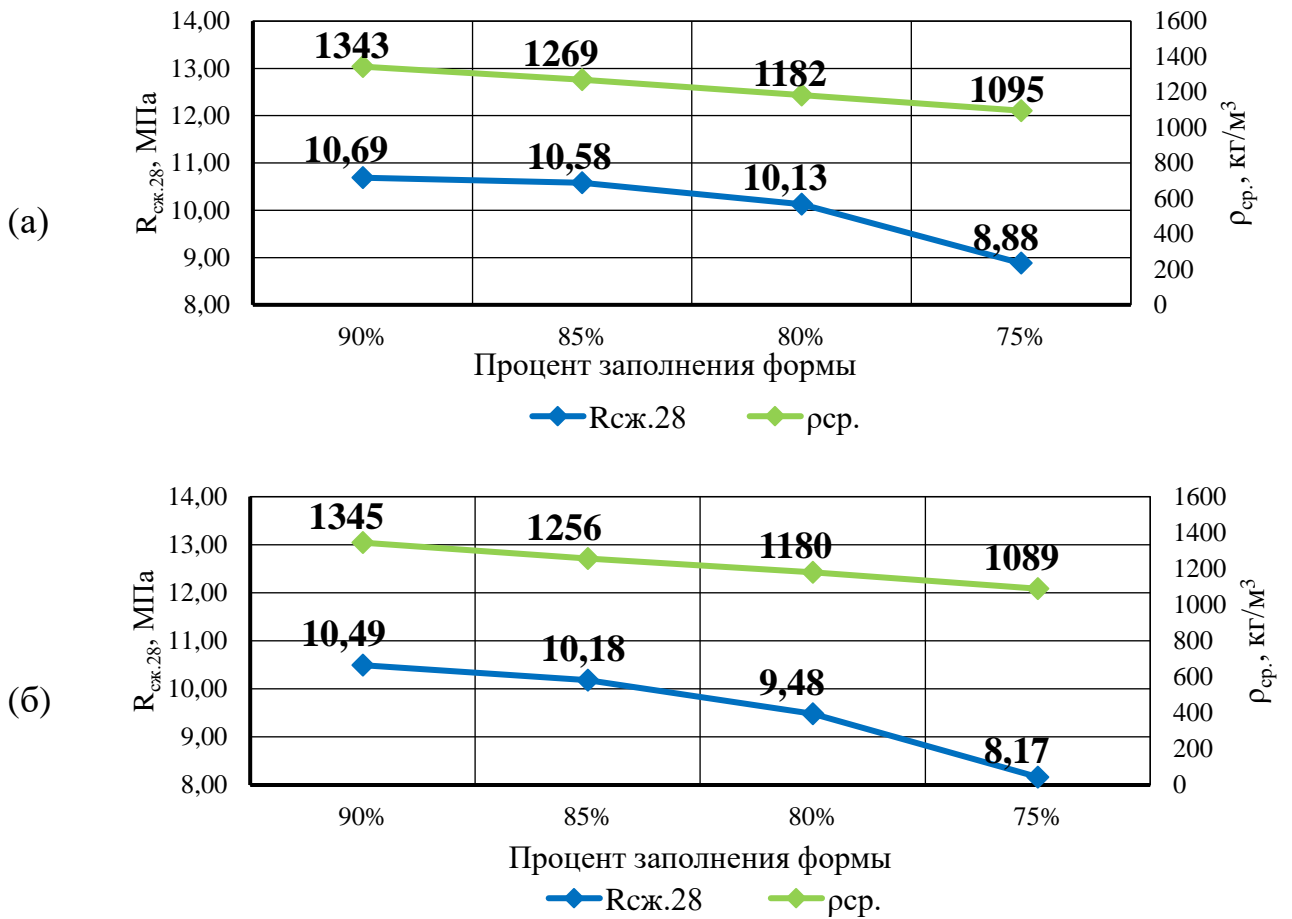


Рисунок 4.14 - Зависимость средней плотности и прочности изделия от процента заполнения формы при коэффициенте перфорации  $K_{перф.} = 0,0137$  (а) и  $K_{перф.} = 0,0064$  (б)



Установлено, что при снижении процента заполнения формы плотность у краёв образца изменяется незначительно, наибольшее изменение плотности происходит за счёт разуплотнения в центральной зоне. При увеличении коэффициента перфорации происходит увеличение плотности у краёв образца, при этом средняя плотность остаётся неизменной. Благодаря этому уплотнению стенок образца повышается прочность изделия поскольку участки повышенной плотности по краям сечения формируют зоны, способные воспринимать повышенные нагрузки.

Для оценки эффективности формирования вариотропной структуры рассчитан показатель прочности на единицу плотности исследуемых образцов (рисунок 4.15). Эффективное снижение средней плотности возможно при заполнении формы не меньше, чем на 80%, поскольку при дальнейшем снижении, в системе оказывается недостаточно энергии для полного заполнения объёма за счёт газообразования и происходит расслоение структуры. Для дальнейших исследований выбран образец, полученный при  $K_z = 0,8$  и  $K_{перф} = 0,0137$ , соответствующий марке ячеистых бетонов по плотности D1200 и обладающий наилучшим показателем прочности на единицу плотности.

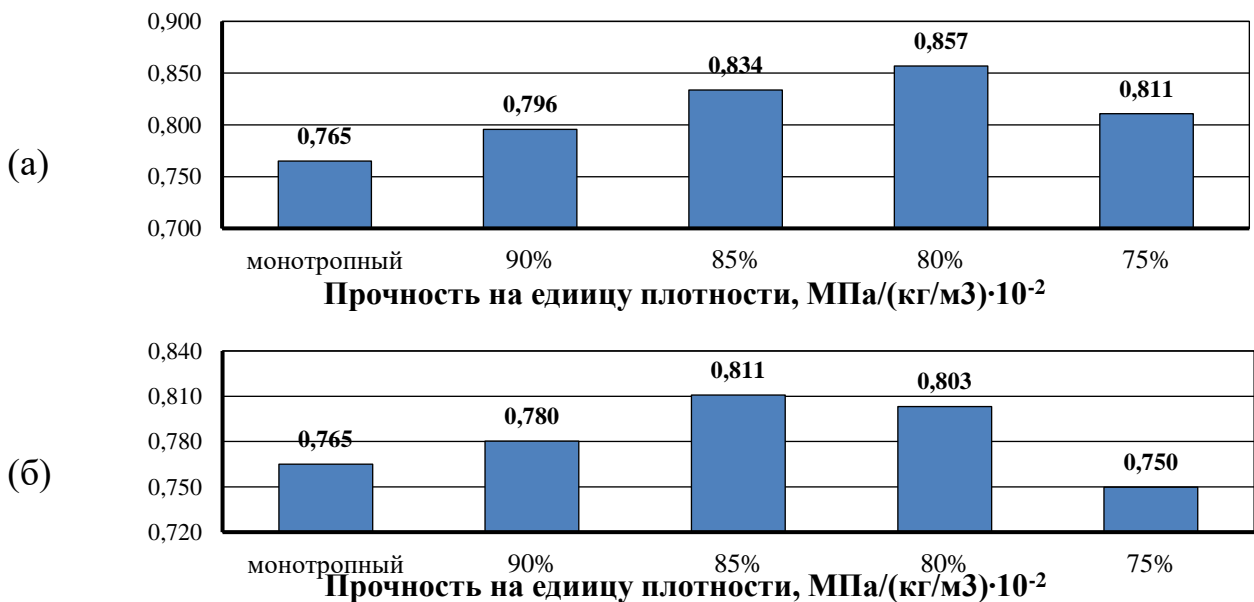


Рисунок 4.15 - Зависимость прочности на единицу плотности изделия от процента заполнения формы при коэффициенте перфорации  $K_{перф.} = 0,0137$  (а) и  $K_{перф.} = 0,0064$  (б)

Для полученного баритсодержащего пеногазобетона был определён коэффициент теплопроводности в различных участках сечения образца, а также средний коэффициент теплопроводности изделия (рисунок 4.16).

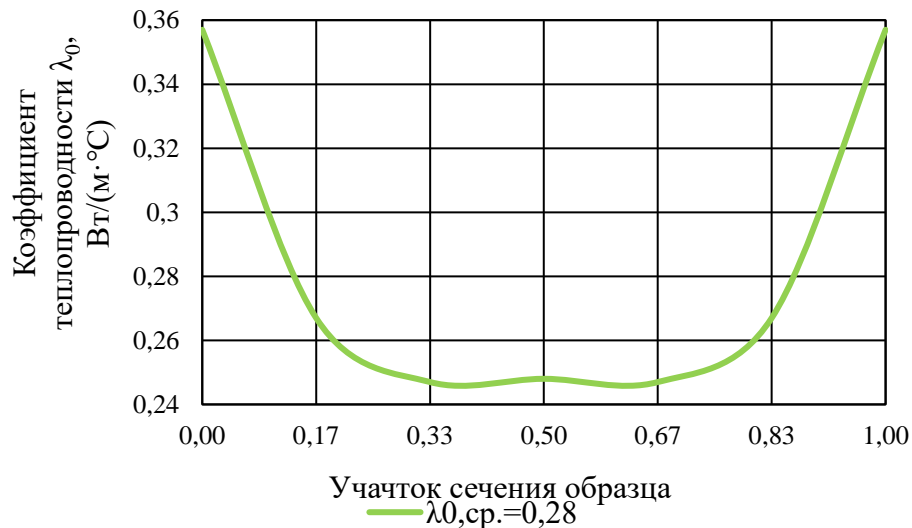


Рисунок 4.16 - Значение коэффициента теплопроводности в различных участках сечения

Результаты исследования показали, что средний показатель теплопроводности баритсодержащего пеногазобетона с вариотропной структурой составляет 0,28 Вт/(м·°С). Это значение соответствует требованиям, предъявляемым ГОСТ 25485-2019 к конструкционно-теплоизоляционным ячеистым бетонам. Данное заключение позволяет рассматривать данный материал как подходящий для использования в качестве полифункционального конструкционно-теплоизоляционного изделия.

### 4.3 Макро и микроструктура баритсодержащего пеногазобетона

На микроуровне структура матрицы оптимально совмещает в себе компоненты граничащих материалов, таких как кристаллогидраты цементных минералов и инертной тонкомолотой добавки баритового концентрата.

При изохорном процессе газообразования, который происходит внутри перфорированных форм, имеет место перенос частиц твердой фазы. Это означает, что

частицы тонкомолотой баритсодержащей добавки (ТБД), обладающие наименьшей удельной поверхностью, под воздействием газового давления смещаются в направлении перфораций.

Такой процесс обеспечивает эффективное распределение частиц ТБД в структуре бетона. Благодаря этому, у стенок изделия наблюдается более высокая концентрация ТБД, в отличие от центральных областей образца. Этот процесс улучшает свойства бетона, повышая его эксплуатационные свойства.

Для получения объективной картины распределения бария в структуре образцов, был проведен качественный анализ методом рентгеновской флуоресценции. Спектры рентгеновской флуоресценции (рисунок 4.17) указывают на то, что концентрация бария у стенок образца значительно выше, чем в его центральных областях. Это согласуется с теоретическими представлениями о механизмах перераспределения твердых частиц при газообразовании.

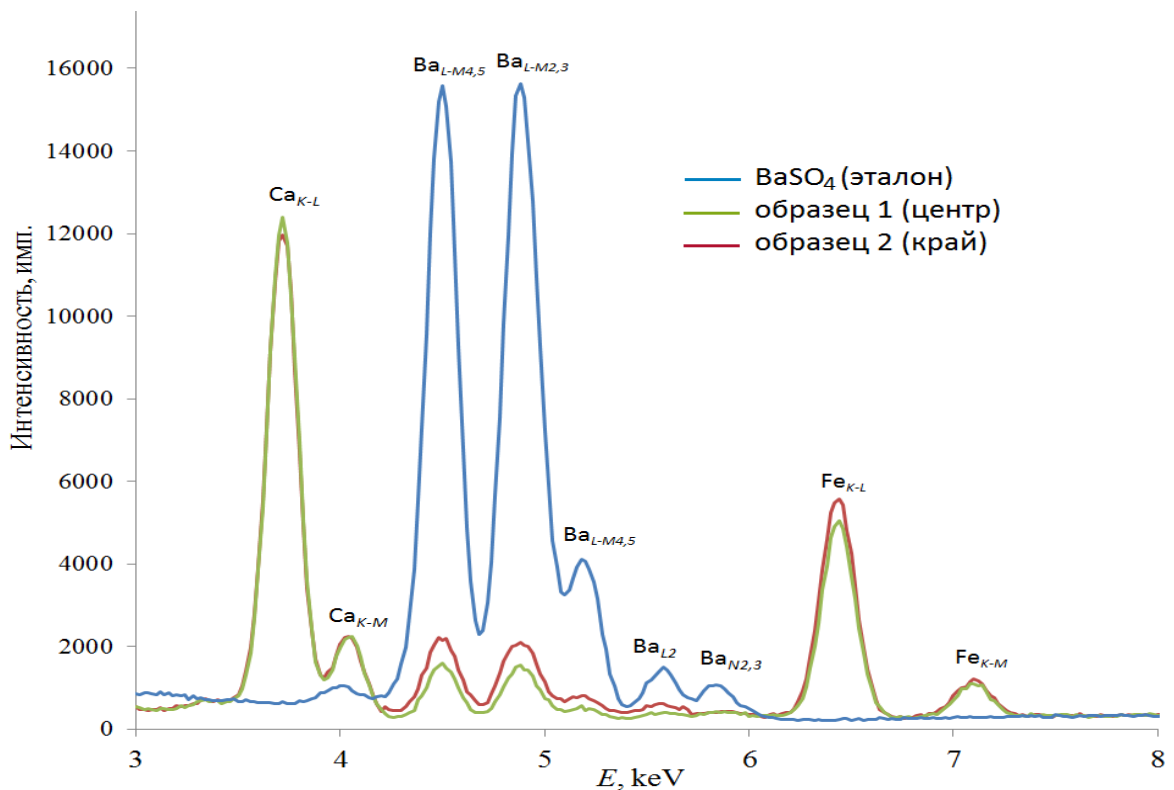


Рисунок 4.17 - Спектры рентгеновской флуоресценции стенок и центрального участка баритсодержащего пеногазоблока вариотропной ячеистой структуры

Процесс структурообразования пеногазобетонов на макроуровне связан с образованием пористой структуры в материале. Когда порошок алюминия добавляется в смесь цемента и воды, он реагирует с гидроксидом кальция, который образуется в процессе гидратации цемента, и выделяет газообразный водород. Этот газ растворяется в жидкой фазе смеси, и при выходе из нее образует множество пустот, которые создают пористую структуру пеногазобетона. Однако при протекании данной реакции в закрытых перфорированных формах формируется неравномерная поровая структура изделия из баритсодержащего пеногазобетона.

Поскольку распределение пор внутри структуры изделия оказывает значительное влияние на его характеристики был изучен характер формирования поровой структуры на макроуровне. Полученный образец пеногазобетона изучался при помощи оптической микроскопии (рисунок 4.18) и электронной сканирующей микроскопии (рисунок 4.19). По полученным микрофотографиям было исследовано распределение пор по поверхности образца.

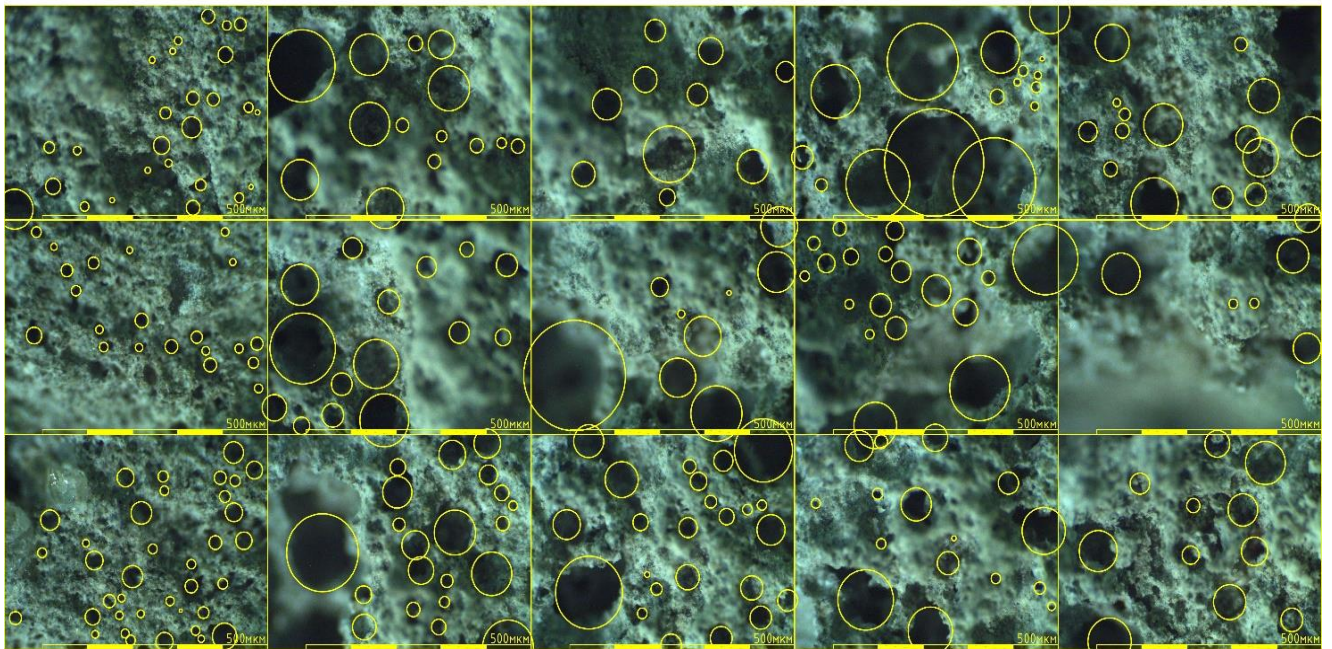


Рисунок 4.18 - Характер распределения пор в образце пеногазобетона от грани образца (участок 1, слева) к середине (участок 5, справа)

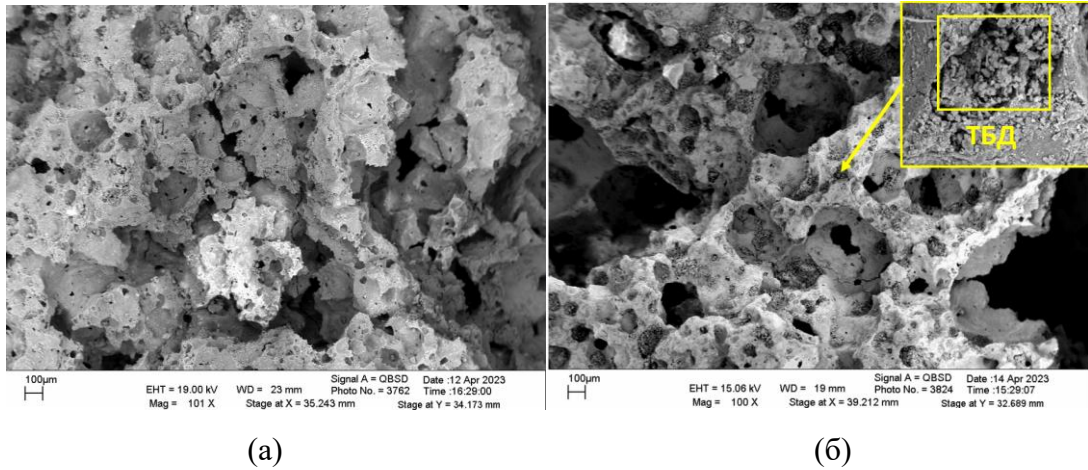


Рисунок 4.19 - Электронная микрофотография края блока (а) и середины блока (б) при 100 кратном увеличении

Согласно полученным микрофотографиям, проведен анализ распределения пор в структуре пеногазобетонного образца. Образец был разделен на пять равномерно распределенных участков, начиная от периферии (участок 1) до центра образца (участок 5).

Количественные данные о распределении пор различного диаметра в структуре пеногазобетона представлены в таблице 4.5 и на рисунке 4.20. Результаты определения открытой и закрытой пористости по ГОСТ 12730.4-2020 представлены на рисунке 4.21.

Таблица 4.5 - Количественное распределение пор в структуре пеногазобетона от грани (участок 1) к центру образца (участок 5)

| Интервал диаметров, мкм | Средний диаметр пор, мкм | № участка |     |     |     |    |
|-------------------------|--------------------------|-----------|-----|-----|-----|----|
|                         |                          | 1         | 2   | 3   | 4   | 5  |
| 0-100                   | 50                       | 133       | 10  | 7   | 10  | 1  |
| 100-200                 | 150                      | 161       | 70  | 43  | 41  | 27 |
| 200-300                 | 250                      | 34        | 28  | 33  | 23  | 20 |
| 300-400                 | 350                      | 2         | 21  | 17  | 12  | 15 |
| 400-500                 | 450                      | 0         | 16  | 11  | 8   | 12 |
| 500-600                 | 550                      | 0         | 12  | 8   | 6   | 3  |
| 600-700                 | 650                      | 0         | 8   | 7   | 4   | 0  |
| 700-800                 | 750                      | 0         | 3   | 6   | 3   | 0  |
| 800-900                 | 850                      | 0         | 2   | 2   | 3   | 0  |
| 900-1000                | 950                      | 0         | 0   | 0   | 2   | 0  |
| 1000-1100               | 1050                     | 0         | 0   | 0   | 2   | 0  |
| 1100-1200               | 1150                     | 0         | 0   | 0   | 2   | 0  |
| 1200-1300               | 1250                     | 0         | 0   | 0   | 2   | 0  |
| $\sum n_i$              |                          | 330       | 170 | 134 | 119 | 78 |



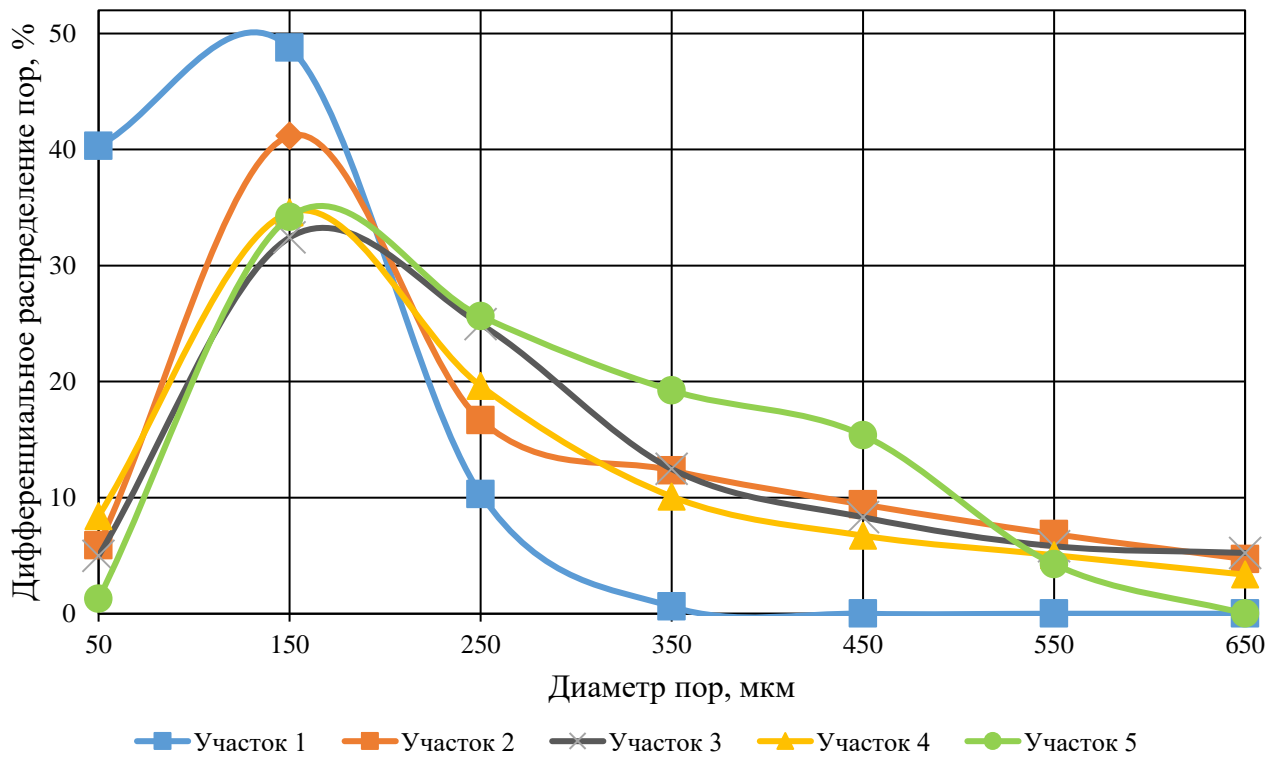


Рисунок 4.20 - Количественное распределение пор в структуре пеногазобетона от грани (участок 1) к центру образца (участок 5)

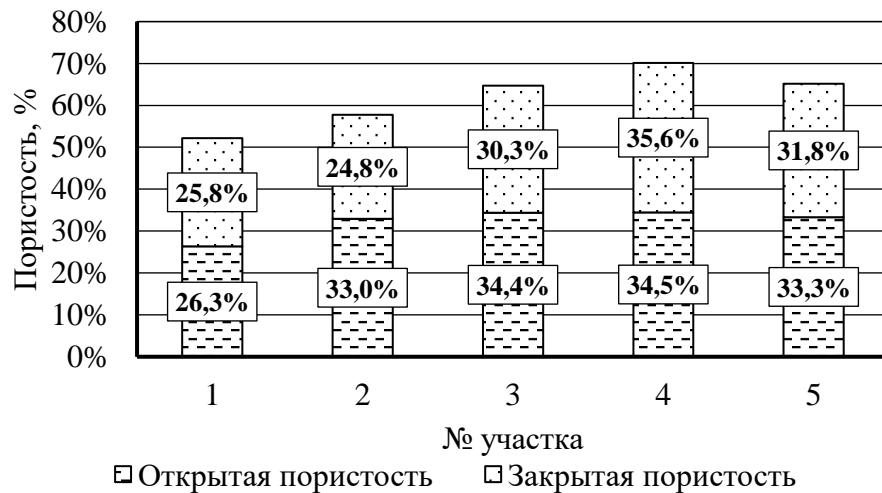


Рисунок 4.21 - Открытая и закрытая пористость пеногазобетона в участках от периферии (участок 1) к центру (участок 5)

По полученным данным видно, что для участка, расположенного ближе к периферии образца, характерно наличие высокой концентрации мелких пор. Это свидетельствует о высокой плотности этого слоя. При переходе к центральным областям образца

наблюдается тенденция к уменьшению количества мелких пор и увеличению количества более крупных открытых и закрытых пор. Для участка, расположенного в самом центре образца, свойственно небольшое снижение пористости, что объясняется изменением динамики газообразования при переходе от периферии к центру.

Для каждого из участков были определены среднемассовые и среднечисленные диаметры пор, а также оценена степень полидисперсности. Данная характеристика позволяет определить установить процентное содержание пор с определенным интервалом размеров [130].

Для получения дифференциальной кривой численного распределения по оси ординат откладывают отношения  $\Delta Q_{ni}/\Delta d_i$ . Значение численного содержания каждой фракции в процентах вычисляют по формуле:

$$\Delta Q_{ni} = \frac{n_i}{\sum n_i} \cdot 100 = f_{ni} \cdot 100 \quad (4.4)$$

Для построения дифференциальной кривой массового распределения по размерам по оси ординат наносят, соответственно,  $\Delta Q_{wi}/\Delta d_i$ . Значения массового и поверхностного содержания фракций в процентах рассчитывают по формуле:

$$\Delta Q_{wi} = \frac{n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^3} \cdot 100 = f_{wi} \cdot 100 \quad (4.5)$$

Степень полидисперсности определяется по формуле:

$$\Pi = \frac{\overline{d_n}}{\overline{d_w}} = \frac{\sum f_{ni} d_i}{\sum f_{wi} d_i} \quad (4.6)$$

Расчётные данные для определения численного и массового распределения пор представлены в таблицах 4.6-4.10. Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рисунках 4.22-4.27.

Таблица 4.6 - Расчёт численного и массового распределения пор в участке 1

| Участок 1   |  |  |   |   |                   |  |   |  |                                 |              |   |              |
|-------------|--|--|---|---|-------------------|--|---|--|---------------------------------|--------------|---|--------------|
| $d_i$ , мкм | Количество пор диаметра $d_i$ , $n_i$ , шт | Относительное содержание пор диаметра $d_i$ , $\Delta Q_n$ , % | Интегральное распределение пор, $Q_n$ , % | Численное распределение пор $\Delta Q_n/\Delta d$ , %/мкм | $n_i d_i^3$       | Относительное массовое содержание пор диаметра | Интегральное массовое распределение пор, $Q_{wi}$ , % | Объёмное распределение пор $\Delta Q_w/\Delta d$ , %/мкм | $f_{ni} = \frac{n_i}{\sum n_i}$ | $f_{ni} d_i$ | $f_{wi} = \frac{n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^3}$ | $f_{wi} d_i$ |
| 50          | 133  | 40   | 40  | 0,806   | $1,7 \times 10^7$ | 1,41   | 1,41  | 0,028  | 0,40                            | 20,15        | 0,01  | 0,71         |
| 150         | 161  | 49   | 89  | 0,488   | $5,4 \times 10^8$ | 46,17  | 47,58   | 0,462  | 0,49                            | 73,18        | 0,46  | 69,25        |
| 250         | 34   | 10   | 99  | 0,103   | $5,3 \times 10^8$ | 45,14  | 92,71   | 0,451  | 0,10                            | 25,76        | 0,45  | 112,84       |
| 350         | 2  | 1  | 100                                       | 0,006   | $8,6 \times 10^7$ | 7,29   | 100,00  | 0,073  | 0,01                            | 2,12         | 0,07  | 25,50        |
| $\Sigma$    |  |  |   |   | $1,2 \times 10^9$ |  |   |  |                                 | 121,21       |   | 208,29       |

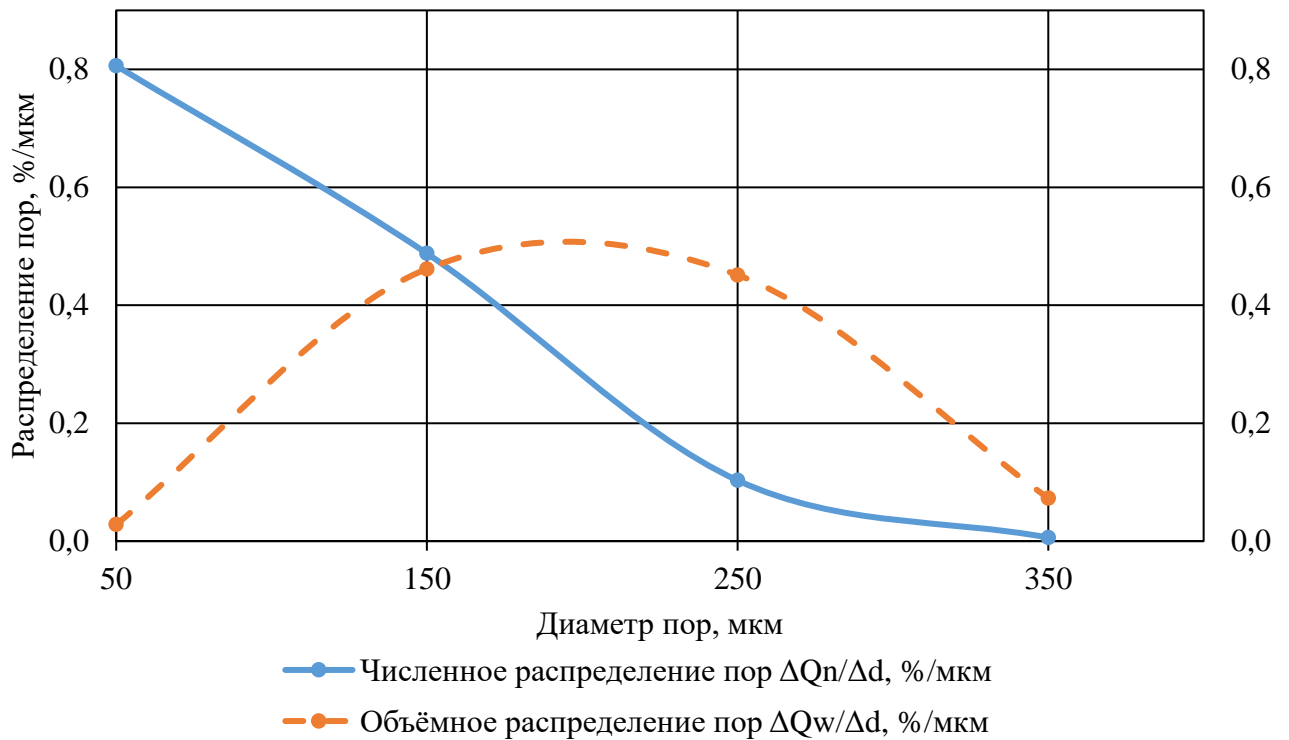


Рисунок 4.22 - Численное и массовое распределения пор в участке 1



Таблица 4.7 - Расчёт численного и массового распределения пор в участке 2

| Участок 2   |  |  |   |   |                   |  |   |  |                                 |              |   |              |
|-------------|--|--|---|---|-------------------|--|---|--|---------------------------------|--------------|---|--------------|
| $d_i$ , мкм | Количество пор диаметра $d_i$ , $n_i$ , шт | Относительное содержание пор диаметра $d_i$ , $\Delta Q_n$ , % | Интегральное распределение пор, $Q_n$ , % | Численное распределение пор $\Delta Q_n/\Delta d$ , %/мкм | $n_i d_i^3$       | Относительное массовое содержание пор диаметра $d_i$ , $\Delta Q_{wi}$ , % | Интегральное массовое распределение пор, $Q_{wi}$ , % | Объёмное распределение пор $\Delta Q_w/\Delta d$ , %/мкм | $f_{ni} = \frac{n_i}{\sum n_i}$ | $f_{ni} d_i$ | $f_{wi} = \frac{n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^3}$ | $f_{wi} d_i$ |
| 50          | 10   | 6  | 6   | 0,12  | $1,3 \times 10^6$ | 0,01   | 0,01  | 0,000  | 0,06                            | 2,94         | 0,00  | 0,01         |
| 150         | 70   | 41   | 47  | 0,41  | $2,4 \times 10^8$ | 2,46   | 2,47  | 0,025  | 0,41                            | 61,76        | 0,02  | 3,69         |
| 250         | 28   | 17   | 64  | 0,17  | $4,4 \times 10^8$ | 4,61   | 7,08  | 0,046  | 0,17                            | 41,67        | 0,05  | 11,52        |
| 350         | 21   | 12   | 76  | 0,12  | $9 \times 10^8$   | 9,37   | 16,45   | 0,094  | 0,12                            | 43,24        | 0,09  | 32,80        |
| 450         | 16   | 9  | 85  | 0,09  | $1,5 \times 10^9$ | 15,18  | 31,63   | 0,152  | 0,09                            | 42,35        | 0,15  | 68,30        |
| 550         | 12   | 7  | 92  | 0,07  | $1,9 \times 10^9$ | 20,21  | 51,84   | 0,202  | 0,07                            | 37,75        | 0,20  | 111,13       |
| 650         | 8  | 5  | 97  | 0,05  | $2,2 \times 10^9$ | 22,87  | 74,71   | 0,229  | 0,05                            | 30,59        | 0,23  | 148,66       |
| 750         | 3  | 2  | 99  | 0,02  | $1,4 \times 10^9$ | 14,64  | 89,35   | 0,146  | 0,02                            | 14,71        | 0,15  | 109,79       |
| 850         | 2  | 1  | 100                                       | 0,01  | $10^9$            | 10,65  | 100   | 0,107  | 0,01                            | 8,33         | 0,11  | 90,57        |
| $\Sigma$    |  |  |   |   | $9,6 \times 10^9$ |  |   |  |                                 | 283,33       |   | 576,46       |

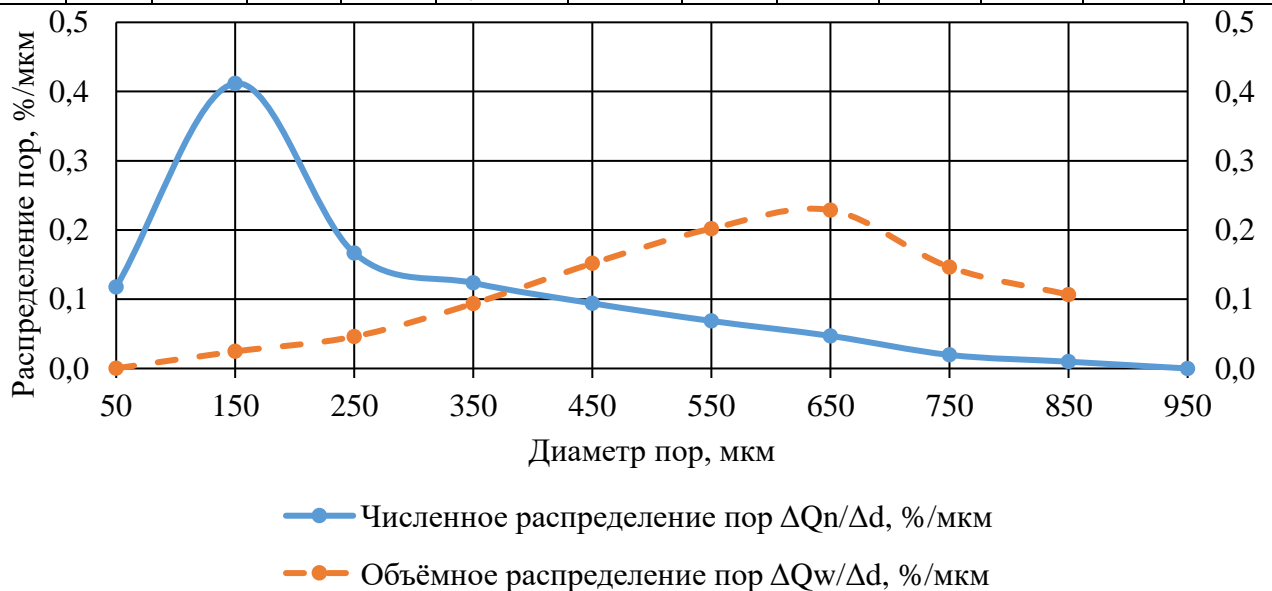


Рисунок 4.23 - Численное и массовое распределения пор в участке 2

Таблица 4.8 - Расчёт численного и массового распределения пор в участке 3

| Участок 3   |  |  |   |   |                      |  |   |  |                                   |              |   |              |  |
|-------------|--|--|---|---|----------------------|--|---|--|-----------------------------------|--------------|---|--------------|--|
| $d_i$ , мкм | Количество пор диаметра $d_i$ , $n_i$ , шт | Относительное содержание пор диаметра $d_i$ , $\Delta Q_n$ , % | Интегральное распределение пор, $Q_n$ , % | Численное распределение пор $\Delta Q_n/\Delta d$ , %/мкм | $n_i d_i^3$          | Относительное массовое содержание пор диаметра $d_i$ | Интегральное массовое распределение пор, $Q_{wi}$ , % | Объёмное распределение пор $\Delta Q_w/\Delta d$ , %/мкм | $f_{ni} = \frac{n_i}{\sum_i n_i}$ | $f_{ni} d_i$ | $f_{wi} = \frac{n_i d_i^3}{\sum_i n_i d_i^3}$ | $f_{wi} d_i$ |  |
| 50          | 7  | 5  | 5   | 0,1   | $8,3 \times 10^5$    | 0,01   | 0,01  | 0,000  | 0,05                              | 2,44         | 0,00  | 0,00         |  |
| 150         | 43   | 32   | 37  | 0,32  | $1,5 \times 10^8$    | 1,27   | 1,28  | 0,013  | 0,32                              | 47,64        | 0,01  | 1,91         |  |
| 250         | 33   | 24   | 61  | 0,24  | $5,2 \times 10^8$    | 4,52   | 5,80  | 0,045  | 0,24                              | 61,07        | 0,05  | 11,31        |  |
| 350         | 17   | 12   | 73  | 0,12  | $7,1 \times 10^8$    | 6,21   | 12,01   | 0,062  | 0,12                              | 42,75        | 0,06  | 21,72        |  |
| 450         | 11   | 8  | 81  | 0,08  | $10^9$               | 8,79   | 20,80   | 0,088  | 0,08                              | 36,64        | 0,09  | 39,58        |  |
| 550         | 8  | 6  | 87  | 0,06  | $1,3 \times 10^9$    | 11,24  | 32,04   | 0,112  | 0,06                              | 31,35        | 0,11  | 61,82        |  |
| 650         | 7  | 5  | 92  | 0,05  | $1,9 \times 10^9$    | 16,70  | 48,74   | 0,167  | 0,05                              | 33,35        | 0,17  | 108,54       |  |
| 750         | 6  | 4  | 96  | 0,04  | $2,3 \times 10^9$    | 20,36  | 69,10   | 0,204  | 0,04                              | 30,54        | 0,20  | 152,69       |  |
| 850         | 3  | 2  | 99  | 0,02  | $1,8 \times 10^9$    | 16,00  | 85,11   | 0,160  | 0,02                              | 18,69        | 0,16  | 136,03       |  |
| 950         | 2  | 1  | 100                                       | 0,02  | $1,7 \times 10^9$    | 14,89  | 100,00  | 0,149  | 0,01                              | 13,93        | 0,15  | 141,50       |  |
| $\Sigma$    |  |  |   |   | $1,2 \times 10^{10}$ |  |   |  |                                   | 318,4        |   | 675,11       |  |

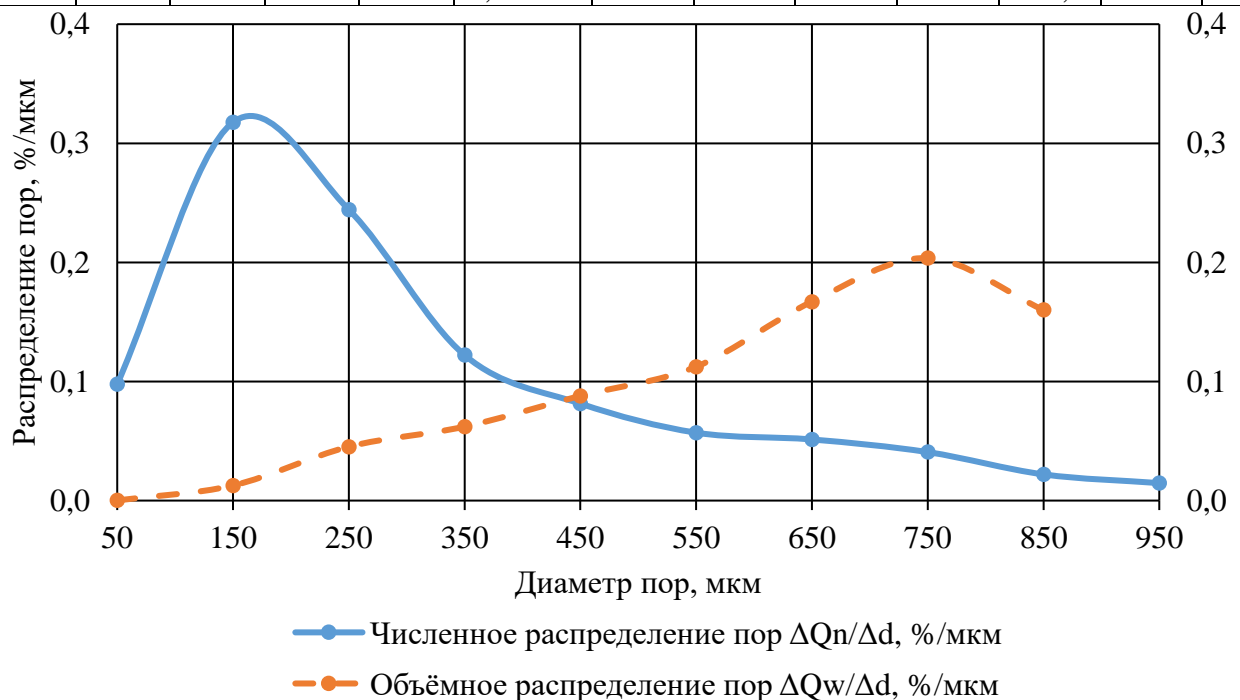


Рисунок 4.24 - Численное и массовое распределения пор в участке 3

Таблица 4.9 - Расчёт численного и массового распределения пор в участке 4

| Участок 4   |  |  |   |   |                      |  |   |  |                                 |              |   |              |
|-------------|--|--|---|---|----------------------|--|---|--|---------------------------------|--------------|---|--------------|
| $d_i$ , мкм | Количество пор диаметра $d_i$ , $n_i$ , шт | Относительное содержание пор диаметра $d_i$ , $\Delta Q_n$ , % | Интегральное распределение пор, $Q_n$ , % | Численное распределение пор $\Delta Q_n/\Delta d$ , %/мкм | $n_i d_i^3$          | Относительное массовое содержание пор диаметра $d_i$ , $\Delta Q_{wi}$ , % | Интегральное массовое распределение пор, $Q_{wi}$ , % | Объёмное распределение пор $\Delta Q_w/\Delta d$ , %/мкм | $f_{ni} = \frac{n_i}{\sum n_i}$ | $f_{ni} d_i$ | $f_{wi} = \frac{n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^3}$ | $f_{wi} d_i$ |
| 50          | 10   | 8  | 8   | 0,170   | $1,3 \times 10^6$    | 0,01   | 0,01  | 0,000  | 0,08                            | 4,25         | 0,00  | 0,00         |
| 150         | 41   | 35   | 43  | 0,349   | $1,4 \times 10^8$    | 0,86   | 0,87  | 0,009  | 0,35                            | 52,41        | 0,01  | 1,29         |
| 250         | 23   | 20   | 63  | 0,198   | $3,6 \times 10^8$    | 2,25   | 3,12  | 0,023  | 0,20                            | 49,58        | 0,02  | 5,64         |
| 350         | 12   | 10   | 73  | 0,102   | $5,1 \times 10^8$    | 3,18   | 6,30  | 0,032  | 0,10                            | 35,69        | 0,03  | 11,14        |
| 450         | 8  | 7  | 80  | 0,068   | $7,3 \times 10^8$    | 4,51   | 10,81   | 0,045  | 0,07                            | 30,59        | 0,05  | 20,29        |
| 550         | 6  | 5  | 85  | 0,051   | $1 \times 10^9$      | 6,17   | 16,99   | 0,062  | 0,05                            | 28,05        | 0,06  | 33,96        |
| 650         | 4  | 3  | 89  | 0,034   | $1,1 \times 10^9$    | 6,79   | 23,78   | 0,068  | 0,03                            | 22,10        | 0,07  | 44,16        |
| 750         | 3  | 3  | 91  | 0,025   | $1,3 \times 10^9$    | 7,83   | 31,61   | 0,078  | 0,03                            | 19,12        | 0,08  | 58,71        |
| 850         | 3  | 3  | 94  | 0,025   | $1,8 \times 10^9$    | 11,40  | 43,00   | 0,114  | 0,03                            | 21,67        | 0,11  | 96,86        |
| 950         | 2  | 2  | 96  | 0,019   | $1,9 \times 10^9$    | 11,78  | 54,79   | 0,118  | 0,02                            | 17,94        | 0,12  | 111,95       |
| 1050        | 2  | 2  | 97  | 0,017   | $2,3 \times 10^9$    | 14,32  | 69,11   | 0,143  | 0,02                            | 17,85        | 0,14  | 150,36       |
| 1150        | 2  | 2  | 99  | 0,017   | $3 \times 10^9$      | 18,81  | 87,92   | 0,188  | 0,02                            | 19,55        | 0,19  | 216,35       |
| 1250        | 1  | 1  | 100                                       | 0,008   | $2 \times 10^9$      | 12,08  | 100,00  | 0,121  | 0,01                            | 10,62        | 0,12  | 151,00       |
| $\Sigma$    |  |  |   |   | $1,6 \times 10^{10}$ |  |   |  |                                 | 329,42       |   | 901,70       |

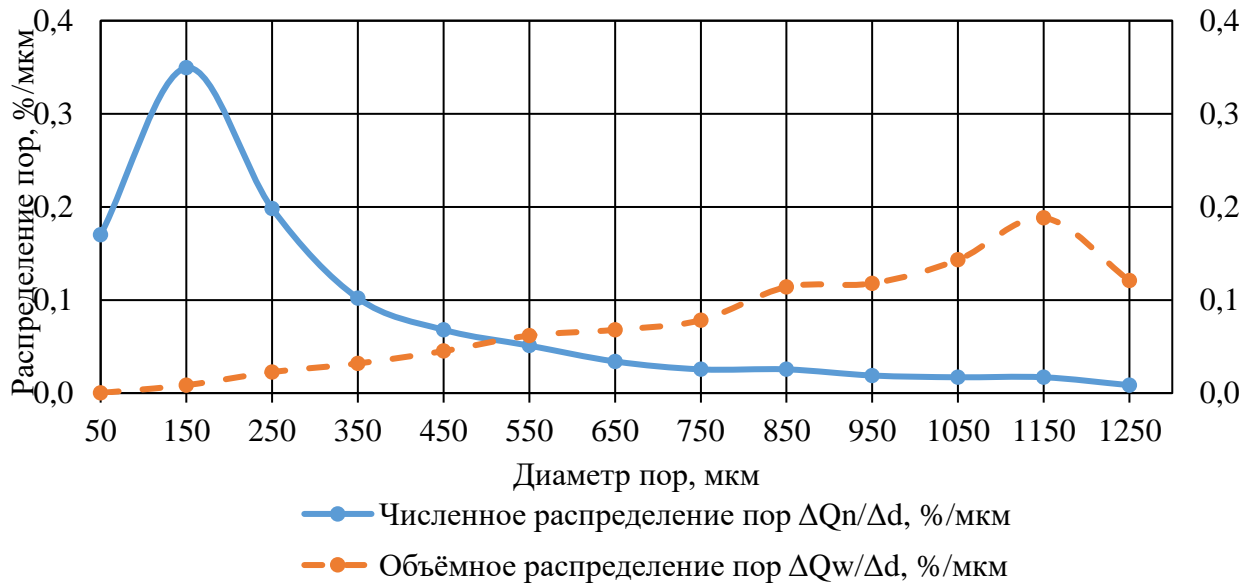


Рисунок 4.25 - Численное и массовое распределения пор в участке 4

Таблица 4.10 - Расчёт численного и массового распределения пор в участке 5

| Участок 5   |  |  |   |   |                   |  |   |  |                                 |              |   |              |
|-------------|--|--|---|---|-------------------|--|---|--|---------------------------------|--------------|---|--------------|
| $d_i$ , мкм | Количество пор диаметра $d_i$ , $n_i$ , шт | Относительное содержание пор диаметра $d_i$ , $\Delta Q_n$ , % | Интегральное распределение пор, $Q_n$ , % | Численное распределение пор $\Delta Q_n/\Delta d$ , %/мкм | $n_i d_i^3$       | Относительное массовое содержание пор диаметра $d_i$ , $\Delta Q_{wi}$ , % | Интегральное массовое распределение пор, $Q_{wi}$ , % | Объёмное распределение пор $\Delta Q_w/\Delta d$ , %/мкм | $f_{ni} = \frac{n_i}{\sum n_i}$ | $f_{mi} d_i$ | $f_{wi} = \frac{n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^3}$ | $f_{wi} d_i$ |
| 50          | 1  | 1  | 1   | 0,026   | $1,3 \times 10^5$ | 0,00   | 0,00  | 0,000  | 0,01                            | 0,64         | 0,00  | 0,00         |
| 150         | 27   | 34   | 35  | 0,342   | $9 \times 10^7$   | 3,34   | 3,35  | 0,033  | 0,34                            | 51,28        | 0,03  | 5,01         |
| 250         | 20   | 26   | 61  | 0,256   | $3,1 \times 10^8$ | 11,60  | 14,95   | 0,116  | 0,26                            | 64,10        | 0,12  | 29,00        |
| 350         | 15   | 19   | 80  | 0,192   | $6,4 \times 10^8$ | 23,87  | 38,82   | 0,239  | 0,19                            | 67,31        | 0,24  | 83,56        |
| 450         | 12   | 15   | 96  | 0,154   | $1,1 \times 10^9$ | 40,59  | 79,41   | 0,406  | 0,15                            | 69,23        | 0,41  | 182,67       |
| 550         | 3  | 4  | 100                                       | 0,043   | $5,5 \times 10^8$ | 20,59  | 100,00  | 0,206  | 0,04                            | 23,50        | 0,21  | 113,23       |
| $\Sigma$    |  |  |   |   | $2,7 \times 10^9$ |  |   |  |                                 | 276,07       |   | 413,47       |

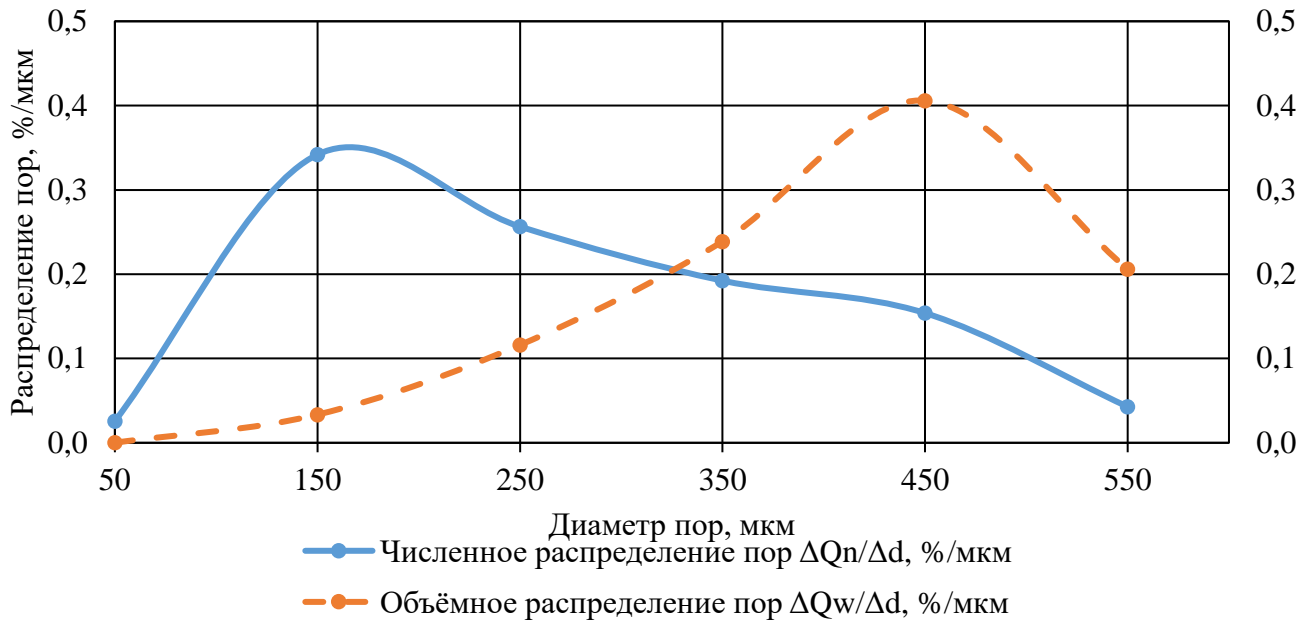


Рисунок 4.26 - Численное и массовое распределения пор в участке 5

Значение, характеризующееся отношением среднечисленного и среднеобъёмного распределения пор, называется полидисперсностью ( $\Pi$ ). Данный показатель наглядно демонстрирует характер распределения пор в разных участках образца (рисунок 4.27). По формуле (4.6) определена полидисперсность пор в каждом участке пеногазобетона.

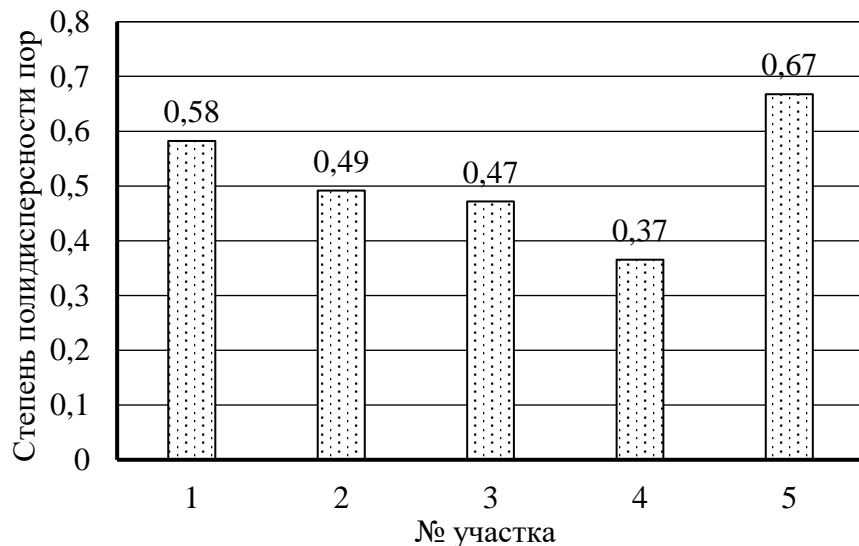


Рисунок 4.27 - Степень полидисперсности пор в участках пеногазобетона от периферии (участок 1) к центру (участок 5)

Уменьшение степени полидисперсности с периферии (0,58) к центральным участкам (0,37) связано с высокой концентрацией мелких пор с диаметром до 250

мкм у периферии образца. Наблюдается изменение характера пористости, которое проявляется в уменьшении количества пор и увеличении их размеров (до 1250 мкм) при переходе к центру образца. Однако в центральном участке образца заметно резкое возрастание степени полидисперсности до 0,67. Это изменение связано с уплотнением центрального участка образца, которое является следствием гидродинамических процессов. Эти процессы, наиболее активные на начальных этапах формирования пористой структуры, вносят значительный вклад в конечное свойство полидисперсности пор.

#### 4.4 Выводы по главе 4

1) С использованием методов математического планирования определено влияние дисперсной фазы на прочностные и эксплуатационные характеристики ячеистых бетонов и получены регрессионные модели зависимости свойств материала в зависимости от компонентов системы. Установлено, что введение баритовой добавки не приводит к снижению прочности баритосодержащего пенобетона.

2) Установлено, что увеличение количества баритосодержащей добавки способствует увеличению плотности пенобетона, однако при возрастании удельной поверхности добавки наблюдается снижения плотности. Это связано с тем, что частицы меньшего диаметра лучше встраиваются в ячейки пор не разрушая их, в то время как наличие более крупных частиц способствует более активно разрушению ячеек и схлопыванию строительной пены.

3) Величина усадки при высыхании пенобетона, содержащего ТБД, варьируется в пределах от 1,67 до 2,76 мм/м. Данные показатели свидетельствуют о том, что применение ТБД в составе пенобетона не ведет к превышению нормативных показателей усадки.

4) Разработана технология изготовления и проведены исследования баритсо-держащих бетонных изделий, имеющих вариотропную ячеистую структуру. Спектры рентгеновской флюоресценции указывают на то, что при изготовлении изделий по данной технологии концентрация бария у стенок образца значительно выше, чем в его центральных областях.

5) Установлено, что при снижении процента заполнения формы плотность у краёв образца изменяется незначительно, наибольшее изменение плотности происходит за счёт разуплотнения в центральной зоне. При увеличении коэффициента перфорации происходит увеличение плотности у краёв образца, при этом средняя плотность остаётся неизменной. Благодаря этому уплотнению стенок образца повышается прочность изделия поскольку участки повышенной плотности по краям сечения формируют зоны, способные воспринимать повышенные нагрузки.

6) Эффективное снижение средней плотности возможно при заполнении формы не меньше, чем на 80%, поскольку при дальнейшем снижении, в системе оказывается недостаточно энергии для полного заполнения объёма за счёт газообразования и происходит расслоение структуры.

7) Для дальнейших исследований выбран образец, полученный при  $K_z = 0,8$  и  $K_{перф} = 0,0137$ , обладающий следующими характеристиками: средняя плотность –  $1180 \text{ кг/м}^3$ , прочность при сжатии –  $10,13 \text{ Мпа}$ , коэффициент теплопроводности –  $0,28 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ .

8) Изучен процесс формирования поровой структуры. Расчёт параметра полидисперсности показал, что разработанный материал является полидисперсным ( $P < 1$ ) во всех участках сечения. Уменьшение степени полидисперсности от края ( $0,58$ ) к участкам, приближённым к центру ( $0,37$ ), связано с плотной концентрацией пор диаметром до  $250 \text{ мкм}$  у края блока и постепенным изменением характера пористости в сторону уменьшения количества и увеличения размеров пор до  $1250 \text{ мкм}$  с приближением к центру. В центральном участке блока наблюдается резкое увеличение степени полидисперсности до  $0,67$  связанное с уплотнением центрального участка в результате гидродинамических процессов, происходящих на начальном этапе формирования пористой структуры.

## ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ БАРИТСОДЕРЖАЩЕГО ПЕНОГАЗОБЕТОНА

### 5.1 Технология производства баритсодержащего пеногазобетона

По результатам проведённой научно-исследовательской работы разработана технологическая схема производства баритсодержащих пеногазобетонных блоков вариотропной ячеистой структуры (рисунок 5.1) и состав пеногазобетонной смеси (таблица 5.1). Изготовление пеногазобетонных блоков производится в заводских условиях, непосредственно на строительный объект поставляются готовые изделия.

На первом этапе приготовления смеси, необработанный баритовый концентрат измельчается до достижения необходимой удельной поверхности. Затем, измельченный баритовый концентрат, песок и портландцемент перемешиваются до получения однородной сухой смеси.

На втором этапе полученная сухая смесь замешивается со строительной пеной до однородного состояния. Строительная пена изготавливается непосредственно перед использованием, путём вспенивания раствора пенообразователя в пеногенераторе. Сухая смесь должна подаваться мелкими порциями, чтобы избежать разрушения стенок пены.

В полученную пенобетонную смесь добавляются алюминиевая пудра в качестве газообразователя и фтористый натрий в качестве ускорителя реакции. Производится перемешивание в течение 1 минуты.

После тщательного перемешивания, полученная смесь заливается в формы с отверстиями и выдерживается в стандартных условиях в течение 24 часов. После того, как пеногазобетонные изделия достигают необходимой прочности они извлекаются из форм и помещаются в камеру с заданным тепло-влажностным режимом для дальнейшего набора прочности до достижения марочной прочности. Затем,



производится проверка изделий на соответствие требуемым эксплуатационным показателям.

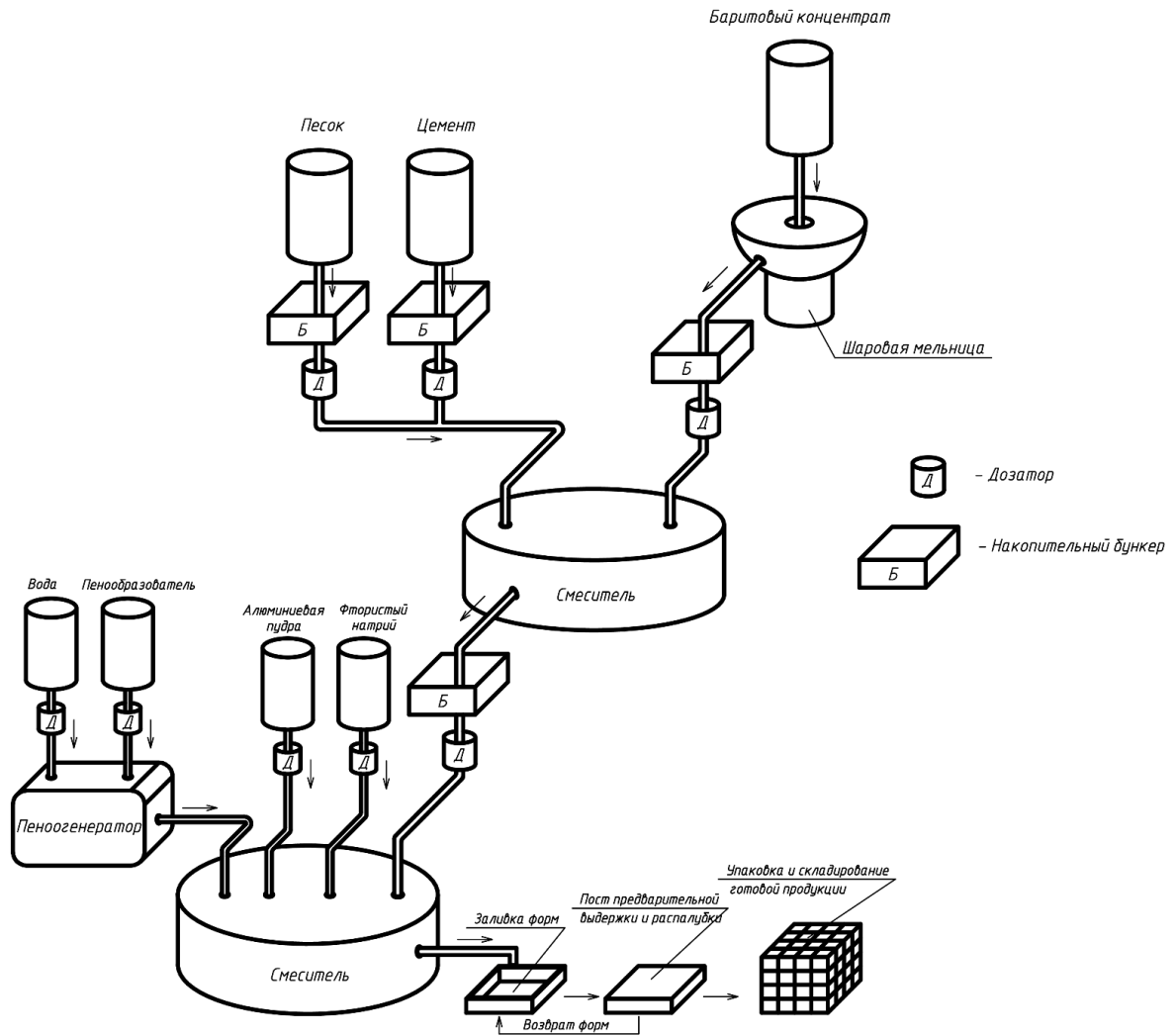


Рисунок 5.1 - Технологическая схема изготовления баритсодержащих пеногазобетонных блоков

Таблица 5.1 - Расход компонентов на 1 м<sup>3</sup> пеногазобетонной смеси

| Расход компонентов на 1 м <sup>3</sup> пеногазобетонной смеси, кг |       |     |                   |                  |      |                  |
|---|-------|-----|-------------------|------------------|------|------------------|
| Портландцемент  | Песок | ТБД | Алюминиевая пудра | Фтористый натрий | Вода | Пенообразователь |
| 595   | 230   | 100 | 3                 | 3                | 250  | 8                |

На основании исследований были разработаны рекомендации по изготовлению радиационно-защитных блоков неравномерной структуры из баритсодержащего пеногазобетона (приложение А).

Результаты проведенных испытаний были апробированы в опытно-промышленных условиях, о чём получены акты испытаний (приложение Б, В).

## 5.2 Радиационно-защитные свойства баритсодержащего пеногазобетона

Конструкционные элементы радиационной защиты имеют важное значение для обеспечения безопасности персонала в экранируемых помещениях. Они должны быть способны ослабить мощность дозы до уровней, которые гарантируют безопасное пребывание людей. Радиационно-защитные конструкции применяются в различных отраслях, таких как энергетика, медицина, наука и другие, для защиты работников и населения от ионизирующего излучения.

В данном разделе рассматривается вопрос эффективности использования блоков вариотропной ячеистой структуры, изготовленных из баритсодержащего пеногазобетона, для создания ограждающих конструкций. Эти конструкции предназначены для обеспечения достаточного ослабления ионизирующего излучения, возникающего при работе с рентгенологическим оборудованием.

Целью применения таких радиационно-защитных конструкций является создание безопасной среды работы с рентгеновским оборудованием, где персонал и пациенты защищены от негативного воздействия ионизирующих излучений. Блоки вариотропной ячеистой структуры из баритсодержащего пеногазобетона обладают свойствами поглощения и рассеивания радиации, что делает их подходящими материалами для создания эффективных радиационно-защитных конструкций.

Главным нормативным документом, регламентирующим требования к допустимому уровню радиационного загрязнения рентгенологических кабинетов, является СанПиН 2.6.1.1192.03 «Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований».

Для оценки эффективности радиационной защиты рассчитывается показатель кратности ослабления  $K$  мощности поглощенной дозы  $\varphi_0$  рентгеновского излучения в воздухе в данной точке в отсутствии защиты до значения допустимой мощности поглощенной дозы  $\varphi_t$  в воздухе после взаимодействия с конструкцией защиты. Кратность ослабления  $K$  рассчитывается по формуле (5.1):

$$K = \frac{\varphi_0}{\varphi_t}; \quad (5.1)$$

Мощности поглощенной дозы рентгеновского излучения в воздухе в данной точке в отсутствии защиты  $\varphi_0$  рассчитывается по формуле (5.2):

$$\varphi_0 = \frac{10^3 \cdot K_R \cdot W \cdot N}{30 \cdot r^2}, \quad (5.2)$$

где  $10^3$  - коэффициент перевода мГр в мкГр;  $K_R$  - радиационный выход - отношение мощности воздушной кермы в первичном пучке рентгеновского излучения на расстоянии 1 м от фокуса трубки, умноженной на квадрат этого расстояния, к силе анодного тока, мГр·м<sup>2</sup>/(мА·мин);  $W$  - рабочая нагрузка рентгеновского аппарата, мА·мин/нед;  $N$  - коэффициент направленности излучения, отн.ед.;  $r$  - расстояние от фокуса рентгеновской трубки до точки расчета, м;  $30$  - значение нормированного времени работы рентгеновского аппарата в неделю при односменной работе персонала группы А (30-часовая рабочая неделя), ч/нед;

Величина радиационного выхода  $K_R$  принимается на основании технической документации на конкретное оборудование, либо из таблицы 1 Приложения 9 СанПиН 2.6.1.1192.03.

Рабочая нагрузка  $W$  определяется исходя из области применения оборудования, на основании регламентированной длительности проведения рентгенологических исследований при номинальных стандартизированных значениях анодного напряжения и приведены, в зависимости от типа и назначения рентгеновского аппарата, в таблице 4.1 СанПиН 2.6.1.1192.03.

Коэффициент направленности  $N$  зависит от направления движения пучка рентгеновского излучения. Для расчёта в направлении первичного пучка  $N$  считается равным 1, для оборудования, получающего изображение за счёт подвижности источника излучения  $N$  равняется 0,1, для направлений, куда падает рассеянное излучения  $N$  равняется 0,05.

Как правило при проектировании защитных конструкций выделяют участок, работающий под прямым воздействием первичного пучка. Остальная конструкция рассчитывается с учетом ослабления рассеянного излучения.

Расстояние от фокуса рентгеновской трубки до точки расчёта  $r$  принимается в зависимости от расположения оборудования и габаритов помещения. За точку расчёта, для конструкций, ограждающих помещения, находящиеся на том же уровне, принимается точка внутренней поверхности конструкции, расположенная перпендикулярно к излучающему оборудованию.

Известно, что ионизирующее излучение ослабляется при прохождении через защитные конструкции при взаимодействии фотонов атомами и электронами с вещества защиты.

Плотность потока фотонов первичного моноэнергетического излучения параллельного пучка, проходящего через вещество толщиной  $t$  (см), определяется по формуле (5.3) [131]:

$$\varphi_t = \varphi_0 e^{(-\mu t)}, \quad (5.3)$$

где  $\mu$  – коэффициент линейного ослабления фотонного излучения.

Из уравнения (3) получаем функцию для определения толщины защитной конструкции

$$t = \frac{1}{\mu} \ln\left(\frac{\varphi_0}{\varphi_t}\right) = \frac{\ln(K)}{\mu}; \quad (5.4)$$

Входящий в эти формулы коэффициент линейного ослабления  $\mu$  зависит от энергии излучения и состава материала ограждающей конструкции. Установить величину этого показателя можно как экспериментальным путём, так и при помощи аналитического расчёта [132-135].

Для аналитического определения линейных коэффициентов ослабления  $\mu$ , вводится массовый коэффициент ослабления  $\mu_m$ , через соотношение (5.5) [136, 137]:

$$\mu = \mu_m \rho, \quad (5.5)$$

где  $\rho$  - плотность материала защитной конструкции;

Эта формула применима для простого вещества. Для определения массового коэффициента ослабления сложного вещества, состоящего из нескольких простых веществ, производится расчёт по формуле (5.6):

$$\mu_m = \sum_i p_i \mu_{mi}, \quad (5.6)$$

где  $p_i$  – весовая доля  $i$ -го химического элемента,

$\mu_{mi}$  – массовый коэффициент ослабления  $i$ -го химического элемента;

Массовые коэффициенты ослабления играют важную роль при аналитической оценке радиационно-защитных свойств материала [138-143]. За счёт высокой концентрации в составе материала элементов, обладающих высоким массовым коэффициентом ослабления, можно добиться высоких радиационно-защитных характеристик изделия даже при пониженной плотности.

Поскольку в большинстве аппаратов используются лучевые трубки с напряжением 100 кВ [144], при расчёте требуемой кратности ослабления  $K$  принимаем характеристики для рентгенодиагностического аппарата с цифровой обработкой информации с анодным напряжением 100 кВ, согласно СанПиН 2.6.1.1192.03.

Расчёт проводим для ограждающих конструкций помещения постоянного пребывания персонала и для смежных помещений при расстоянии 1,5 м от оборудования до стены рентгенологического кабинета [145].

$$W = 1000 \text{ мА} \cdot \text{мин/нед};$$

$$K_R = 9 \text{ мГр} \cdot \text{м}^2 / (\text{мА} \cdot \text{мин});$$

$$N = 0,1;$$

$$r = 1,5 \text{ м};$$

По формуле (5.2) получаем значение мощности поглощенной дозы рентгеновского излучения в воздухе в данной точке в отсутствие защиты,  $\varphi_0 = 13333 \text{ мкГр/ч}$ .

Допустимая мощность поглощенной дозы в воздухе  $\varphi_t$ , принята по таблице 4.2 СанПиН 2.6.1.1192.03.

$$\varphi_{1t} = 13 \text{ мкГр/ч, для помещений постоянного пребывания персонала};$$

$$\varphi_{2t} = 2,5 \text{ мкГр/ч, для смежных помещений};$$

Расчет по формуле (5.1) дает следующие значения требуемой кратности ослабления:

$$K_1 = 1026, K_2 = 5333.$$

Для полученных требуемых параметров ослабления излучения, рассчитаны характеристики защитных конструкции из разработанных баритсодержащих пеногазобетонных блоков вариотропной ячеистой структуры [146] средней плотностью  $1180 \text{ кг/м}^3$  и произведено сравнение с применяемыми на текущий момент, бетоном плотностью  $2350 \text{ кг/м}^3$  и баритовой штукатуркой плотностью  $3500 \text{ кг/м}^3$ , а также свинцом, применяемым для защиты от излучений высоких мощностей.

В основе расчётного метода лежит тот факт, что каждый химический элемент обладает определёнными уникальными характеристиками взаимодействия с ионизирующими излучениями, включающими комптоновское рассеяние, фотоэффект, образование электрон-позитронных пар, а также рассеяние и поглощение нейтронов, поэтому зная химический состав материала, можно точно определить его радиационно-защитные свойства.

Исходя из химического состава баритсодержащего пеногазобетона, определённого для четырёх различных участков пеногазоблока (участок №1-край изделия, участок №4-середина изделия) при помощи волнодисперсионного спектрометра (табл. 5.2), определялся коэффициент линейного ослабления рентгеновского излучения, минимальная толщина ограждающей конструкции для получения требуемой кратности ослабления и масса единицы площади защитной конструкции.

Таблица 5.2 - Химический состав баритсодержащего ячеистого бетона

| № участка | Химический состав, % |      |     |      |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|----------------------|------|-----|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|           | O                    | C    | Si  | Ba   | S    | Al   | Fe   | Mg    | Na    | K     | P     | Sr    | Ti    | Mn    | V     | Zn    | Cu    |
| 1 (край)  | 29,4                 | 29,5 | 7,5 | 12,5 | 2,76 | 1,99 | 1,96 | 0,69  | 0,70  | 0,41  | 0,10  | 0,15  | 0,09  | 0,04  | 0,02  | 0,02  | 0,01  |
| 2         | 29,3                 | 29,4 | 7,4 | 12,7 | 2,75 | 1,97 | 1,97 | 0,673 | 0,723 | 0,432 | 0,111 | 0,153 | 0,093 | 0,039 | 0,025 | 0,028 | 0,016 |
| 3         | 29,3                 | 29,3 | 7,6 | 12,6 | 2,74 | 1,92 | 1,96 | 0,693 | 0,657 | 0,420 | 0,109 | 0,150 | 0,094 | 0,038 | 0,025 | 0,029 | 0,018 |
| 4 (центр) | 29,4                 | 29,1 | 7,7 | 12,5 | 2,73 | 1,90 | 1,95 | 0,649 | 0,584 | 0,420 | 0,109 | 0,152 | 0,092 | 0,040 | 0,025 | 0,028 | 0,018 |

Химические составы сравниваемых материалов получены из литературных источников и представлены в таблицах 5.3, 5.4.

Таблица 5.3 - Химический состав обычного бетона плотностью 2350 кг/м<sup>3</sup> [65]

| Химический состав, % |       |      |       |      |      |
|----------------------|-------|------|-------|------|------|
| Н                    | О     | Al   | Si    | Fe   | Ca   |
| 0,35                 | 54,25 | 4,68 | 32,93 | 1,96 | 5,82 |

Таблица 5.4 - Химический состав рентгенозащитной штукатурки плотностью 3500 кг/м<sup>3</sup> [147]

| Химический состав, % |      |       |      |      |       |      |      |       |
|----------------------|------|-------|------|------|-------|------|------|-------|
| Fe                   | Н    | О     | Mg   | Ca   | Ba    | Si   | Al   | S     |
| 0,11                 | 5,13 | 63,01 | 0,20 | 3,37 | 11,81 | 4,07 | 0,40 | 11,91 |

Значения массовых коэффициентов ослабления приведены как в отечественных [148], так и в зарубежных [149] справочных данных. Наиболее актуальная информация на текущий момент представлена в базе данных ХСОМ Национального института стандартов и технологий США (табл. 5.5). ХСОМ содержит информацию о массовых коэффициентах ослабления для 100 первых химических элементов периодической таблицы Менделеева в диапазоне энергий от 1 кеВ до 100 ГеВ. База данных ХСОМ и программные комплексы для работы с ней активно используются для определения общих поперечных сечений и коэффициентов затухания, а также парциальных сечений для некогерентного и когерентного рассеяния, фотоэлектрическое поглощение и образование пар [150-152].





Линейные коэффициенты ослабления рентгеновского излучения  $\mu$  рассчитаны по формуле (5.6), минимальная необходимая толщина защитной конструкции рассчитана по формуле (5.4). Результаты расчётов характеристик радиационно-защитных конструкций из различных материалов приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 - Линейные коэффициенты ослабления  $\mu$ , требуемая толщины экранирующей конструкции  $t$  и масса 1 м<sup>2</sup> экранирующей конструкции  $m$  из различных материалов

| Мощность излучения, МэВ | Блоки из баритсодержащего пеногазобетона вариотропной ячеистой структуры, $\rho_{\text{ср.}}=1180 \text{ кг/м}^3$ |  |            |  |            | Бетон, $\rho=2350 \text{ кг/м}^3$                        |  |            |  |            |
|-------------------------|---|--|------------|--|------------|--|--|------------|--|------------|
|                         | Линейный коэффициент ослабления $\mu$ , $\text{см}^{-1}$  | Требуемая толщина экранирующей конструкции |            | Масса 1 м <sup>2</sup> экранирующей конструкции $m$ , кг |            | Линейный коэффициент ослабления $\mu$ , $\text{см}^{-1}$ | Требуемая толщина экранирующей конструкции |            | Масса 1 м <sup>2</sup> экранирующей конструкции $m$ , кг |            |
|                         |   | $t_1$ , см                                 | $t_2$ , см | $m_1$ , кг   | $m_2$ , кг |  | $t_1$ , см                                 | $t_2$ , см | $m_1$ , кг   | $m_2$ , кг |
| 0,02                    | 10,436  | 0,7  | 0,8        | 7,9  | 9,7        | 7,503  | 0,9  | 1,1        | 21,7   | 26,9       |
| 0,03                    | 3,326   | 2,1  | 2,6        | 24,6   | 30,5       | 2,438  | 2,8  | 3,5        | 66,8   | 82,7       |
| 0,04                    | 4,490   | 1,5  | 1,9        | 18,3   | 22,6       | 1,219  | 5,7  | 7,0        | 133,6  | 165,4      |
| 0,05                    | 2,533   | 2,7  | 3,4        | 32,4   | 40,1       | 0,791  | 8,8  | 10,8       | 205,9  | 254,8      |
| 0,06                    | 1,596   | 4,3  | 5,4        | 51,4   | 63,6       | 0,603  | 11,5                                       | 14,2       | 270,3  | 334,6      |
| 0,08                    | 0,803   | 8,6  | 10,7       | 102,1  | 126,4      | 0,449  | 15,5                                       | 19,1       | 363,2  | 449,6      |
| 0,1                     | 0,498   | 13,9                                       | 17,2       | 164,4  | 203,5      | 0,387  | 17,9                                       | 22,2       | 421,1  | 521,3      |
| 0,2                     | 0,183   | 37,9                                       | 46,9       | 448,1  | 554,7      | 0,290  | 23,9                                       | 29,6       | 561,1  | 694,6      |
| 0,3                     | 0,135   | 51,5                                       | 63,8       | 609,3  | 754,2      | 0,250  | 27,7                                       | 34,3       | 650,5  | 805,2      |
| 0,4                     | 0,114   | 60,6                                       | 75,0       | 716,4  | 886,8      | 0,224  | 30,9                                       | 38,3       | 727,2  | 900,2      |
| 0,5                     | 0,102   | 67,8                                       | 83,9       | 801,4  | 992,1      | 0,205  | 33,9                                       | 42,0       | 796,5  | 986,0      |
| 0,6                     | 0,094   | 74,1                                       | 91,7       | 875,7  | 1084,0     | 0,189  | 36,6                                       | 45,4       | 861,2  | 1066,0     |
| 0,8                     | 0,081   | 85,1                                       | 105,4      | 1006,6   | 1246,0     | 0,166  | 41,7                                       | 51,6       | 980,2  | 1213,4     |
| 1                       | 0,073   | 95,1                                       | 117,7      | 1124,2   | 1391,6     | 0,149  | 46,4                                       | 57,4       | 1090,0   | 1349,3     |
| 3                       | 0,043   | 162,1                                      | 200,7      | 1916,6   | 2372,6     | 0,086  | 81,0                                       | 100,3      | 1904,0   | 2356,9     |

Продолжение таблицы 5.6

| Мощность излучения, МэВ | Рентгенозащитная штукатурка,<br>$\rho=3500 \text{ кг/м}^3$ |  |                   |  |                   | Свинец, $\rho=11400 \text{ кг/м}^3$                    |  |                   |  |                   |
|-------------------------|--|--|-------------------|--|-------------------|--|--|-------------------|--|-------------------|
|                         | Линейный коэффициент ослабления $\mu, \text{ см}^{-1}$     | Требуемая толщина экранирующей конструкции |                   | Масса $1 \text{ м}^2$ экранирующей конструкции $m, \text{ кг}$ |                   | Линейный коэффициент ослабления $\mu, \text{ см}^{-1}$ | Требуемая толщина экранирующей конструкции |                   | Масса $1 \text{ м}^2$ экранирующей конструкции $m, \text{ кг}$ |                   |
|                         |  | $t_1, \text{ см}$                          | $t_2, \text{ см}$ | $m_1, \text{ кг}$  | $m_2, \text{ кг}$ |  | $t_1, \text{ см}$                          | $t_2, \text{ см}$ | $m_1, \text{ кг}$  | $m_2, \text{ кг}$ |
| 0,02                    | 18,270   | 0,4  | 0,5               | 13,3   | 16,4              | 958,044  | 0,01                                       | 0,01              | 0,8  | 1,0               |
| 0,03                    | 6,060  | 1,1  | 1,4               | 40,0   | 49,6              | 329,942  | 0,02                                       | 0,03              | 2,4  | 3,0               |
| 0,04                    | 11,189   | 0,6  | 0,8               | 21,7   | 26,8              | 153,218  | 0,05                                       | 0,1               | 5,2  | 6,4               |
| 0,05                    | 6,425  | 1,1  | 1,3               | 37,8   | 46,7              | 84,209   | 0,1  | 0,1               | 9,4  | 11,6              |
| 0,06                    | 4,117  | 1,7  | 2,1               | 58,9   | 73,0              | 51,634   | 0,1  | 0,2               | 15,3   | 18,9              |
| 0,08                    | 2,142  | 3,2  | 4,0               | 113,3  | 140,2             | 24,068   | 0,3  | 0,4               | 32,8   | 40,6              |
| 0,1                     | 1,374  | 5,0  | 6,2               | 176,6  | 218,7             | 60,830   | 0,1  | 0,1               | 13,0   | 16,1              |
| 0,2                     | 0,555  | 12,5                                       | 15,5              | 437,5  | 541,6             | 10,671   | 0,6  | 0,8               | 74,1   | 91,7              |
| 0,3                     | 0,419  | 16,5                                       | 20,5              | 579,0  | 716,7             | 4,256  | 1,6  | 2,0               | 185,7  | 229,8             |
| 0,4                     | 0,360  | 19,3                                       | 23,9              | 674,7  | 835,3             | 2,449  | 2,8  | 3,5               | 322,7  | 399,5             |
| 0,5                     | 0,323  | 21,5                                       | 26,6              | 752,1  | 931,1             | 1,709  | 4,1  | 5,0               | 462,4  | 572,5             |
| 0,6                     | 0,296  | 23,4                                       | 29,0              | 820,3  | 1015,5            | 1,330  | 5,2  | 6,5               | 594,1  | 735,4             |
| 0,8                     | 0,258  | 26,9                                       | 33,3              | 941,4  | 1165,3            | 0,959  | 7,2  | 9,0               | 824,5  | 1020,7            |
| 1                       | 0,231  | 30,0                                       | 37,2              | 1050,6   | 1300,5            | 0,776  | 8,9  | 11,1              | 1019,0   | 1261,5            |
| 2                       | 0,162  | 42,7                                       | 52,9              | 1495,4   | 1851,2            | 0,516  | 13,4                                       | 16,6              | 1530,2   | 1894,2            |
| 3                       | 0,133  | 52,2                                       | 64,6              | 1825,3   | 2259,6            | 0,479  | 14,5                                       | 17,9              | 1650,9   | 2043,7            |

На рисунке 5.2 представлен график изменения радиационно-защитных свойств материала в зависимости от энергии излучения. На рисунках 5.3 и 5.4 представлены графики изменения толщины и массы ограждающих конструкций, необходимых для обеспечения допустимых радиационных условий.

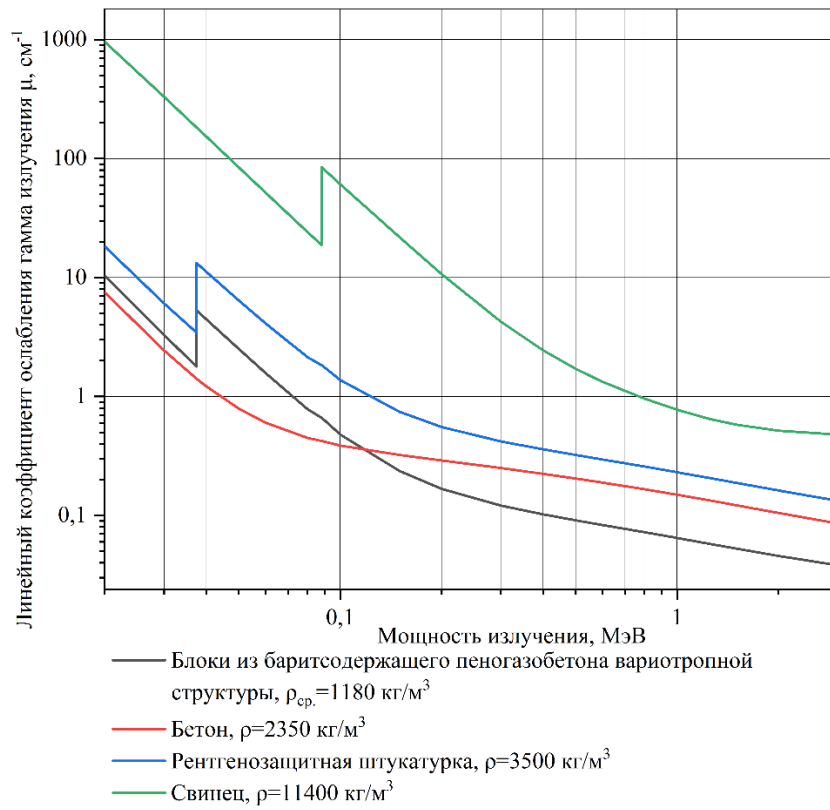


Рисунок 5.2 - Зависимость величины коэффициента линейного ослабления исследуемых материалов от энергии излучения

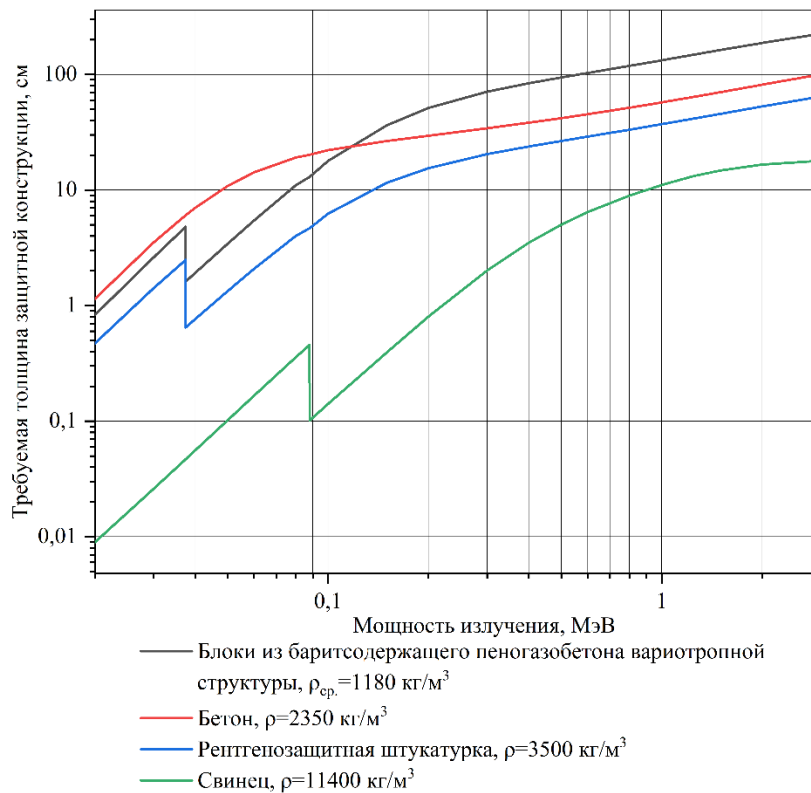


Рисунок 5.3 - Зависимость требуемой толщины ограждающей конструкции от энергии излучения

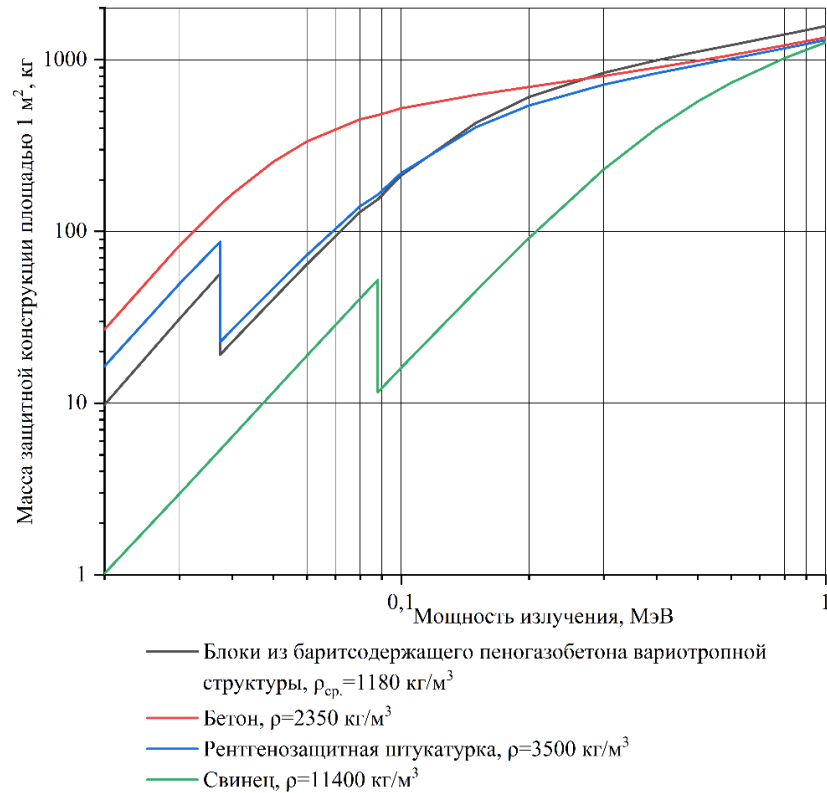


Рисунок 5.4 - Зависимость массы ограждающей конструкции из исследуемых материалов от энергии излучения

По полученным результатам видно, что при мощности излучения менее 0,1 МэВ баритсодержащий пеногазобетон обладает более высоким коэффициентом ослабления рентгеновского излучения и меньшей требуемой толщиной конструкции по сравнению с более плотным бетоном.

Результаты расчётов массы радиационно-защитной конструкции минимальной требуемой толщины для достижения нормативных показателей кратности ослабления рентгеновского излучения показывают, что в диапазоне мощностей излучения от 0,02 до 0,08 МэВ можно добиться снижения массы ограждающей конструкции на 63-84% по сравнению с обычным бетоном плотностью 2350 кг/м<sup>3</sup> и на 10-41% по сравнению с рентгенозащитной штукатуркой плотностью 3500 кг/м<sup>3</sup>.

На разработанный радиационно-защитный строительный блок из ячеистого бетона с переменной плотностью получен патент на полезную модель (приложение Г).

### **5.3 Экономическая эффективность использования радиационно-защитных баритсодержащих блоков вариотропной структуры**

Оценка экономической эффективности разработанного материала и сравнение с существующими аналогами производилось в соответствии с методикой, установленной приказом министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации №421/пр от 04.08.2020 «Об утверждении методики определения сметной стоимости строительства, реконструкции, капитального ремонта, сноса объектов капитального строительства, работ по сохранению объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации на территории Российской Федерации». Для определения стоимости монтажа конструкции использовался базисно-индексный метод расчёта сметной стоимости. Для оценки стоимости материала принята средняя рыночная стоимость. Трудозатраты, стоимость оплаты труда рабочих и стоимость эксплуатации машин приняты по федеральным единичным расценкам. Индексы перевода из базисных цен в текущие приняты для объектов здравоохранения г. Москва по состоянию на I квартал 2023 г.

Нормативные показатели трудозатрат и сметной стоимости приведены в таблице 5.7, технико-экономические показатели разработанных изделий из баритсодержащего пеногазобетона, а также материалов аналогов представлены в таблице 5.8 и на рисунке 5.5.

Таблица 5.7 - Нормативные показатели трудозатрат и единичных стоимостей для радиационно-защитных конструкций из различных материалов

| Наименование  | Ед. изм. | Таблица          | Затраты труда рабочих, чел.-ч. | В базисных ценах   |                      |                                |         |                   |                 |                   |           |
|---|----------|------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------------------|---------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------|
|   |          |                  |                                | Прямые затраты     | В т.ч.               |                                |         | Накладные расходы | Сметная прибыль | Сметная стоимость |           |
|   |          |                  |                                |                    | Оплата труда рабочих | Эксплуатация машин             |         |                   |                 |                   | материалы |
|   |          |                  |                                | Эксплуатация машин |                      | в т.ч. оплата труда машинистов |         |                   |                 |                   |           |
| <b>Рентгенозащитная штукатурка</b>  |          |                  |                                |                    |                      |                                |         |                   |                 |                   |           |
| Оштукатуривание стен рентгенозащитным раствором толщиной 30 мм по бетону, камню или кирпичу       | 100 м2   | ФЕР 15-02-021-01 | 257,60                         | 32797,39           | 2225,66              | 353,66                         | 207,13  | 30218,07          | 2432,79         | 1192,07           | 36422,25  |
| На каждые 10 мм увеличения толщины грунта добавлять к расценке 15-02-021-01                       |          | ФЕР 15-02-021-02 | 16,24                          | 6658,03            | 140,31               | 131,98                         | 83,46   | 6385,74           | 223,77          | 109,65            | 6991,45   |
| <b>Свинец</b>   |          |                  |                                |                    |                      |                                |         |                   |                 |                   |           |
| Облицовка стен листовыми материалами  | 100 м2   | ФЕР 15-02-024-05 | 88,30                          | 612607,57          | 810,59               | 94,85                          | 12,90   | 611702,13         | 823,49          | 403,51            | 613834,57 |
| <b>Блоки из баритсодержащего пеногазобетона вариотропной структуры</b>                            |          |                  |                                |                    |                      |                                |         |                   |                 |                   |           |
| Кладка перегородок из газобетонных блоков на клею толщиной: 100 мм при высоте этажа до 4 м        | 100 м2   | ФЕР 08-04-003-01 | 62,40                          | 19235,06           | 518,54               | 111,96                         | 16,10   | 18604,56          | 588,10          | 368,90            | 20192,06  |
| Кладка перегородок из газобетонных блоков на клею толщиной: 200 мм при высоте этажа до 4 м        | 100 м2   | ФЕР 08-04-003-03 | 80,19                          | 38109,63           | 678,41               | 222,11                         | 31,95   | 37209,11          | 781,40          | 490,15            | 39381,18  |
| Кладка стен из газобетонных блоков на клею без облицовки толщиной: 400 мм при высоте этажа до 4 м | м3       | ФЕР 08-03-004-01 | 3,65                           | 1903,56            | 31,54                | 11,56                          | 1,67    | 1860,46           | 36,53           | 22,91             | 1963,00   |
| Кладка стен из газобетонных блоков на клею без облицовки толщиной: 500 мм при высоте этажа до 4 м | м3       | ФЕР 08-03-004-03 | 4,47                           | 1910,64            | 38,62                | 11,56                          | 1,67    | 1860,46           | 44,32           | 27,80             | 1982,75   |
| <b>Бетон</b>  |          |                  |                                |                    |                      |                                |         |                   |                 |                   |           |
| Устройство стен и перегородок бетонных высотой: до 3 м, толщиной до 100 мм                        | 100 м3   | ФЕР 06-01-030-01 | 2951,20                        | 137672,87          | 25498,37             | 12318,82                       | 1856,90 | 99855,68          | 27902,38        | 15866,06          | 181441,30 |
| Устройство стен и перегородок бетонных высотой: до 3 м, толщиной до 150 мм                        | 100 м3   | ФЕР 06-01-030-02 | 1773,10                        | 109503,57          | 15319,58             | 8226,82                        | 1245,67 | 85957,17          | 16896,56        | 9607,85           | 136007,97 |
| Устройство стен и перегородок бетонных высотой: до 3 м, толщиной до 200 мм                        | 100 м3   | ФЕР 06-01-030-03 | 1190,00                        | 96057,37           | 10281,60             | 5875,54                        | 890,74  | 79900,23          | 11395,79        | 6479,96           | 113933,11 |
| Устройство стен и перегородок бетонных высотой: до 3 м, толщиной до 300 мм                        | 100 м3   | ФЕР 06-01-030-04 | 843,71                         | 76745,01           | 7289,65              | 4290,87                        | 650,28  | 65164,49          | 8098,73         | 4605,16           | 89448,90  |
| Устройство стен и перегородок бетонных высотой: до 3 м, толщиной до 500 мм                        | 100 м3   | ФЕР 06-01-030-05 | 616,42                         | 71510,66           | 5325,87              | 3174,25                        | 481,42  | 63010,54          | 5923,44         | 3368,23           | 80802,32  |
| Устройство стен и перегородок бетонных высотой: до 6 м, толщиной до 1000 мм                       | 100 м3   | ФЕР 06-01-030-11 | 410,55                         | 66688,33           | 3547,15              | 3119,55                        | 476,57  | 60021,63          | 4104,19         | 2333,76           | 73126,28  |
| Устройство стен и перегородок бетонных высотой: до 6 м, толщиной до 2000 мм                       | 100 м3   | ФЕР 06-01-030-12 | 307,02                         | 64329,34           | 2652,65              | 3020,11                        | 463,37  | 58656,58          | 3178,34         | 1807,29           | 69314,97  |

## Продолжение таблицы 5.7

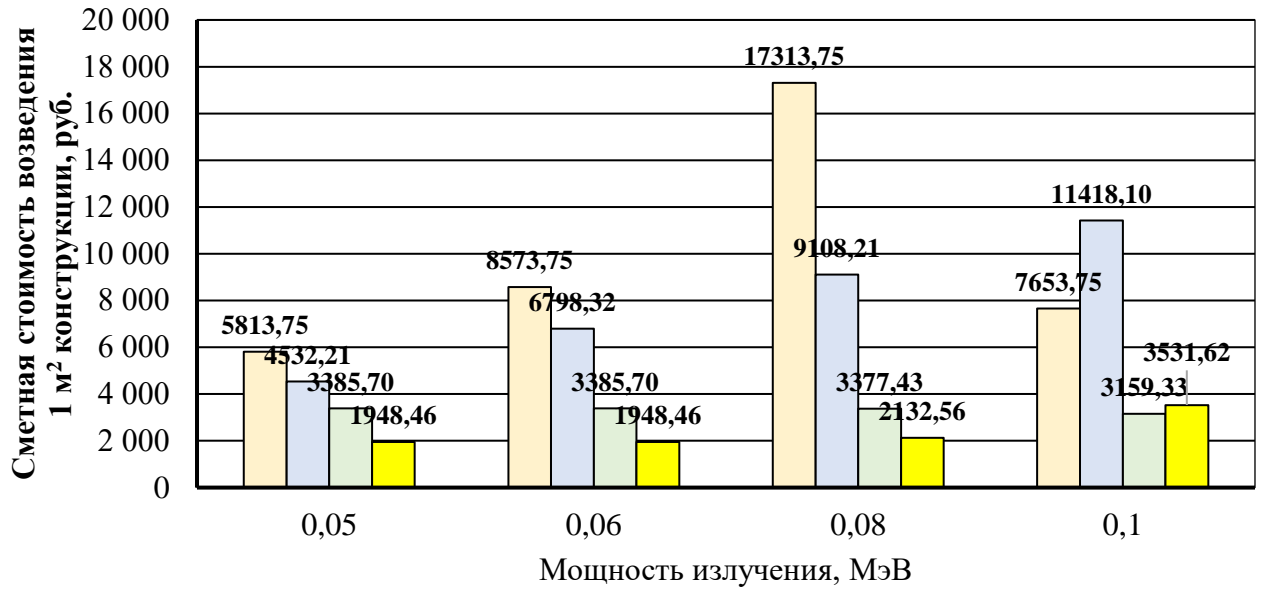
| Наименование  | Ед. изм. | Таблица          | За-<br>траты<br>труда<br>рабо-<br>чих,<br>чел.-ч. | В текущих ценах       |  |                    |          |                      |                      |                        |            | Сметная при-<br>быль | Сметная стои-<br>мость |
|---|----------|------------------|---|-----------------------|--|--------------------|----------|----------------------|----------------------|------------------------|------------|----------------------|------------------------|
|   |          |                  |   | Прямые<br>затраты     | В т.ч.                                 |                    |          | Накладные<br>расходы | Сметная при-<br>быль | Сметная стои-<br>мость |            |                      |                        |
|   |          |                  |   |                       | Оплата<br>труда ра-<br>бочих           | Эксплуатация машин |          |                      |                      |                        | материалы  |                      |                        |
|   |          |                  |   | Эксплуатация<br>машин | в т.ч. оплата<br>труда машини-<br>стов |                    |          |                      |                      |                        |            |                      |                        |
| <b>Рентгенозащитная штукатурка</b>  |          |                  |   |                       |  |                    |          |                      |                      |                        |            |                      |                        |
| Оштукатуривание стен рентгенозащитным раствором толщиной 30 мм по бетону, камню или кирпичу       | 100 м2   | ФЕР 15-02-021-01 | 257,60  | 554114,48             | 81169,82                               | 5471,12            | 3204,30  | 467473,54            | 84374,12             | 41343,32               | 679831,92  |                      |                        |
| На каждые 10 мм увеличения толщины грунта добавлять к расценке 15-02-021-01                       |          | ФЕР 15-02-021-02 | 16,24   | 105946,23             | 5117,11                                | 2041,73            | 1291,13  | 98787,40             | 6408,23              | 3140,03                | 115494,50  |                      |                        |
| <b>Свинец</b>   |          |                  |   |                       |  |                    |          |                      |                      |                        |            |                      |                        |
| Облицовка стен листовыми материалами  | 100 м2   | ФЕР 15-02-024-05 | 88,30   | 4631029,55            | 29562,22                               | 1467,33            | 199,56   | 4600000,00           | 29761,78             | 14583,27               | 4675374,60 |                      |                        |
| <b>Блоки из баритсодержащего пеногазобетона вариогральной структуры</b>                           |          |                  |   |                       |  |                    |          |                      |                      |                        |            |                      |                        |
| Кладка перегородок из газобетонных блоков на клею толщиной: 100 мм при высоте этажа до 4 м        | 100 м2   | ФЕР 08-04-003-01 | 62,40   | 160549,44             | 18911,15                               | 1732,02            | 249,07   | 139<br>906,27        | 21076,24             | 13220,55               | 194846,24  |                      |                        |
| Кладка перегородок из газобетонных блоков на клею толщиной: 200 мм при высоте этажа до 4 м        | 100 м2   | ФЕР 08-04-003-03 | 80,19   | 307990,19             | 24741,61                               | 3436,04            | 494,27   | 279812,54            | 27759,47             | 17412,76               | 353162,41  |                      |                        |
| Кладка стен из газобетонных блоков на клею без облицовки толщиной: 400 мм при высоте этажа до 4 м | м3       | ФЕР 08-03-004-01 | 3,65  | 15319,72              | 1150,26                                | 178,83             | 25,83    | 13990,63             | 1293,71              | 811,51                 | 17424,94   |                      |                        |
| Кладка стен из газобетонных блоков на клею без облицовки толщиной: 500 мм при высоте этажа до 4 м | м3       | ФЕР 08-03-004-03 | 4,47  | 15577,93              | 1408,47                                | 178,83             | 25,83    | 13990,63             | 1577,74              | 989,67                 | 18145,34   |                      |                        |
| <b>Бетон</b>  |          |                  |   |                       |  |                    |          |                      |                      |                        |            |                      |                        |
| Устройство стен и перегородок бетонных высотой: до 3 м, толщиной до 100 мм                        | 100 м3   | ФЕР 06-01-030-01 | 2951,20   | 1871412,41            | 929925,55                              | 190572,15          | 28726,24 | 750914,71            | 977824,83            | 556018,04              | 3405255,29 |                      |                        |
| Устройство стен и перегородок бетонных высотой: до 3 м, толщиной до 150 мм                        | 100 м3   | ФЕР 06-01-030-02 | 1773,10   | 1332371,91            | 558705,08                              | 127268,91          | 19270,51 | 646397,92            | 589535,11            | 335225,85              | 2257132,86 |                      |                        |
| Устройство стен и перегородок бетонных высотой: до 3 м, толщиной до 200 мм                        | 100 м3   | ФЕР 06-01-030-03 | 1190,00   | 1066714,29            | 374969,95                              | 90894,60           | 13779,75 | 600849,73            | 396524,69            | 225474,83              | 1688713,81 |                      |                        |
| Устройство стен и перегородок бетонных высотой: до 3 м, толщиной до 300 мм                        | 100 м3   | ФЕР 06-01-030-04 | 843,71  | 822270,26             | 265853,54                              | 66379,76           | 10059,83 | 490036,96            | 281431,63            | 160029,75              | 1263731,65 |                      |                        |
| Устройство стен и перегородок бетонных высотой: до 3 м, толщиной до 500 мм                        | 100 м3   | ФЕР 06-01-030-05 | 616,42  | 717179,39             | 194234,48                              | 49105,65           | 7447,57  | 473839,26            | 205715,69            | 116975,59              | 1039870,66 |                      |                        |
| Устройство стен и перегородок бетонных высотой: до 6 м, толщиной до 1000 мм                       | 100 м3   | ФЕР 06-01-030-11 | 410,55  | 628986,66             | 129364,56                              | 48259,44           | 7372,54  | 451362,66            | 139471,84            | 79307,52               | 847766,01  |                      |                        |
| Устройство стен и перегородок бетонных высотой: до 6 м, толщиной до 2000 мм                       | 100 м3   | ФЕР 06-01-030-12 | 307,02  | 584560,73             | 96742,15                               | 46721,10           | 7168,33  | 441097,48            | 105988,69            | 60268,08               | 750817,50  |                      |                        |

Таблица 5.8- Техничко-экономические показатели 1 м<sup>2</sup> защитной конструкции

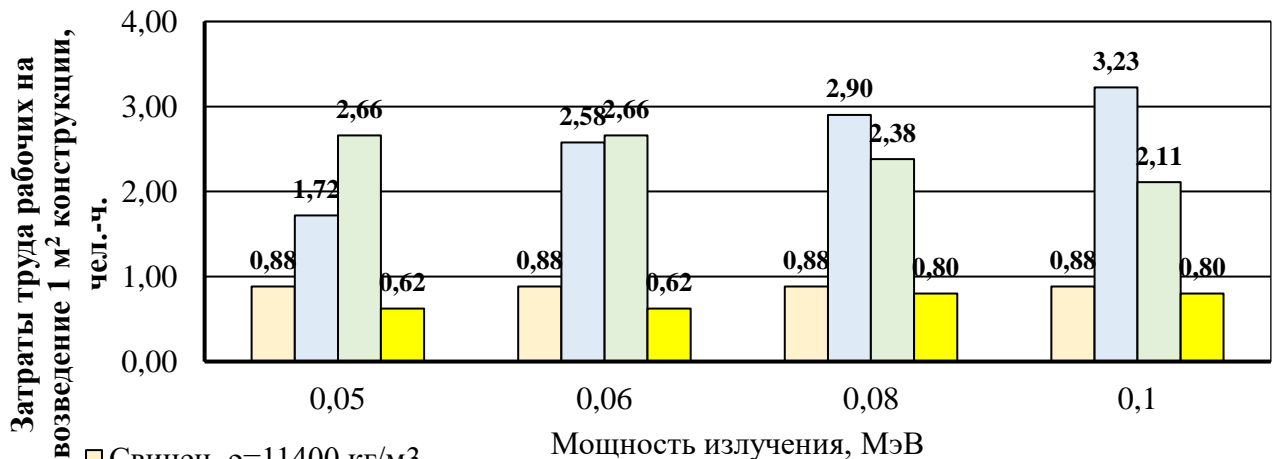
| Мощность излучения,<br>МэВ | Блоки из баритсодержащего пеногазобетона вариотропной структуры |                                     |                       |                      |                                | Бетон                         |                                     |                       |                      |                                |
|----------------------------|---|-------------------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------|
|                            | Треб. толщина конструкции, см                                   | Принимаемая толщина конструкции, см | Масса конструкции, кг | Прямые затраты, руб. | Затраты труда рабочих, чел.-ч. | Треб. толщина конструкции, см | Принимаемая толщина конструкции, см | Масса конструкции, кг | Прямые затраты, руб. | Затраты труда рабочих, чел.-ч. |
| 0,02                       | 0,82  | 10,00                               | 118,21                | 1948,46              | 0,62                           | 1,14                          | 10,00                               | 235,00                | 3405,26              | 2,95                           |
| 0,03                       | 2,58  | 10,00                               | 118,21                | 1948,46              | 0,62                           | 3,52                          | 10,00                               | 235,00                | 3405,26              | 2,95                           |
| 0,04                       | 1,91  | 10,00                               | 118,21                | 1948,46              | 0,62                           | 7,04                          | 10,00                               | 235,00                | 3405,26              | 2,95                           |
| 0,05                       | 3,39  | 10,00                               | 118,21                | 1948,46              | 0,62                           | 10,84                         | 15,00                               | 352,50                | 3385,70              | 2,66                           |
| 0,06                       | 5,38  | 10,00                               | 118,21                | 1948,46              | 0,62                           | 14,24                         | 15,00                               | 352,50                | 3385,70              | 2,66                           |
| 0,08                       | 10,69   | 15,00                               | 177,32                | 2132,56              | 0,80                           | 19,13                         | 20,00                               | 470,00                | 3377,43              | 2,38                           |
| 0,1                        | 17,22   | 20,00                               | 236,43                | 3531,62              | 0,80                           | 22,18                         | 25,00                               | 587,50                | 3159,33              | 2,11                           |
| 0,15                       | 33,88   | 35,00                               | 413,75                | 6098,73              | 1,28                           | 26,60                         | 30,00                               | 705,00                | 3791,19              | 2,53                           |
| 0,2                        | 46,92   | 50,00                               | 591,07                | 9072,67              | 2,24                           | 29,56                         | 30,00                               | 705,00                | 3791,19              | 2,53                           |
| 0,3                        | 63,80   | 65,00                               | 768,39                | 11794,47             | 2,91                           | 34,27                         | 35,00                               | 822,50                | 3639,55              | 2,16                           |
| 0,4                        | 75,02   | 80,00                               | 945,71                | 14516,27             | 3,58                           | 38,31                         | 40,00                               | 940,00                | 4159,48              | 2,47                           |
| 0,5                        | 83,92   | 85,00                               | 1004,82               | 15423,54             | 3,80                           | 41,96                         | 45,00                               | 1057,50               | 4679,42              | 2,77                           |
| 0,6                        | 91,70   | 95,00                               | 1123,04               | 17238,07             | 4,25                           | 45,36                         | 50,00                               | 1175,00               | 5199,35              | 3,08                           |
| 0,8                        | 105,41  | 110,00                              | 1300,36               | 19959,87             | 4,92                           | 51,63                         | 55,00                               | 1292,50               | 4662,71              | 2,26                           |
| 1                          | 117,72  | 120,00                              | 1418,57               | 21774,41             | 5,36                           | 57,42                         | 60,00                               | 1410,00               | 5086,60              | 2,46                           |

| Мощность излучения,<br>МэВ | Рентгенозащитная штукатурка   |                                     |                       |                      |                                | Свинец                        |                                     |                       |                      |                                |
|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------|
|                            | Треб. толщина конструкции, см | Принимаемая толщина конструкции, см | Масса конструкции, кг | Прямые затраты, руб. | Затраты труда рабочих, чел.-ч. | Треб. толщина конструкции, см | Принимаемая толщина конструкции, см | Масса конструкции, кг | Прямые затраты, руб. | Затраты труда рабочих, чел.-ч. |
| 0,02                       | 0,47                          | 1,00                                | 35,00                 | 2266,11              | 0,86                           | 0,01                          | 0,01                                | 1,14                  | 1213,75              | 0,88                           |
| 0,03                       | 1,42                          | 2,00                                | 70,00                 | 4532,21              | 1,72                           | 0,03                          | 0,03                                | 3,42                  | 2133,75              | 0,88                           |
| 0,04                       | 0,77                          | 1,00                                | 35,00                 | 2266,11              | 0,86                           | 0,06                          | 0,06                                | 6,84                  | 3513,75              | 0,88                           |
| 0,05                       | 1,34                          | 2,00                                | 70,00                 | 4532,21              | 1,72                           | 0,11                          | 0,11                                | 12,54                 | 5813,75              | 0,88                           |
| 0,06                       | 2,08                          | 3,00                                | 105,00                | 6798,32              | 2,58                           | 0,17                          | 0,17                                | 19,38                 | 8573,75              | 0,88                           |
| 0,08                       | 4,01                          | 5,00                                | 175,00                | 9108,21              | 2,90                           | 0,36                          | 0,36                                | 41,04                 | 17313,75             | 0,88                           |
| 0,1                        | 6,25                          | 7,00                                | 245,00                | 11418,10             | 3,23                           | 0,15                          | 0,15                                | 17,10                 | 7653,75              | 0,88                           |
| 0,15                       | 11,56                         | 12,00                               | 420,00                | 17192,82             | 4,04                           | 0,40                          | 0,40                                | 45,60                 | 19153,75             | 0,88                           |
| 0,2                        | 15,47                         | 16,00                               | 560,00                | 21812,60             | 4,69                           | 0,81                          | 0,81                                | 92,34                 | 38013,75             | 0,88                           |
| 0,3                        | 20,48                         | 21,00                               | 735,00                | 27587,33             | 5,50                           | 2,02                          | 2,02                                | 230,28                | 93673,75             | 0,88                           |
| 0,4                        | 23,86                         | 24,00                               | 840,00                | 31052,16             | 5,99                           | 3,51                          | 3,51                                | 400,14                | 162213,8             | 0,88                           |
| 0,5                        | 26,60                         | 27,00                               | 945,00                | 34517,00             | 6,47                           | 5,03                          | 5,03                                | 573,42                | 232133,75            | 0,88                           |
| 0,6                        | 29,01                         | 30,00                               | 1050,00               | 37981,83             | 6,96                           | 6,46                          | 6,46                                | 736,44                | 297913,8             | 0,88                           |
| 0,8                        | 33,30                         | 34,00                               | 1190,00               | 42601,61             | 7,61                           | 8,96                          | 8,96                                | 1021,44               | 412913,8             | 0,88                           |
| 1                          | 37,16                         | 38,00                               | 1330,00               | 47221,39             | 8,26                           | 11,07                         | 11,07                               | 1261,98               | 509973,8             | 0,88                           |





(а)



(б)

Рисунок 5.5 - Сравнение финансовых затрат (а) и трудоёмкости (б) на возведение 1 м<sup>2</sup> радиационно-защитной конструкции из сравниваемых материалов

По полученным результатам видно, что наибольший экономический эффект от использования баритсодержащих пеногазоблоков достигается при экранировании излучений мощностью от 0,05 до 0,08 МэВ. При этих значениях сметная стоимость единицы площади защиты из пеногазоблоков ниже по сравнению с обычным тяжёлым бетоном на 37-42% и на 57-77% раза по сравнению с рентгенозащитной штукатуркой. Также из всех рассмотренных вариантов баритсодержащий пеногазоблок обладает наименьшим показателем требуемых трудозатрат на монтаж ограждающих конструкций.

## 5.4 Выводы по главе 5

1) Разработаны состав и технология изготовления ячеистых баритсодержащих пеногазобетонных блоков вариотропной структуры для защиты от ионизирующих излучений. Представлена технологическая схема изготовления данных блоков в условиях заводского производства.

2) Аналитическими методами определены радиационно-защитные свойства баритсодержащих пеногазобетонных блоков вариотропной структуры. Установлено, что при мощности излучения менее 0,1 МэВ баритсодержащий пеногазобетон обладает более высоким коэффициентом ослабления рентгеновского излучения и меньшей требуемой толщиной конструкции по сравнению с более плотным бетоном. Результаты расчётов массы радиационно-защитной конструкции минимальной требуемой толщины для достижения нормативных показателей кратности ослабления рентгеновского излучения показывают, что в диапазоне мощностей излучения от 0,02 до 0,08 МэВ можно добиться снижения массы ограждающей конструкции на 63-84% по сравнению с обычным бетоном плотностью 2350 кг/м<sup>3</sup> и на 10-41% по сравнению с рентгенозащитной штукатуркой плотностью 3500 кг/м<sup>3</sup>.

3) Наибольший экономический эффект от использования баритсодержащих пеногазоблоков достигается при экранировании излучений мощностью от 0,5 до 0,8 МэВ. При этих значениях сметная стоимость единицы площади защиты из пеногазоблоков ниже по сравнению с обычным тяжёлым бетоном на 37-42% и на 57-77% по сравнению с рентгенозащитной штукатуркой. Также из всех рассмотренных вариантов баритсодержащий пеногазоблок обладает наименьшим показателем требуемых трудозатрат на монтаж ограждающих конструкций.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### **Итоги выполненного исследования:**

1) С увеличением времени помола баритового концентрата происходит аморфизации частиц барита. При этом размер кристаллитов снижается. Помол баритового концентрат в шаровой мельнице более 45 мин. не приводит к существенным изменениям показателя дисперсности частиц.

2) Увеличение количества тонкомолотой баритсодержащей добавки (ТБД) до 17% от массы вяжущего способствует улучшению прочностных характеристик за счёт уплотнения структуры, а дальнейшее увеличение количества ТБД приводит к снижению прочности композиционного материала за счёт разрыхления цементной матрицы.

3) Увеличение тонкости помола ТБД негативно влияет на прочностные характеристики цементно-баритового камня по причине образованием агломераций мелких частиц баритсодержащей добавки вокруг более крупных. Использование ПАВ позволяет диспергировать данные агломерации и увеличить процентное содержание ТБД, при котором достигается максимальная прочность, до 20%. Разрушение агломераций частиц ТБД и их повышенная дисперсность способствуют равномерному распределению нагрузки в материале, улучшая его общую прочность в результате чего наибольшая прочность цементно-баритового камня достигается при наибольшей тонкости помола.

4) Увеличение количества ТБД приводит к увеличению плотности композиционного материала. Также наблюдается увеличение плотности при увеличении дисперсности добавки, что обуславливается созданием более плотной упаковкой частиц в единице объема

5) С увеличением количества добавки и ее дисперсности, возрастает водоцементное отношение необходимое, для получения цементного теста нормальной густоты. Это обусловлено возрастающей адсорбционной способностью тонкодисперсной баритсодержащей добавки. Сравнивая водопотребность образцов с разной

дисперсностью добавки, но с одинаковым ее количеством можно отметить, что увеличение тонкости помола приводит снижению необходимого водоцементного отношения, что обусловлено тем, что высокодисперсный баритовый концентрат при создании более плотной упаковке частиц вытесняет часть жидкости из межзернового пространства.

6) ТБД с дисперсностью равной портландцементу ( $S_{уд} = 310 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) при 10% содержании не участвует в формировании структурного каркаса цементной матрицы, о чем свидетельствуют одинаковые сроки начала схватывания. С увеличением дисперсности ТБД и количества ее введения проявляется, наоборот, диспергирующий эффект, который затрудняет формирование структурного каркаса и замедляет процессы коагуляции цементного геля. Это приводит к удлинению сроков схватывания композиционного материала

7) При сравнении составов растворов пенообразователей для производства строительной пены установлено, что время жизни пены, полученной с использованием синтетического пенообразователя ниже и через пол часа после вспенивания относительный объём сохранившейся пены ниже на 22%, чем из белкового пенообразователя. Стойкость пены в цементном тесте полученной с использованием 3-% раствора белкового пенообразователя выше на 4%, чем у пены, полученной с использованием 4-% раствора и на 12% выше по сравнению с 4-% раствором синтетического пенообразователя.

8) На рентгенограммах поризованного цементно-баритового камня наблюдается большое количество интенсивных пиков, характерных для сернокислого бария, с интенсивностью равной соответствующим пикам рентгенограммы исходного баритового концентрата. В периоде от 2 до 28 суток после формования, не наблюдаются процессы кристаллизации/аморфизации или изменения размеров кристаллитов сернокислого бария, что указывает на то, что баритовый концентрат не участвует в реакции гидратации, благодаря инертности сернокислого бария.

9) Судя по потерям в массе при ДСК в диапазоне температур от 700 до 740°C количество образовавшегося карбоната кальция при карбонизации образцов с ТБД

на воздухе на 5% ниже, что подтверждает ранее сделанный вывод об образовании более плотной структуры цементного камня в присутствии ТБД.

10) С использованием методов математического планирования определено влияние дисперсной фазы на прочностные и эксплуатационные характеристики ячеистых бетонов и получены регрессионные модели зависимости свойств материала в зависимости от компонентов системы. Установлено, что введение баритовой добавки не приводит к снижению прочности баритосодержащего пенобетона.

11) Установлено, что увеличение количества баритосодержащей добавки способствует увеличению плотности пенобетона, однако при возрастании удельной поверхности добавки наблюдается снижения плотности. Это связано с тем, что частицы меньшего диаметра лучше встраиваются в ячейки пор не разрушая их, в то время как наличие более крупных частиц способствует более активно разрушают ячеек и схлопыванию строительной пены.

12) Величина усадки при высыхании пенобетона, содержащего ТБД, варьируется в пределах от 1,67 до 2,76 мм/м. Данные показатели свидетельствуют о том, что применение ТБД в составе пенобетона не ведет к превышению нормативных показателей усадки.

13) Разработана технология изготовления и проведены исследования баритосодержащих бетонных изделий, имеющих вариотропную ячеистую структуру. Спектры рентгеновской флюоресценции указывают на то, что при изготовлении изделий по данной технологии концентрация бария у стенок образца значительно выше, чем в его центральных областях.

14) Установлено, что при снижении процента заполнения формы плотность у краёв образца изменяется незначительно, наибольшее изменение плотности происходит за счёт разуплотнения в центральной зоне. При увеличении коэффициента перфорации происходит увеличение плотности у краёв образца, при этом средняя плотность остаётся неизменной. Благодаря этому уплотнению стенок образца повышается прочность изделия поскольку участки повышенной плотности по краям сечения формируют зоны, способные воспринимать повышенные нагрузки.

15) Эффективное снижение средней плотности возможно при заполнении формы не меньше, чем на 80%, поскольку при дальнейшем снижении, в системе оказывается недостаточно энергии для полного заполнения объёма за счёт газообразования и происходит расслоение структуры.

16) Для дальнейших исследований выбран образец, полученный при  $K_3 = 0,8$  и  $K_{\text{перф}} = 0,0137$ , обладающий следующими характеристиками: средняя плотность –  $1180 \text{ кг/м}^3$ , прочность при сжатии –  $10,13 \text{ Мпа}$ , коэффициент теплопроводности –  $0,28 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ .

17) Изучен процесс формирования поровой структуры. Расчёт параметра полидисперсности показал, что разработанный материал является полидисперсным ( $P < 1$ ) во всех участках сечения. Уменьшение степени полидисперсности от края ( $0,58$ ) к участкам, приближённым к центру ( $0,37$ ), связано с плотной концентрацией пор диаметром до  $250 \text{ мкм}$  у края блока и постепенным изменением характера пористости в сторону уменьшения количества и увеличения размеров пор до  $1250 \text{ мкм}$  с приближением к центру. В центральном участке блока наблюдается резкое увеличение степени полидисперсности до  $0,67$  связанное с уплотнением центрального участка в результате гидродинамических процессов, происходящих на начальном этапе формирования пористой структуры.

18) Разработаны состав и технология изготовления ячеистых баритсодержащих пеногазобетонных блоков вариотропной структуры для защиты от ионизирующих излучений. Представлена технологическая схема изготовления данных блоков в условиях заводского производства.

19) Аналитическими методами определены радиационно-защитные свойства баритсодержащих пеногазобетонных блоков вариотропной структуры. Установлено, что при мощности излучения менее  $0,1 \text{ МэВ}$  баритсодержащий пеногазобетон обладает более высоким коэффициентом ослабления рентгеновского излучения и меньшей требуемой толщиной конструкции по сравнению с более плотным бетоном. Результаты расчётов массы радиационно-защитной конструкции минимальной требуемой толщины для достижения нормативных показателей кратности

ослабления рентгеновского излучения показывают, что в диапазоне мощностей излучения от 0,02 до 0,08 МэВ можно добиться снижения массы ограждающей конструкции на 63-84% по сравнению с обычным бетоном плотностью 2350 кг/м<sup>3</sup> и на 10-41% по сравнению с рентгенозащитной штукатуркой плотностью 3500 кг/м<sup>3</sup>.

20) Наибольший экономический эффект от использования баритсодержащих пеногазоблоков достигается при экранировании излучений мощностью от 0,5 до 0,8 МэВ. При этих значениях сметная стоимость единицы площади защиты из пеногазоблоков ниже по сравнению с обычным тяжёлым бетоном на 37-42% и на 57-77% по сравнению с рентгенозащитной штукатуркой. Также из всех рассмотренных вариантов баритсодержащий пеногазоблок обладает наименьшим показателем требуемых трудозатрат на монтаж ограждающих конструкций.

**Рекомендации.** Разработанный композиционный баритсодержащий материал может быть использован в качестве облегчённых ограждающих конструкций для защиты от ионизирующих излучений, например, рентгенологических кабинетов, исследовательских лабораторий и т.п.

**Перспективы дальнейшей разработки темы.** Дальнейшие исследования в этой области могут быть направлены на изучение использования в качестве тонкомолотой баритсодержащей добавки для получения радиационно-защитных материалов отходов, баритодобывающей промышленности, а также прочих химических соединений бария.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Schneider M., Froggatt A. The World Nuclear Industry Status Report 2022, 2022. P. 385.
2. Постановление Правительства РФ от 16.03.2020 N 289-13 "О внесении изменений в государственную программу Российской Федерации "Развитие атомного энергопромышленного комплекса" [Электронный ресурс], URL [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_348194](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_348194) (дата обращения: 05.06.2022)
3. Онищенко Г.Г., Романович И.К. Основные направления обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации на современном этапе // Радиационная гигиена, Т. 7, № 4, 2014. С. 5-22.
4. Балонов М.И., Голиков В.Ю., Звонова И.А., Кальницкий С.А., Репин В.С., Сарычева С.С., Чипига Л.А. Современные уровни медицинского облучения в России // Радиационная гигиена, Т. 8, № 3, 2015. С. 67-79.
5. Онищенко Г.Г., Попова А.Ю., Романович И.К., Водоватов А.В., Башкетова Н.С., Историк О.А., Чипига Л.А., Шацкий И.Г., Репин Л.В., Библин А.М. Современные принципы обеспечения радиационной безопасности при использовании источников ионизирующего излучения в медицине. Часть 1. Тенденции развития, структура лучевой диагностики и дозы медицинского облучения // Радиационная гигиена, Т. 12, № 1, 2019. С. 6-24.
6. Yıldız A., Köse E., Demirtaş Ö.C. Analysis of precautions taken for protection from X-rays in a hospital in Gaziantep in the context of workplace health and safety // Journal of Radiation Research and Applied Sciences, Vol. 15, No. 4, 2022.
7. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Хомяков А.П., Русских И.М., Селезнев Е.Н. Расчетно-экспериментальное исследование гомогенных защит от гамма-излучения // Ядерная и радиационная безопасность., № 3(77), 2015. С. 17-24.
8. Качан С.М. Взаимодействие гамма-излучения с веществом. Минск: БНТУ, 2014. 35 с.



9. Broyles C.D., Thomas D.A., Haynes S.K. The Measurement and Interpretation of the K Auger Intensities of Sn, Cs and Au. // *The Physical Review*, No. 89, 1953. pp. 715-724.
10. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. Книга 1. М.: Энергоатомиздат, 1993. 376 с.
11. Кислов А.Н. Атомная и ядерная физика : учеб. пособие. Екатеринбург: Урал. ун-та, 2017. 271 с.
12. Рот А. Вакуумные уплотнения. М.: Энергия, 1971. 464 с.
13. Старостин С.М. Охрана труда в производстве санитарно-технических работ. М.: Высш. школа, 1968. 223 с.
14. Кабардин О.Ф. Физика. Справочные материалы. М.: Просвещение, 1991. 367 с.
15. Королев Е.В., Гришина А.Н. Основные принципы создания радиационно-защитного материала. Определение эффективности химического состава // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета.*, № 1(11), 2009. С. 261-265.
16. Akkurt , El-Khayatt A.M. The effect of barite proportion on neutron and gamma-ray shielding // *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 51, 2013. pp. 5-9.
17. Рабошук Д.С. Теоретические основы при создании высокоэффективных радиационно-защитных материалов для защиты от ионизирующих излучений. // *Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова.* Белгород. 2015. С. 340-343
18. AbuAlRoos N.J., Amin N.A.B., Zainon R. Conventional and new lead-free radiation shielding materials for radiation protection in nuclear medicine: A review // *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 165, 2019.
19. Luković J., Biljana B., Bučevac D., Prekajski M., Pantić J., Bašcarević Z., Matović B. Synthesis and characterization of tungsten carbide fine powders // *Ceramics International*, Vol. 41, No. 1 B, 2015. pp. 1271-1277.

20. Duran S.U., Küçükömeroğlu , Çiriş A., Ersoy H. Gamma-ray absorbing characteristic of obsidian rocks as a potential material for radiation protection, Vol. 199, 2022.
21. Королев Е.В., Прошин А.П., Баженов Ю.М., Соколова Ю.А. Радиационно-защитные и коррозионно-стойкие серные строительные материалы. М.: Палеотип, 2006. 272 с.
22. Шейченко М.С., Алфимова Н.И., Вишневская Я.Ю. Современные композиционные радиационно-защитные материалы строительного назначения // Вестник Белгородского Государственного Технологического Университета Им. В.Г. Шухова, Т. 2, № 5, 2017. С. 15-19.
23. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: АСВ, 2011. 527 с.
24. Васильев А.А., Шангина Н.Н. Физико-механические основы нетвердеющих минеральных дисперсий для санации металлических элементов подземных сооружений // Фундаментальные исследования, № 7-1, 2016. С. 14-18.
25. Józwiak-Niedźwiedzka D., Gibas K., Brandt A.M., Glinicki M.A., Dąbrowski M., Denis P. Mineral Composition of Heavy Aggregates for Nuclear Shielding Concrete in Relation to Alkali-silica Reaction // Procedia Engineering, 2015. pp. 162-169.
26. Савельев А.К. Геология баритовых месторождений. Москва: Недра, 1978. 190 с.
27. Горная энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1984. 202-203 с.
28. Chen T.J. Investigating of barite shielding boards for radiation protection // DEStech Transactions on Environment Energy and Earth Science, 2017. pp. 225-229.
29. Esen Y., Polat Y. An investigation of X-ray and radio isotope energy absorption of heavyweight concretes containing barite // Bulletin of Materials Science, Vol. 34(1), 2011. pp. 169-175.
30. Patent №WO2016202291A1 China. Chang Ming-Chuan, Chen Wei-Lin, Liu Yuan-Hao. Shielding material for shielding radioactive ray and preparation method thereof, publ. 22.12.2016.

31. Patent №CN109293316A China, Bian Zhouhong, Hu Lin, Liu Dong, Barite concrete, publ. 01.02.2019.
32. Patent №CN100999401A China. Yongsheng Gao, Lv Qiang. Lv Yan. Lv Yingren. Lv Yingzhi. Protective engineering concrete for weaking proton radiation strength, publ. 18.07.2007.
33. Patent №CN103803901A China. Chen Dong, Liu Dengxian, Wu Xin. Barite anti-radiation pump concrete, publ. 21.05.2014.
34. Патент №2235079. Болтышев С. А., Королев Е. В., Прошин А. П., Королева О.В. Филиппов Г. А. Вяжущее для изготовления радиационно-защитных строительных материалов. Опубл. 27.08.2004.
35. Патент №2388715. Гончаров Ю. Д., Рыжов А. С. Сухая строительная смесь. Опубл. 10.05.2010. Бюл. №13.
36. Патент №2529031. Пустовгар А.П., Теличенко В.И., Егорычев О.О., Лейбман М.Е., Генералов В.Н., Лавданский П.А., Веденин А.Д. Композиция радиационно - защитного бетона. Опубл. 27.09.2014. Бюл. №27.
37. Patent №JP2011042530A Japan. Higo Yasuhide, Yoshimoto Minoru. Flexible heavyweight concrete and flexible concrete structure, publ. 03.03.2011.
38. Patent №JP2013147391A Higo Yasuhide, Sugiyama Akinori. Cement composition and cement-based hardened body, publ. 01.08.2013.
39. Patent №EP18185856A Switzerland. Fritz Bertram, Jernei Michael, Stotzel Timo. Publ. 30.01.2020.
40. Patent №EP0915071A2 Germany. Bechert Bertold, Huemmer Wolfgang, Schwartz Manfred, Wiese Harm Dr, Zhao Cgeng-Li. Use of aqueous preparations containing a copolymer P as a film forming component. Publ. 12.05.1999.
41. Mungpayaban H., Rindhatayathon P., Ninlaphruk S., Rueanngoen A., Ekgasit S., Pengprecha S. X-ray protective materials from barium sulfate/amorphous cellulose/natural rubber composites // Radiation Physics and Chemistry, Vol. 194, 2022.

42. Тараненкова В.В., Шабанова Г.Н. Получение жаростойкого барийсо-державшего портландцементна на основе сырьа ПАО “Криворожский цементный завод” // Збірник наукових праць ПАТ «УКРНДІ ВОГНЕТРИВІВ ІМ. А. С. БЕРЕЖНОГО», № 115, 2015. С. 145-153.
43. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Лукьяненко В.Ю., Михайлова А.Ф., Русских И.М., Селезнев Е.Н., Козлов А.В. Оптимизация состава радиационной защиты // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика., № 4, 2015. С. 36-42.
44. Daungwilailuk , Yenchai C., Rungjaroenkitti W., Pheinsusom P., Panwisawas C., Pansuk W. Use of barite concrete for radiation shielding against gamma-rays and neutrons // Construction and Building Materials, Vol. 326, 2022.
45. Akkurt I., Basyigit C., Kilincarslan S., Mavi B. The shielding of  $\gamma$ -rays by concretes produced with barite // Progress in Nuclear Energy, Vol. 46, No. 1, 2005. pp. 1-11.
46. Saidani K., Ajam L., Ouezdou M.B. Barite powder as sand substitution in concrete: Effect on some mechanical properties // Construction and Building Materials, Vol. 95, 2015. pp. 287-295.
47. Kilincarslan S., Akkurt I., Basyigit C. The effect of barite rate on some physical and mechanical properties of concrete // Materials Science and Engineering: A, Vol. 424, No. 1-2, 2006. pp. 83-86.
48. Janković K., Stanković S., Bojović D., Stojanović M., Antić L. The influence of nano-silica and barite aggregate on properties of ultra high performance concrete // Construction and Building Materials, Vol. 126, 2016. pp. 147-156.
49. Topçu İ.B. Properties of heavyweight concrete produced with barite // Cement and Concrete Research, Vol. 33, No. 6, 2003. pp. 815-822.
50. Azreen N.M., Rashid R.S.M., Mugahed Amran Y.H., Voo Y.L., Haniza M., Hairie M., Alyousef R., Alabduljabbar H. Simulation of ultra-high-performance concrete mixed with hematite and barite aggregates using Monte Carlo for dry cask storage // Construction and Building Materials, Vol. 263, 2020.

51. Masoud M.A., Kansouh W.A., Shahien M.G., Sakr K., Rashad A.M., Zayed A.M. An experimental investigation on the effects of barite/hematite on the radiation shielding properties of serpentine concretes // *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 120, 2020.
52. Gökçe H.S., Öztürk B.C., Çam N.F., Andiç-Çakır Ö. Natural radioactivity of barite concrete shields containing commonly used supplementary materials // *Construction and Building Materials*, Vol. 236, 2020.
53. Becker F., Köhnke D., Reichardt M., Budelmann. Investigation of various concrete compositions with respect to gamma-radiation transmission properties of Cs-137 // *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 171, 2020.
54. Shams T., Eftekhar M., Shirani A. Investigation of gamma radiation attenuation in heavy concrete shields containing hematite and barite aggregates in multi-layered and mixed forms // *Construction and Building Materials*, Vol. 182, 2018. pp. 35-42.
55. Gökçe H.S., Yalçınkaya Ç., Tuyan M. Optimization of reactive powder concrete by means of barite aggregate for both neutrons and gamma rays // *Construction and Building Materials*, Vol. 189, 2018. pp. 470-477.
56. Çullu M., Ertaş H. Determination of the effect of lead mine waste aggregate on some concrete properties and radiation shielding // *Construction and Building Materials*, Vol. 125. pp. 625-631.
57. Waly E.S.A., Bourham M.A. Comparative study of different concrete composition as gamma-ray shielding materials // *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 85, 2015. pp. 306-310.
58. Ouda A.S. Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding // *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 79, 2015. pp. 48-55.
59. Mostofinejad D., Reisi M., Shirani A. Mix design effective parameters on  $\gamma$ -ray attenuation coefficient and strength of normal and heavyweight concrete // *Construction and Building Materials*, Vol. 28, No. 1, 2012. pp. 224-229.

60. Akkurt I., Basyigit C., Kilincarslan S., Mavi B., Akkurt A. Radiation shielding of concretes containing different aggregates // *Cement and Concrete Composites*, Vol. 28, No. 2, 2006. pp. 153-157.
61. Калашников В.И., Демьянова В.С., Калашников Д.В., Махамбетова К.Н. Оптимизация состава особо тяжелого высокопрочного бетона для защиты от радиации // *Строительные материалы*, № 8, 2011. С. 25-28.
62. Грикевич Л.Н. Барийсодержащий портландцемент, технология его получения и исследование строительно-технических свойств: дис. ... канд. тех. наук: 05.350 / М. НИИЦЕМЕНТ, 1970.
63. Дубровский В.Б., Аблевич З. Строительные материалы и конструкции защиты от ионизирующих излучений. М.: Стройиздат, 1983. 240 с.
64. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. 4-е-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1995. 496 с.
65. Комаровский А.Н. Строительство ядерных установок. Москва: Атомиздат, 1969. 503 с.
66. Прошин А.П., Демьянова В.С., Калашников Д.В. Особо тяжелый высокопрочный бетон для защиты от радиации с использованием вторичных ресурсов. Пенза: ПГАСА, 2004. 140 с.
67. Гришина А.Н., Королев Е.В. Жидкостекольные строительные материалы специального назначения. М.: МГСУ, 2015. 224 с.
68. Хонг Ч.Л., Чумаков Л.Д. Особотяжелые бетоны для защиты от радиационных излучений // *Строительство - формирование среды жизнедеятельности: материалы конференции*, 2006. С. 298-299.
69. Батаршин В.О., Федюк Р.С., Струк К.В., Бутенко Ю.В. Фундаментальные основы строительного материаловедения. Сборник докладов Международного онлайн-конгресса, 2017. С. 258-267.
70. Хонг Ч.Л., Чумаков Л.Д. Деформативные свойства особо тяжелого самоуплотняющегося бетона // *Вестник МГСУ*, Т. 2, 2011. С. 259-261.
71. Комаровский А.Н. Защитные свойства строительных материалов. М.: Атомиздат, 1971.

72. Tourasse M. The Heavy Concretes-Physical Properties and Mechanical Tests // Second united Nation International Conference on the peaceful Uses of Atomic Energy. Geneva. 1958.

73. Дубровский В.Б., Лавданский П.А., Енговатов И.А. Строительство атомных электростанций. М.: АСВ, 2010. 368 с.

74. Чан Ле Хонг. Особотяжёлый самоуплотняющийся бетон на баритовом заполнителе: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / Чан Ле Хонг. М. МГСУ, 2011. 121 с.

75. Lo Monte F., Gambarova P.G. Thermo-mechanical behavior of baritic concrete exposed to high temperature // Cement and Concrete Composites, Vol. 53, 2014. pp. 305-315.

76. Beaucour A.L., Pliya P., Faleschini F., Njinwoua R., Pellegrino C., Noumowé A.N. Influence of elevated temperature on properties of radiation shielding concrete with electric arc furnace slag as coarse aggregate // Construction and Building Materials, Vol. 256, 2020.

77. Rashid R.S.M., Salem S.M., Azreen N.M., Voo Y.L., Haniza M., Shukri A.A., Yahya M.S. Effect of elevated temperature to radiation shielding of ultra-high performance concrete with silica sand or magnetite // Construction and Building Materials, Vol. 262, 2020.

78. Demir İ., Gümüş M., Gökçe H.S. Gamma ray and neutron shielding characteristics of polypropylene fiber-reinforced heavyweight concrete exposed to high temperatures // Construction and Building Materials, Vol. 257, 2020.

79. Рабтнович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1977. 55 с.

80. Раманкулов М.Р. Исследование условий получения и свойств цементов, содержащих добавки окисей бария, стронция, кадмия, титана и бора: дис. ... канд. тех. наук / М. Московский химико-технологический институт им. Д. И. Менделеева, 1964.

81. Тимошенко Т.И., Худасов В.И. Влияние добавок ZnO и BaSO<sub>4</sub> на строительно-технические свойства низкоосновных белых цементов // Строительные материалы и изделия, Т. 1, № 3, 2018. С. 17-24.

82. Разинькова Н.Е. Комплексное применение барийсодержащих отходов в технологии цемента: дис. ... канд. тех. наук: 05.17.11 / Разинькова Надежда Егоровна. Белгород. БелГТАСМ, 1996. 143 с.
83. Zezulová A., Staněk T., Opravil T. The Influence of Barium Sulphate and Barium Carbonate on the Portland Cement // *Procedia Engineering*, No. 151, 2016. pp. 42 – 49.
84. Дейнека В.В. Исследование возможности получения композиционных материалов специального назначения // *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы*, № 1(4), 2013. С. 272-274.
85. Гришина А.Н., Королев Е.В. Структурообразование и свойства композиции «жидкое стекло — хлорид бария» для изготовления радиационно-защитных строительных материалов // *Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура*, № 4 (16), 2009. С. 70-77.
86. Гришина А.Н. Структура и свойства радиационно-защитных жидкостекольных композиционных материалов повышенной плотности: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / Гришина Анна Николаевна. Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2010. 230 с.
87. Гришина А.Н., Королёв Е.В. Выбор технологии радиационно-защитных материалов на основе силикатов или гидросиликатов тяжёлых металлов // *Научно-практический Интернет-журнал «Наука. Строительство. Образование»*, № 2, 2011. 3 с.
88. Гришина А.Н., Сатюков А.Б. Структурообразование наноразмерных гидросиликатов бария для цементных композитов // *Интернет-вестник ВолгГАСУ*, № 2 (33), 2014. 4 с.
89. Сатюков А.Б., Гришина А.Н. Радиационно-защитные свойства комплексного вяжущего с применением гидросиликатов бария // *Materials of the International Scientific and Practical Conference “Science and education-2014”*, Vol. 18, 2014. pp. 37–40.



90. Сатюков А.Б. Наномодифицированное композиционное вяжущее для специальных строительных растворов: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / Сатюков Антон Борисович. Пенза. ПГУАС, 2015. 228 с.
91. Гришина А.Н., Королёв Е.В. Эффективность модифицирования цементных композитов наноразмерными гидросиликатами бария // Строительные материалы., № 2, 2015. С. 72-76.
92. Гришина А.Н., Еремин А.В. Влияние гидросиликатов бария на интенсивность ранней гидратации портландцемента // Неорганические материалы., Т. 52, № 9, 2016. С. 1040-1044.
93. Пат. 2187388 С1 Россия. МПК В07В 9/00. Способ обогащения баритовой руды / В. В. Иванов. Заявлено 2001.01.10. Опубликовано 2002.08.20.
94. Фишман М.А. Технология полезных ископаемых. Москва: Металлургиздат, 1955. 736 с.
95. Рыжков А.В., Корешков Н.Г. Современное состояние минерально-сырьевой базы барита и новые требования к баритовым утяжелителям буровых растворов // Нефть. Газ. Новации, № 11 (20), 2020. С. 33-36.
96. Боярко Г.Ю., Хатьков В.Ю. Обзор состояния производства и потребления баритового сырья в России. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, Т. 332, № 10, 2021. С. 180-191.
97. Новиков Н.В., Самченко С.В., Окольников Г.Э. Баритсодержащие радиационно-защитные строительные материалы // Вестник российского университета дружбы народов. Серия: инженерные исследования., Т. 21, № 1, 2020. С. 94-98.
98. Новиков Н.В. Получение гидросиликатов бария для создания радиационно-защитных // Материалы Межвузовского научного конгресса (г. Москва, 31 декабря 2019 г.). Москва. 2019. С. 160.
99. Самченко С.В., Новиков Н.В. Разработка барийсодержащих ячеистых бетонов специального назначения. // В сборнике: Актуальные проблемы строительной отрасли и образования - 2021. Сборник докладов Второй Национальной научной конференции. Москва, 2022. С. 272-275.

100. Новиков Н.В. Барийсодержащая добавка для композиционного материала // В сборнике: ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В XXI ВЕКЕ. Материалы XXI Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л.П. Кулёва и Н.М. Кижнера, посвященной 110-летию со дня рождения профессора А.Г. Стромберга. Томск, 2020. С. 108-109.

101. Новиков Н.В. Влияние барийсодержащей добавки на физико-механические свойства цемента // В сборнике: Химия и химическая технология в XXI веке. Материалы XXII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л.П. Кулёва и Н.М. Кижнера, посвященной 125-летию со дня основания Томского политехнического университета. В 2-х томах. Томск, 2021. С. 98-99.

102. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов (перевод с немецкого). М.: Мир, 1977. 552 с.

103. Алфимова Н.И., Пириева С.Ю., Федоренко А.В., Шейченко М.С., Вишневская Я.Ю. Современные тенденции развития радиационно-защитного материаловедения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова., № 4, 2017. С. 20-25.

104. Турдубаева Ж.А., Ташполотов Ы.Т. Влияние фракционного состава барита Тоо-Моюнского месторождения на эффективность защиты от радиационного излучения // Бюллетень науки и практики, Т. 4, № 2, 2018. С. 28-33.

105. Черных Т.Н., Перминов А.В., Пудовиков В.Н., Крамар Л.Я. Сухие баритосодержащие смеси для защиты от ионизирующих излучений // Сухие строительные смеси, № 1, 2012. С. 28-29.

106. Самченко С.В., Давидюк А.Н., Новиков Н.В. Влияние дисперсности барийсодержащей добавки для радиационно-защитных композиционных материалов на физико-механические свойства цемента // Техника и технология силикатов, Т. 28, № 3, 2021. С. 95-100.

107. Самченко С.В., Новиков Н.В. Изучение влияние тонкомолотой барийсодержащей добавки на свойства композиционного материала. // В сборнике: Сборник материалов II Всероссийской научной конференции, посвящённой столетнему юбилею Московского государственного строительного университета МИСИ – МГСУ (г. Москва, 18–19 ноября 2021 г.) / Москва : Издательство МИСИ – МГСУ, 2021. С. 38-42.

108. Черкасов В.Д., Емельянов А.И. Пенообразователь из продуктов микробного синтеза для получения пенобетонов // Известия высших учебных заведений. строительство, № 12 (732), 2019. С. 24-31.

109. Бузулуков И., Черкасов Д., Емельянов И., Сыркина П., Гарцева С.О. Белковый пенообразователь для пенобетонов // Известия высших учебных заведений. Строительство, № 7 (655), 2013. С. 23-27.

110. Новиков Н.В. Изучение совместного влияния порообразователя и тонкомолотой барийсодержащей добавки на свойства цементной матрицы. // В сборнике: Химия и химическая технология в XXI веке. Материалы XXIII Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л.П. Кулёва и Н.М. Кижнера. В 2-х томах. Томск, 2022. С. 124-126.

111. Alarcon-Ruiz L., Platret G., Massieu E., Ehrlacher A. The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste // Cement and Concrete Research, Vol. 35, No. 3, 2005. pp. 609-613.

112. Галкин Ю.Ю., Удодов С.А. Фазовый анализ структуры цементного камня, изолированного при его раннем нагружении // Транспортные сооружения, Т. 5, № 1, 2018. [Электронный ресурс], URL <https://t-s.today/PDF/21SATS118.pdf> (дата обращения: 15.07.2022)

113. Aguilar-Santillan J. Wetting of  $Al_2O_3$  by Molten Aluminum: The Influence of  $BaSO_4$  Additions // Journal of Nanomaterials, 2008.

114. L'vov B.V., Ugolkov V.L. Kinetics of free-surface decomposition of magnesium and barium sulfates analyzed thermogravimetrically by the third-law method // Thermochimica Acta, Vol. 411, No. 1, 2004. pp. 73-79.

115. Новиков Н.В. Влияние температурных воздействий на свойства барийсодержащего ячеистого материала // В сборнике: ХИМИЯ И ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В XXI ВЕКЕ. Материалы XXIV Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л.П. Кулёва и Н.М. Кижнера, посвященной 85-летию со дня рождения профессора А.В. Кравцова. Томск, 2023. С. 139-141.

116. Балясников В.В. Пенобетон на модифицированных синтетических пенообразователях: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / Балясников Виктор Викторович. Белгород. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2003. 235 с.

117. Баранова А. Влияние пенообразователей на свойства цементного теста // Сборник научных трудов ангарского государственного технического университета, Т. 1, № 1, 2012. С. 116-118.

118. Шахова Д. Технология пенобетона. Москва: Ассоц. строительных вузов, 2010. 248 с.

119. Новиков Н.В. Влияние барийсодержащей добавки на свойства ячеистых бетонов // В сборнике: АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ И ОБРАЗОВАНИЯ - 2022. Сборник докладов Третьей Национальной научной конференции. Москва, 2023. С. 178-183.

120. Самченко С.В., Новиков Н.В. Влияние барит содержащей добавки на свойства ячеистых бетонов // Техника и технология силикатов. – 2022. – Т. 29, № 4, С. 335-341.

121. Королев А.С., Волошин Е.А., Трофимов Б.Я. Повышение прочностных и теплоизоляционных свойств ячеистого бетона путем направленного формирования вариатропной структуры // Строительные материалы, № 5, 2005. С. 8-10.

122. Патент № 2003116323/03(017396). Королев А.С., Волошин Е.А., Трофимов Б.Я., Шаимов М.Х., Кузьменко С.А. Способ изготовления вариатропных ячеистобетонных изделий. Опубл. 27.12.2004. Бюл. № 36.

123. Ле Во Фу Тоан, Ву Ким Зиен. Способы производства вариатропных ячеистых бетонов // Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры (ИСА) НИУ МГСУ, 2022. С. 545-547

124. Булавин В.А. Газобетон для монолитных ограждающих конструкций с вариатропной поровой структурой: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / Булавин Виктор Анатольевич. Ростов-на-Дону. Ростовский государственный строительный университет, 2003. 145 с.

125. Шорстов Р.А., Сулейманова Л.А., Кара К.А. Технологии получения многослойных конструкций вариатропной структуры // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, № 4, 2019. С. 32-39.

126. Бруяко М.Г., Баженова С.И., Ву К.З. Ячеистые бетоны с вариатропной структурой на стадии формования изделия // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, № 7, 2022. С. 8-18.

127. Патент № 213750. Бруяко М.Г., Баженова С.И. Ву Ким Зиен. Строительный блок из вариотропного ячеистого бетона. Оpubл. 28.09.2022. Бюл. №28.

128. Большаков В.И., Мартыненко В.А. Строительные материалы и изделия, Т. 2, № 1, 2004. С. 13-15.

129. Ву Ким Зиен. Ячеистые бетоны с использованием плазмомодифицированного доменного шлака: дис. ... канд. тех. наук: 2.1.5 / Ву Ким Зиен. М. МГСУ, 2022. 168с.

130. Гаврилова Н.Н., Назаров В.В., Яровая О.В. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов. Москва: Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева, 2012. 54 с.

131. Костылев В.А., Наркевич Б.Я. Медицинская физика. М.: Медицина, 2008. 464 с.

132. Reda S.M., Saleh H.M. Calculation of the gamma radiation shielding efficiency of cement-bitumen portable container using MCNPX code // Progress in Nuclear Energy, Vol. 142, 2021.

133. Cherkashina N., Gavrish V., Chayka T. Experiment – calculated investigation of composite materials for protection against radiation // *MaterialsToday: Proceedings*, Vol. 11, No. 1, 2019. pp. 554-560.

134. Аладаилах М.В., Ширманов И.А., Стругов Е.Д., Климова В.А., Ташлыков О.Л. Об использовании бетонов с добавлением барита для защиты от гамма-излучения 2021. С. 425-428.

135. Соколенко В., Ястребинский Н., Матюхин В., Иваницкий А. Разработка радиационно-защитного композита для защиты от гамма-излучения // *Успехи современного естествознания*, № 10, 2015. С. 40-43.

136. Şensoy A.T., Gökçe H.S. Simulation and optimization of gamma-ray linear attenuation coefficients of barite concrete shields // *Construction and Building Materials*, Vol. 253, 2020.

137. Янкович К., Станкович С.Й., Стоянович М., Бойович Д., Антич Л. Влияние нанокремнезёма и типа заполнителя на свойства высокопрочного бетона. // *Цемент и его применение*, № 4, 2017. С. 118-120.

138. Sayyed M., Askin A., Zaid M., Olukotun S., Khandaker M.U., Tishkevich D.I., Bradley D. Radiation shielding and mechanical properties of  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O-TiO}_2\text{-ZnO-TeO}_2$  glass system // *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 186, 2021.

139. Zayed A.M., Masoud M.A., Rashad A.M., El-Khayatt A.M., Sakr K., Kansouh W.A., Shahien M.G. Influence of heavyweight aggregates on the physico-mechanical and radiation attenuation properties of serpentine-based concrete // *Construction and Building Materials*, Vol. 260, 2020.

140. Lakshminarayana G., Kumar A., Dong M., Sayyed M., Long N.V., Mahdi M. Exploration of gamma radiation shielding features for titanate bismuth borotellurite glasses using relevant software program and Monte Carlo simulation code // *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 481, 2018. pp. 65-73.

141. Baltas H., Sirin M., Celik A., Ustabas I., El-Khayatt A. Radiation shielding properties of mortars with minerals and ores additives // *Cement and Concrete Composites*, Vol. 97, 2019. pp. 268-278.

142. Kunchariyakun K., Sukmak P. Utilization of garnet residue in radiation shielding cement mortar // *Construction and Building Materials*, 2020.
143. Yılmaz E., Baltas H., Kırıs E., Ustabas İ., Cevik U., El-Khayatt A.M. Gamma ray and neutron shielding properties of some concrete materials // *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 38, No. 10, 2011.
144. Черкасов В.Д., Юркин Ю.В., Сунцов Д.Л., Корнеев М.А., Щекутьев К.В. Техничко-экономическое сравнение конструктивных решений радиационной защиты от рентгеновского излучения // *Инженерный вестник Дона*, № 1 (73), 2021. С. 230-243.
145. Самченко С.В., Бруяко М.Г., Новиков Н.В. Радиационно-защитные свойства ячеистого баритсодержащего бетона // *Строительные материалы*. 2023. № 8. С. 42–47.
146. Самченко С.В., Бруяко М.Г., Новиков Н.В. Патент на полезную модель 219191 U1, 04.07.2023. Заявка № 2023108746 от 07.04.2023
147. Томас Егер. Бетон в технике защиты от излучений. Москва: Атомиздат, 1960. 92 с.
148. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. Киев: Наукова думка, 1975. 414 с.
149. Berger M.J., Hubbell J.H., Seltzer S.M., Chang J., Coursey J.S., Sukumar R., Zucker D.S., Olsen. XCOM: Photon Cross Sections Database. 2009.
150. El-Khayatt A.M. NXcom – A program for calculating attenuation coefficients of fast neutrons and gamma-rays // *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 38, No. 1, 2011. pp. 128-132.
151. Gerward L., Guilbert N., Jensen K.B., Levring H. WinXCom—a program for calculating X-ray attenuation coefficients // *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 71, No. 3-4, 2004. pp. 653-654.
152. El-Khayatt A.M., El-Sayed Abdo A. MERCSF-N: A program for the calculation of fast neutron removal cross sections in composite shields // *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 36, No. 6, 2009. pp. 832-836.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. РЕКОМЕНДАЦИИ**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬ-  
НЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ**

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор

А.З. Тер-Мартirosян

13» апреля 2023г.

**Рекомендации по изготовлению радиационно-защитных блоков неравномерной структуры из баритсодержащего пеногазобетона****1) Область применения.**

Настоящие рекомендации распространяются на состав бетонной смеси, требования к исходным сырьевым материалам и технологию производства пеногазобетонных блоков переменной плотности для защиты от ионизирующих излучений.

Пеногазобетонные блоки переменной плотности характеризуются повышенными физико-механическими характеристиками, за счёт увеличения плотности от центральной части к граням и возможности формирования участков повышенной плотности в наиболее нагруженных зонах. При снижении плотности в слабо нагруженных зонах изделия удаётся добиться пониженной средней плотности изделия без ухудшения прочностных показателей.

Улучшение радиационно-защитных свойств изделия достигается за счёт применения в виде наполнителя высокодисперсного баритового концентрата. Такие изделия могут быть применены для устройства конструкций при необходимости ослабления интенсивности нейтронного излучения, а также рентгеновского и  $\gamma$ -излучения мощностью до 3 МэВ.

**2) Эффективность применения радиационно-защитных блоков неравномерной структуры из баритсодержащего пеногазобетона.**

Использование радиационно-защитных блоков неравномерной структуры из баритсодержащего пеногазобетона позволяет добиться следующих показателей:

- Снижение веса ограждающей конструкции при сохранении эффективности ослабления рентгеновского и  $\gamma$ -излучения мощностью 0,02-0,1 МэВ на 28-59%; при мощности 0,2-3 МэВ на 2-8%;



- Увеличение полного макроскопического сечения взаимодействия с нейтронами на 40%;

- Обеспечение равномерного ослабления интенсивности ионизирующих излучений по площади экранирующей конструкции за счёт формирования более плотной структуры у стенок блока, в матрице которых сосредотачивается большее количество барита, чем в центре.

- Увеличение прочности изделия при сжатии по сравнению с ячеистым бетоном равномерной структуры на 13% при сохранении средней плотности.

### 3) Требования к материалам для приготовления бетонных смесей.

-В качестве вяжущего рекомендуется применять бездобавочный портландцемент ЦЕМ I 42,5 М500 Д0 по ГОСТ 31108-2020 (Цементы общестроительные. Технические условия).

-В качестве инертной минеральной добавки для улучшения радиационно-защитных свойств рекомендуется применять баритовый концентрат КБ-3, предварительно измельчённый до достижения удельной поверхности  $830 \text{ м}^2/\text{кг}$  по ГОСТ 4682-84 (Концентрат баритовый. Технические условия).

-В качестве пенообразователя рекомендуется применять пенообразователь на основе белков микробного синтеза.

-В качестве газообразователя рекомендуется применять алюминиевую пудру марки ПАП-1 по ГОСТ 5494-2022 (Пудра алюминиевая. Технические условия).

-В качестве ускорителя реакции газообразователя рекомендуется применять фтористый натрий по ГОСТ 4463-76 (Реактивы. Натрий фтористый. Технические условия).

-Для улучшения физико-механических характеристик рекомендуется использовать кварцевый песок фр. 0,63-1,25 мм по ГОСТ 8736-2014 (Песок для строительных работ. Технические условия).

-Вода по ГОСТ 23732-2011 (Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия).

### 4) Составы смесей.

При изготовлении радиационно-защитных блоков неравномерной структуры из баритсодержащего пеногазобетона необходимо соблюдать следующий расход компонентов:

| №  | Компонент            | Расход компонентов на $1 \text{ м}^3$ пеногазобетонной смеси, кг |
|----|----------------------|--|
| 1. | Портландцемент       | 595  |
| 2. | Песок                | 230  |
| 3. | Баритовый концентрат | 100  |
| 4. | Алюминиевая пудра    | 3  |
| 5. | Фтористый натрий     | 3  |
| 6. | Пенообразователь     | 8  |
| 7. | Вода                 | 250  |

#### 5) Технологическая последовательность изготовления изделий.

При изготовлении радиационно-защитных блоков неравномерной структуры из баритсодержащего пеногазобетона необходимо придерживаться следующей технологической последовательности:

- Баритовый концентрат измельчается в шаровой мельнице до достижения удельной поверхности  $830 \text{ м}^2/\text{кг}$ .
- Измельченный баритовый концентрат, песок и портландцемент тщательно перемешиваются до получения однородной сухой смеси.
- При помощи пеногенератора изготавливается строительная пена из 3-% раствора пенообразователя.
- Сухая смесь перемешивается со строительной пеной до однородного состояния. Сухая смесь медленно подаётся через дозатор для предотвращения разрушения ячеистой структуры пены.
- В полученную пенобетонную смесь добавляется алюминиевая пудра и фтористый натрий. Производится перемешивание в течении 1 минуты.
- Полученная смесь укладывается в формы с перфорационными отверстиями.
- После изготовления изделия хранят в формах, покрытых влажной тканью или другим материалом, исключая испарение из них влаги, в помещении с температурой воздуха  $(20 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 24 часов. После того, как пеногазобетонные изделия достигают распалубочной прочности они извлекаются из форм и помещаются в камеру с нормальным тепло-влажностным режимом до достижения марочной прочности.
- Готовые изделия проверяются на соответствие требуемым эксплуатационным показателям.

#### 6) Хранение и транспортировка.

Пеногазобетонные блоки следует хранить на плоской поверхности в помещении, защищенном от атмосферных осадков и прямых солнечных лучей. Не допускается хранение блоков на влажной поверхности. Рекомендуется установка блоков на поддон для предотвращения их увлажнения. Блоки необходимо хранить в горизонтальном положении штабелями не более чем в 3 ряда, чтобы избежать деформаций.

Перед транспортировкой необходимо плотно закрепить блоки на поддонах или в контейнерах и обеспечить между ними достаточный зазор, чтобы предотвратить их повреждение из-за вибраций и соударения во время транспортировки. Блоки должны быть укрыты и защищены от прямого солнечного света и атмосферных осадков. При загрузке и разгрузке блоков используется специальное оборудование, такое как подъемные краны или тележки, чтобы избежать повреждения блоков.

#### 7) Техника безопасности и охрана труда.

К выполнению формовочных работ допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие медицинский осмотр, обученные безопасным методам производства работ, прошедшие инструктаж по технике безопасности.



Концентрация вредных веществ в воздухе рабочей зоны, его температура, влажность и скорость движения не должны превышать установленных ГОСТ 12.1.005. Во всех производственных помещениях следует устраивать естественную, искусственную или смешанную вентиляцию, обеспечивающую чистоту воздуха.

«Рекомендации по изготовлению радиационно-защитных блоков неравномерной структуры из баритсодержащего пеногазобетона» утверждены на заседании секции 2.2 отделения 2 Технология производства строительных материалов и изделий Научно-технического совета (НТС) НИУ МГСУ, протокол № 1 от 12.04.2023.



**Разработано:**  
Самченко Светлана Васильевна  
Академик РИА,  
доктор технических наук, профессор



Новиков Николай Владиславович  
Аспирант

Руководитель секции  
Доктор технических наук



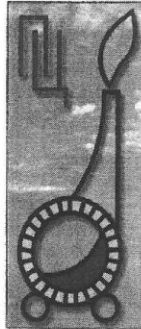
**Утверждено:**  
Бурьянов Александр Федорович

Секретарь секции  
Кандидат политических наук



Алпацкий Дмитрий Геннадьевич

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б. АКТ О ПРОВЕДЕНИИ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ



### АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

### "ПОДОЛЬСК – ЦЕМЕНТ"

142101, Московская область, г. Подольск, ул. Плещеевская, д.15.  
Тел./факс (495) 502-79-35, 502-79-34, (4967) 65-08-98, 65-09-00 (02)

[www.podolsk-cement.ru](http://www.podolsk-cement.ru), E-mail: [cmt\\_7@mail.ru](mailto:cmt_7@mail.ru), [info@podolsk-cement.ru](mailto:info@podolsk-cement.ru)  
ОГРН 1025004708288, ИНН 5036013250, КПП 503601001

УТВЕРЖДАЮ:



Заместитель директора  
АО «Подольск-Цемент»  
Новиков П.П.  
\_\_\_\_\_ 2023г.

### АКТ

#### о проведении опытно-промышленных испытаний радиационно-защитных блоков неравномерной структуры из баритсодержащего пеногазобетона

Комиссия в составе представителей АО «Подольск-Цемент» заместителя директора Новикова П.П. и членов комиссии: заведующей лабораторией по контролю качества Малофеевой Т.А. и начальника бетонного узла Олейникова Н.А., а также представителей НИУ МГСУ кафедры Строительного материаловедения доктора технических наук, профессора Самченко С.В., аспиранта Новикова Н.В. составили настоящий акт о том, что на производственной площадке АО «Подольск-Цемент» (бетонный узел) была изготовлена опытно-промышленная партия радиационно-защитных блоков неравномерной ячеистой структуры из баритсодержащего пеногазобетона.

Баритсодержащую добавку получали посредством измельчения баритового концентрата КБ-3 в шаровой мельнице в течении 60 минут. Цементно-баритовая смесь укладывалась в перфорированные опалубочные формы с коэффициентом перфорации  $K_{\text{перф}} = 0,0137$ . Объем партии составил  $10,8\text{ м}^3$ . Полученные блоки из баритсодержащего пеногазобетона выдерживались в течение 28 дней при нормальном тепло-влажностном

режиме. Средняя плотность образцов составила  $1342 \text{ кг/м}^3$ . Прочность образцов при сжатии на 28 сутки составила  $12,96 \text{ МПа}$ .

Радиационно-защитные свойства баритсодержащих пеногазобетонных блоков вариотропной структуры определяли аналитическими методами. Полученные пеногазобетонные блоки позволяют экранировать излучение мощностью  $0,02-0,1 \text{ МэВ}$ . Применением подобных блоков в этом диапазоне мощностей можно добиться снижения массы ограждающей конструкции на  $28-59\%$ . При мощности излучения  $0,2-3 \text{ МэВ}$  снижение массы составляет  $2-8\%$ .

В связи с изложенным комиссия считает возможным и целесообразным применение блоков с вариотропной ячеистой структурой из баритсодержащего пеногазобетона для защиты от ионизирующих излучений при снижении массы ограждающих конструкций.


От АО «Подольск-Цемент»

  
Малофеева Т.А.

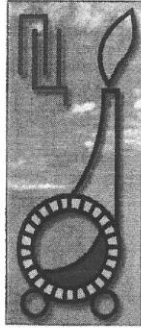
  
Олейников Н.А.

От НИУ МГСУ  
кафедры Строительного материаловедения

  
Самченко С.В.

  
Новиков Н. В.

# ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ



## АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "ПОДОЛЬСК – ЦЕМЕНТ"

142101, Московская область, г. Подольск, ул. Плещеевская, д.15.  
Тел./факс (495) 502-79-35, 502-79-34, (4967) 65-08-98, 65-09-00 (02)

[www.podolsk-cement.ru](http://www.podolsk-cement.ru), E-mail: [cmt\\_7@mail.ru](mailto:cmt_7@mail.ru), [info@podolsk-cement.ru](mailto:info@podolsk-cement.ru)  
ОГРН 1025004708288, ИНН 5036013250, КПП 503601001



УТВЕРЖДАЮ:

Заместитель директора  
АО «Подольск-Цемент»

Новиков П.П.

2023г.

### АКТ

#### о внедрении результатов диссертационной работы Новикова Николая Владиславовича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе представителей АО «Подольск-Цемент» заместителя директора Новикова П.П. и членов комиссии: заведующей лабораторией по контролю качества Малофеевой Т.А., ведущего технолога Гутенёвой Л.Ю. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Новикова Н.В. посвященной разработке композиционного баритсодержащего материала для полифункциональных изделий с регулируемой вариотропной ячеистой структурой приняты к внедрению в виде:

1. Оптимизированной технологии приготовления пеногазобетонов с введением механически активированного баритового концентрата.
2. Разработанных рекомендаций по изготовлению радиационно-защитных блоков неравномерной структуры из баритсодержащего пеногазобетона.
3. Результатов экспериментальных исследований влияния механически активированного баритового концентрата на радиационно-защитные,



физико-механические и эксплуатационные свойства ячеистых бетонов вариотропной ячеистой структуры.

4. Оптимальных составов пеногазобетона с повышенными радиационно-защитными, физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Использование полученных результатов позволяет повысить эффективность ослабления нейтронного и  $\gamma$ -излучений низких мощностей и снизить вес ограждающих конструкций, что позволяет решить ряд производственных проблем и улучшить технико-экономические показатели строительства.

Результаты диссертационной работы Новикова Н.В., представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук рассмотрены на научно-техническом совещании АО «Подольск-Цемент» «15» марта 2023 года. Протокол заседания № 8 от «15» марта 2023 г.

От ОАО «Подольск-Цемент»

  
Малофеева Т.А.

  
Гутенёва Л.Ю.

От НИУ МГСУ  
кафедры Строительного материаловедения

  
Самченко С.В.

  
Новиков Н.В.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

**№ 219191**

**Радиационно-защитный строительный блок из  
ячеистого бетона с переменной плотностью**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Национальный исследовательский Московский  
государственный строительный университет" (НИУ  
МГСУ) (RU)*

Авторы: *Самченко Светлана Васильевна (RU), Бруяко Михаил  
Герасимович (RU), Новиков Николай Владиславович (RU)*

Заявка № **2023108746**

Приоритет полезной модели **07 апреля 2023 г.**

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации **04 июля 2023 г.**

Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает **07 апреля 2033 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Ю.С. Зубов*

