

Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова

УДК 691.32

На правах рукописи

**САМОЙЛОВА ТАТЬЯНА ЮРЬЕВНА**

**Разработка технологии производства высокопоризованного  
полистиролбетона для теплоэффективных наружных стеновых панелей**

6D073000 – «Производство строительных материалов, изделий и  
конструкций»

Диссертация на соискание степени  
доктора философии (PhD)

Научные консультанты:

Рахимова Г.М. кандидат технических  
наук, ассоциированный профессор  
Жанабай Н.Ж. кандидат технических наук,  
доцент  
Ильина Л.В. доктор технических наук,  
профессор

Республика Казахстан  
Караганда, 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....</b>	5
<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	6
<b>1 АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ТРЁХСЛОЙНЫХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ И ПОЛИСТИРОЛБЕТОНА.....</b>	11
<b>2 ИССЛЕДОВАНИЕ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ И РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ВЫСОКОПОРИЗОВАННОГО ПОЛИСТИРОЛБЕТОНА .....</b>	16
2.1 Композиционное вяжущее .....	16
2.2 Полистирол .....	23
2.3 Характеристика модификаторов .....	27
2.4 Влияние В/В отношения на свойства высокопоризованного полистиролбетона.....	28
2.5 Многофакторное планирование эксперимента при разработке состава высокопоризованного полистиролбетона.....	30
2.5 Выводы.....	34
<b>3 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОПОРИЗОВАННОГО ПОЛИСТИРОЛБЕТОНА.....</b>	36
3.1 SEM анализ структуры высокопоризованного полистиролбетона.....	36
3.2 Рентгеноспектральный анализ состава цементной матрицы .....	40
3.3 Пористость высокопоризованного полистиролбетона .....	44
3.4 Влияние режима твердения на свойства высокопоризованного полистиролбетона.....	44
3.5 Выводы.....	49
<b>4 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХСЛОЙНЫХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ С ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫМ СЛОЕМ ВЫСОКОПОРИЗОВАННОГО ПОЛИСТИРОЛБЕТОНА.....</b>	51
4.1. Разработанная конструкция трёхслойной панели с теплоизоляционным слоем высокопоризованного полистиролбетона .....	51
4.2 Теплотехнический расчет трёхслойной стеновой панели .....	52
4.3 Расчет прочности трёхслойной стеновой панели .....	54
4.4 Существующая технологическая схема изготовления трёхслойных стеновых панелей .....	55
4.5 Технологическая схема изготовления трёхслойных стеновых панелей со слоем ВППБ .....	56
4.6 Прочностные свойства высокопоризованного полистиролбетона .....	61
4.7 Деформации усадки высокопоризованного полистиролбетона.....	65
4.8 Морозостойкость высокопоризованного полистиролбетона .....	67
4.9 Горючность высокопоризованного полистиролбетона .....	68

4.10 Испытание высокопоризованного полистиролбетона на содержание радионуклидов .....	73
4.11 Выводы .....	75
<b>5 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНОЙ СТЕНОВОЙ ПАНЕЛИ СО СЛОЕМ ВЫСОКОПОРИЗОВАННОГО ПОЛИСТИРОЛБЕТОНА .....</b>	<b>76</b>
5.1 Эффективность применения конструктивного решения трехслойной стеновой панели со слоем высокопоризованного полистиролбетона .....	76
5.2 Экономическая эффективность применения трехслойной стеновой панели со слоем высокопоризованного полистиролбетона .....	96
5.1 Выводы .....	100
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>102</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А .....</b>	<b>110</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....</b>	<b>111</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В .....</b>	<b>112</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....</b>	<b>114</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д .....</b>	<b>144</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Е .....</b>	<b>146</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Ж .....</b>	<b>149</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ З .....</b>	<b>151</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ И .....</b>	<b>153</b>

## **НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

ГОСТ 10181-2014 Смеси бетонные. Методы испытаний

ГОСТ 10180-212 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам

ГОСТ 12730.5-2018 Бетоны. Методы определения водонепроницаемости

ГОСТ 10060-2012 Бетоны. Методы определения морозостойкости

ГОСТ 31108-2020 Цементы общестроительные. Технические условия

ГОСТ 5382-2019 Цементы и материалы цементного производства. Методы химического анализа

ГОСТ 3476-2019 Шлаки доменные и электротермофосфорные гранулированные для производства цементов

ГОСТ 7076-99 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме

ГОСТ 12730.4-2020 Бетоны. Методы определения пористости

ГОСТ 31310-2015 Панели стеновые трехслойные железобетонные с эффективным утеплителем. Технические условия

ГОСТ 24544-2020 Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести

ГОСТ 30244-94 Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть

ГОСТ 30108-94 Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов

## **ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ**

В настоящей диссертации применяются следующие обозначения и сокращения:

ВППБ – высокопоризованный полистиролбетон

БС – бетонная смесь

ТВО – тепловлажностная обработка

МДШ – молотый доменный шлак

ППС - пенополистирол

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Основными направлениями развития в области науки Республики Казахстан на 2024-2026 г. отмечены: «Экология, окружающая среда и рациональное природопользование», «Энергия, передовые материалы и производство» [1].

В Послании главы государства Касым-Жомарта Токаева «Экономический курс Справедливого Казахстана» затронуты вопросы необходимости развития «зеленой экономики», а также энерго- и ресурсосбережения [2]. В данном контексте разработка технологии производства теплоэффективных трехслойных стеновых панелей представляется не только актуальной с технической точки зрения, но и направлена на реализацию стратегических целей государственной политики республики Казахстан.

В условиях глобального роста потребности в энергоэффективности и улучшении теплоизоляционных свойств зданий, выбор строительных материалов становится одним из ключевых факторов при производстве конструкций для домостроения. Легкие пористые бетоны, включающие такие компоненты, как аглопорит, перлит, керамзит, и шлаковая пемза, долгое время считаются одними из лучших вариантов для улучшения теплоизоляции, в то время как использование полистирола в качестве наполнителя для бетона требует более детального изучения.

Стеновые панели играют ключевую роль в современных жилищных проектах, так как они не только обеспечивают необходимую прочность и долговечность конструкций, но и способствуют улучшению тепло- и звукоизоляции. Использование инновационных стеновых панелей, изготовленных из легких и высокопрочных материалов, позволяет значительно сократить время строительства и уменьшить затраты на эксплуатацию зданий в будущем.

Применение трехслойных стеновых панелей с внутренним теплоизоляционным слоем считается перспективным направлением в области теплоизоляции зданий и сооружений. Эффективным материалом для исследования является полистиролбетон. Однако его применение не всегда сочетает в себе необходимую теплоизоляцию и высокую прочность. Поэтому данное направление требует более детального исследования и поиска оптимальных технологических решений.

Современные технологии производства стеновых панелей, такие как использование сэндвич-панелей, позволяют достичь высокой энергоэффективности. Эти панели включают в себя теплоизоляционные слои, что снижает потребность в дополнительном отоплении и кондиционировании воздуха, тем самым уменьшая эксплуатационные расходы на содержание зданий [3]. Кроме того, применение экологически чистых и перерабатываемых

материалов в производстве стеновых панелей соответствует современным требованиям устойчивого развития и охраны окружающей среды [4].

Важным аспектом является возможность быстрой модульной сборки зданий из стеновых панелей, что значительно ускоряет процесс возведения и позволяет сократить сроки реализации проектов. Это особенно актуально в условиях высокой конкуренции на рынке строительных услуг и необходимости оперативного реагирования на запросы потребителей [5].

Наружные ограждающие конструкции большинства зданий в Республике характеризуются низкой энергоэффективностью или экономически неоправданными показателями, что не соответствует современным международным требованиям и ведёт к чрезмерному потреблению тепловой энергии [6].

Полистирол (в том числе его модификации, такие как экструзионный и вспененный полистирол) уже успешно используется в других сферах строительства, например, в производстве теплоизоляционных плит. Внедрение полистирола в бетонную смесь позволяет достичь значительных преимуществ, таких как:

- улучшение теплоизоляционных свойств: полистирол имеет низкую теплопроводность, что позволяет улучшить энергоэффективность зданий, сокращая затраты на отопление и кондиционирование.

- снижение веса конструкций: Благодаря легкости полистиролового наполнителя, бетон становится легче, что снижает нагрузки на конструкцию и упрощает транспортировку и монтаж.

- устойчивость к воздействию влаги и химическим веществам: Полистирол не подвержен воздействию воды, что может улучшить долговечность материала, особенно в условиях повышенной влажности.

Важно также учитывать экологические аспекты использования полистирола, так как он является небиоразлагаемым материалом, что может повлиять на решение о его применении в строительстве. Несмотря на то что полистирол является синтетическим материалом, его использование в бетоне может быть более экологически эффективным в контексте создания энергоэффективных зданий. Это способствует сокращению общего углеродного следа и потребности в энергоресурсах для отопления и охлаждения.

Исследования, посвященные полистироловому бетону, могут открыть новые горизонты в разработке более эффективных и экологичных решений для строительства, снижая как энергетические затраты, так и стоимость возведения зданий, при этом сохраняя необходимое качество и соответствие строительным нормам.

Разработанный высокопоризованный полистиролбетон (ВППБ) благодаря высокому содержанию пор и хорошей теплоизоляции, значительно снижает теплопотери через стены, что делает здания более энергоэффективными. Это позволяет сократить расходы на отопление и кондиционирование, что особенно важно в условиях климатических изменений и растущих цен на энергоресурсы.

Полистиролбетон хорошо сопротивляется воздействию влаги, что важно для долговечности конструкции. Также он не подвержен гниению, коррозии и воздействию микроорганизмов, что увеличивает срок службы зданий.

Применение трехслойных стеновых панелей с высокопоризованным слоем полистиролбетона в жилищном строительстве не только способствует экономической эффективности и сокращению сроков строительства, но и обеспечивает высокий уровень комфорта и безопасности, что делает их неотъемлемой частью современных решений строительных технологий.

**Цель работы** - разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего получение высокопоризованного легкого бетона на полистирольном заполнителе, обладающего повышенными физико-механическими и деформативными свойствами, и трехслойных стеновых панелей с его использованием в качестве теплоизоляционного слоя, путем введения комплексной органоминеральной добавки, состоящей из микродисперсных минеральных компонентов способных упрочнить и уплотнить цементный композит и органического компонента увеличивающего подвижность смеси.

Для достижения цели ставились следующие **задачи**:

- проведение анализа воздействия различного количества химических добавок на подвижность бетонной смеси и прочность бетона;
- разработка и оптимизация состава ВППБ с заданными деформативными и физико-техническими характеристиками;
- исследование влияния сырьевых компонентов на свойства легкого и тяжелого бетона;
- разработка технологии изготовления панелей с учетом системы контроля качества на всех этапах;
- исследование физико-технических характеристик полученного ВППБ.

Научная новизна заключается в:

1. Научно обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение высокопоризованного модифицированного легкого бетона на полистирольном заполнителе, обладающего повышенными эксплуатационными характеристиками, заключающееся в использовании в качестве вяжущего композиционного вяжущего, содержащего 60 % портландцемента и 40 % доменного молотого гранулированного шлака и модификации смеси воздухововлекающего и суперпластифицирующего модификаторов. Композиционное вяжущее производится путем сухого смешивания портландцемента с предварительно измельченным до дисперсности, сопоставимой с портландцементом, доменным гранулированным шлаком, обладающим химическим сродством с клинкерными минералами и продуктами их гидратации и пущоланической активностью. Смешанное вяжущее перемешивается с пенополистирольным заполнителем, водой затворения и водным раствором комплексной органической (воздухововлекающей и пластифицирующей) добавки. Данное технологическое решение приводит к

получению высокопоризованного легкого бетона, обладающего нормативными эксплуатационными характеристиками (прочность при сжатии увеличивается до 2 МПа, теплопроводность – 0,095 мВт/м°С, паропроницаемость – 0,087 мг/м\*ч\*Па) за счет образования дополнительного количества кристаллогидратов, приводящее к упрочнению цементной системы.

2. Установлено, что использование смешанного вяжущего (60 % портландцемент и 40 % тонкодисперсный доменный гранулированный шлак) приводит к изменению фазового состава цементной системы (увеличению содержания гидросиликатов кальция и снижению количества портландита) и приводит к его упрочнению.

4. Установлено влияние рецептурно-технологических факторов, а именно состава и способа приготовления смешанного вяжущего и содержания комплексной органической добавки, состоящей из воздухововлекающей и пластифицирующей составляющих в соотношении 1:1, на формирование структуры цементной матрицы в процессе образования кристаллогидратов: органической составляющей – на снижение водопотребности и изменение пористости цементной системы; тонкодисперсного доменного гранулированного шлака – на формирование кристаллической структуры в цементном камне.

#### **Практическая значимость:**

- разработан и предложен к использованию научнообоснованный состав высокопоризованного полистиролбетона в качестве теплоизоляционного слоя для энергоэффективных стеновых панелей;
- предложена к использованию сырьевая смесь для теплоизоляционных изделий (патент на полезную модель № 9341 «Сыревая смесь для теплоизоляционных изделий»);
- получено свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом №66084;
- разработано технологическое решение получения трехслойных стеновых панелей, позволяющая снизить себестоимость изделий, а также повысить качество экологической обстановки посредством использования промышленных отходов;
- получен акт внедрения в производственный процесс трехслойных стеновых панелей со слоем высокопоризованного полистиролбетона по разработанной технологии и осуществлена производственная апробация предложенных решений;
- результаты исследований внедрены в учебную программу НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», образовательной программы 7М07303 - «Производство строительных материалов, изделий и конструкций» в рамках дисциплины «Современные материалы на основе местного сырья».

**Основные положения диссертационной работы доказаны и опубликованы в следующих статьях и конференциях:**

- «Анализ эффективности использования доменного шлака в качестве компонента композиционного вяжущего для полистиролбетона». Труды университета. - Караганда: КарГТУ, 2023. - № 4 (93). - С. 201-207;
- «Effect of heat treatment of expanded polystyrene concrete on its compressive strength», Technobius, 2024, 4(2), 0059, DOI: <https://doi.org/10.54355/tbus/>
- «Исследование различных составов пенополистиролбетона и их влияние на физико-технические свойства легких бетонов». Труды университета. - Караганда: КарГТУ, 2024. №4 (97). С. 168-175;
- «Computational Research of the Efficiency of Using a Three-Layer Panel Made of Highly Porous Polystyrene Concrete». Materials, 2024, 17(16), 4133;
- «Возможности для разработки полистиролбетона и комплексного модификатора». XV Труды Международной научно-практической конференции «XV Сагиновские чтения. Интеграция образования, науки и производства», г. Караганда Казахстан, Раздел 3, стр. 307-308;
- «Analysis of the Energy Efficiency of a Building Made of a ThreeLayer Panel from Highly Porous Polystyrene Concrete». International Scientific and Practical Conference "Smart Cities and Sustainable Regional Development" Published online: 15September 2025, ISBN: 978-5-6053915-6-2, DOI: 10.63550/ICEIP.2025.67.16.040.

В качестве методов исследования применялись лабораторные методы, расчетные, экспериментальные, сравнительные, метод многофакторного планирования эксперимента, рентгено-фазовый анализ, SEM анализ. Проведено комплексное теоретическое исследование разработанной по новой технологии многослойной конструкции наружного ограждения трехслойной панели из высокопоризованного полистирол бетона в сравнении с традиционными в программном комплексе ELCUT 6.6 и в системе компьютерной алгебры Maple.

# 1 АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ТРЁХСЛОЙНЫХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ И ПОЛИСТИРОЛБЕТОНА

Полистиролбетон является композиционным материалом и широко применяется на современном рынке строительной продукции. Его особенность в том, что заполнителем в его составе служат гранулы полистирола. Благодаря своим преимуществам (низкой плотности и теплопроводности), полистиролбетон получил широкое применение в строительстве зданий и сооружений [7].

В состав данного композиционного материала входят вяжущее, песок мелких фракций, гранулы полистирола, вода, а также химические добавки для модификации нужных технологических характеристик. Низкая плотность достигается благодаря гранулам полистирола в составе полистиролбетона [8].

Вариации применения полистиролбетона в строительстве имеет широкий диапазон (от 150 до 600 кг/м<sup>3</sup>). Самым применяемым считается полистиролбетон плотностью 300-400 кг/м<sup>3</sup>, поскольку он сочетает в себе баланс между прочностью и теплоизоляцией [9].

Прочность полистиролбетона варьируется от 0,5 до 5 МПа, что позволяет использовать его в качестве теплоизоляционно-конструкционного легкого материала, преимущественно в несущих стенах, блоках, утепляющих слоях и перегородках [10].

Самой важной характеристикой теплоизоляционных материалов является низкая теплопроводность (от 0,05 до 0,13 Вт/(м·К)), в то время как у обычного тяжелого бетона она варьируется от 1,5 до 1,75 Вт/(м·К). Что касается водопоглощения полистиролбетона, то оно колеблется в диапазоне 6–12% от массы. Несмотря на наличие открытых пор, материал может быть защищен от влаги с помощью гидрофобизирующих добавок и финишной отделки [10]. Морозостойкость составляет 25–150 циклов (марки F25–F150), что позволяет применять его в условиях резко-континентального климата, а именно в климатических условиях Карагандинской области.

В качестве преимущества полистиролбетона выступает низкая теплопроводность, относительно низкая себестоимость (с учетом композиционного вяжущего), простота обработки (резка, шлифовка), повсеместная доступность материалов для его производства. Исследования полистиролбетона в строительстве имеет популяризованный характер, и к основным аспектам изучения относятся: модификация вяжущего (создание композиционного вяжущего), повышение сцепления гранул с цементной матрицей, армирование стекловолокном и полимерными волокнами [11].

Полистиролбетон является перспективным материалом в строительстве с точки зрения применения и исследования. Ввиду его широкого применения стоит отметить актуальность его изучения, дабы сделать его еще более востребованным для производства и возведения зданий и сооружений.

Наряду с теплоизоляционными свойствами и относительно малой плотности, недостатками полистиролбетона являются его низкая прочность и деформация

усадки. Данные недостатки будут рассмотрены в диссертационной работе с приведением способов их разрешения.

В научном сообществе было проведено ряд исследований в данном направлении. Так, в работе [12] еще в середине 90-х были экспериментально исследованы свойства затвердевшего бетона, содержащего гранулы химически обработанного пенополистирола, где было установлено, что на прочность, жесткость и химическую стойкость бетона на заполнителе из полистирола постоянной плотности влияет соотношение воды и цемента. В результате были разработаны эмпирические уравнения, позволяющие связать силу и скорость импульса и предсказать модуль упругости на основе его прочности [13]. Современные исследования, где можно отметить работу [14], показали также широкое применение полистирола в ограждениях, где теоретически и экспериментально установлена высокая эффективность панелей, содержащих полистирол, где результатом комплексного исследования было установлено теплопроводности, выбросов углекислого газа и эксплуатационного энергопотребления [15]. Кроме того, было показано, что производство пенополистирольного бетона является экологически чистым, поскольку снижает содержание отходов пенополистирола, который не разлагается естественным путем [16-18]. Аналогичную эффективность применения в конструкциях наружного ограждения полистирола в качестве теплоизоляционного материала в холодном климате были освещены в работах [19-21], где применение теплоизоляции полистирола показала свою эффективность от 5 до 21% в зависимости от вида конструкции и толщины теплоизоляции. Однако в данных работах были использованы только один вид теплоизоляции с равномерной структурой на примере пеноплекса без вариативного анализа размер пор. Учитывая теплоизоляционную эффективность применения в разных условиях, также удобностью в быстром возведении запроектированных зданий повсеместно по настоящее время проводятся различные исследования по улучшению тепловых качеств и снижению себестоимости строительства с применением разного вида добавок [22-24], которые в основном отражаются в повышении тепловой эффективности и снижению себестоимости. Применением указанных добавок можно также достичь энергоэффективность за счет создание большего воздушного пространства через увеличение количества пор. Куда можно отнести процесс оптимизации панелей из полистирола через применение технологий изготовления высокопорозации полистирола с применением различных добавок и решений [25, 26]. Однако при оптимизации многослойной панелей с применением полистирола необходимо руководствоваться такими критериями, как энергоэффективность и прочность, так как увеличение количества пор поможет достичь высокого результата энергосбережения, но не будет отвечать прочностным требованиям [27, 28], прописанным в нормативной документации [29,30].

Проведенный обзор исследований свидетельствует о наличии ряда проблем в исследованиях, проведенных ранее, так как отсутствует комплексность

полученных результатов. В одних случаях, к примеру, проводятся исследования тепловой эффективности и себестоимости применением различных добавок и решений, а в других прочностных характеристик подобных конструкций. Следует отметить, что подобный подход не является практически применимым в реальной жизни. Учитывая эти обстоятельства, поставлена цель разработки технологии изготовления трехслойной стеновой панели со слоем энергоэффективного высокопоризованного полистиролбетона на основе комплексных мероприятий.

Сравнительные исследования между обычным бетоном и полистиролбетоном [31] выявляют, что последний превосходит традиционный бетон по устойчивости к воздействию агрессивных химических веществ, влаги и других факторов внешней среды. Это объясняется тем, что полистирол, который используется в качестве наполнителя в полистиролбетоне, не подвержен воздействию коррозии, гниению или разложению, что значительно улучшает долговечность и срок службы конструкций.

Исследования, проведенные Штрепи и его коллегами [32], подчеркнули важные характеристики легкого бетона, которые делают его полезным не только для традиционных строительных применений, но и для эффективного использования в областях, где требуется повышение акустического комфорта. Звукопоглощение легкого бетона является важным аспектом, который расширяет его потенциал в строительных и архитектурных проектах. В данной работе показано влияние пористости и геометрии материала на звукопоглощающие свойства материала. Наилучшими показателями шумопоглощения названы бетоны с высоким содержанием открытых пор, поскольку они обладают лучшим рассеиванием и поглощением акустических волн. Основной упор данного исследования делался на акустические свойства легкого бетона, в то время как результаты исследований теплоизоляционных и прочностных свойств не продемонстрированы.

В последние годы уделяется внимание экологически и экономически выгодному использованию отходов производства, таких как зола и шлаки, в строительной отрасли. Это решение помогает решить несколько важнейших проблем одновременно: утилизацию отходов и сокращение потребности в природных материалах, что способствует сохранению ресурсов и снижению воздействия на окружающую среду. Многие исследования посвящены применению этих отходов в производстве строительных материалов, таких как бетон, цемент, кирпичи и другие конструкционные элементы. Использование золы и шлаков может улучшить свойства материалов, таких как прочность, теплоизоляция и водостойкость, при этом снижая себестоимость производства и минимизируя количество отходов. Это направление имеет перспективы не только с точки зрения устойчивого развития, но и с экономической точки зрения, поскольку позволяет снизить затраты на производство строительных материалов и решать проблему утилизации отходов [33-35].

Исследованием влияния различных факторов на теплофизические свойства полистиролбетона занимались японские ученые [36]. В статье исследованы

влияние содержания зерен полистирола, стеклопорошка, а также золы на теплопроводность полистиролбетона. В исследовании отмечено, что повышение количества гранул полистирола ведет к значительному снижению коэффициента теплопроводности за счет уменьшения плотности материала. Добавление стеклопорошка оказывает похожее влияние на его теплоизоляционные свойства. Однако авторы также отмечают, что повышенное содержание гранул полистирола неизбежно приведет к падению механической прочности. Поскольку работа направлена на изучение теплоизоляционных свойств, проблема физико-механических характеристик не изучена в полной мере. Также стоит отметить, что исследования проводились в лабораторном формате, без переноса в реалии производственного процесса.

В настоящее время существует множество исследований, посвящённых разработке и анализу наружных ограждающих конструкций как на национальном, так и на международном уровнях. В частности, в работах отечественных учёных [37-39] рассмотрены конструкции с использованием теплоаккумулирующих материалов при свободной и вынужденной конвекции. Эффективность таких ограждений достигала до 44%. Однако их применение в многоквартирных жилых домах сопряжено с трудностями, а достижение заявленного эффекта возможно преимущественно в климатических условиях Южного Казахстана.

В работах [40-42] авторы рассмотрели возможность использования вакуумных изоляционных панелей (ВИП) в составе наружных ограждающих конструкций, проанализировав их преимущества и недостатки. Однако, несмотря на высокие теплоизоляционные характеристики, данный тип материалов пока не получил широкого распространения, что ставит под сомнение целесообразность их массового применения в наружных ограждениях многоквартирных жилых домов [43-45].

Несмотря на многочисленные преимущества полистиролбетона, этот материал имеет и ряд недостатков, таких как низкая прочность и усадка. Эти проблемы могут ограничивать его использование в некоторых строительных приложениях, особенно для нагрузочных конструкций. Однако существуют различные подходы, которые позволяют минимизировать эти недостатки, как вы правильно отметили, с помощью добавок и правильной технологии изготовления [46]. Расслаивание полистиролбетонной смеси является важной проблемой, которая затрудняет производство качественного материала и снижает его эксплуатационные характеристики. Эта проблема возникает из-за разницы в массе компонентов смеси (цемент, вода, полистирольные гранулы), а также из-за слабого сцепления полистирола с цементной матрицей, что влияет на однородность и прочностные характеристики конечного продукта. Решение этой проблемы требует применения инновационных добавок, и работа казахстанских ученых [47,48], предложивших комплексную модифицирующую добавку, представляет собой шаг вперед в улучшении свойств полистиролбетона. Добавка позволяет увеличить прочность бетона на 20-30% улучшая при этом его теплоизоляционные и морозостойкие свойства.

Исходя из проведенного анализа отечественного и зарубежного опыта в области теплоизоляции зданий и сооружений можно сделать вывод, что данная область исследована недостаточно, особенно в части сравнительной оценки теплофизических и экономических характеристик ограждающих конструкций, в том числе применительно к условиям Республики Казахстан, в частности города Караганды. В связи с этим были проведены исследования применения трехслойной панели из ВППБ в климатических условиях г. Караганды.

## **2 ИССЛЕДОВАНИЕ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ И РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ВЫСОКОПОРИЗОВАННОГО ПОЛИСТИРОЛБЕТОНА**

Для определения оптимального состава ВППБ был проведен аналитический обзор сырья для его производства. Исследования проводились с применением композиционного вяжущего, заполнителя, в качестве которого выступают гранулы полистирола и химических модификаторов. Основные критерии подбора продиктованы требованиями рынка строительной индустрии, условиями производства предприятий и себестоимостью готовой продукции. Учитывая, что на качество готовых изделий прямым образом влияет качество подобранных сырья, необходимо производить детальное исследование каждого составляющего компонента ВППБ с применением современного оборудования.

В рамках диссертационного исследования произведен анализ составляющих композиционного вяжущего (портландцемента и перемолотого доменного шлака), заполнителя (гранул полистирола) и влияние химических модификаторов на структуру и свойства ВППБ. На разработанный состав ВППБ получен патент на полезную модель №9341 «Сырьевая смесь для теплоизоляционных изделий» (приложение А).

### **2.1 Композиционное вяжущее**

В данной научной работе мы использовали композиционное вяжущее (портландцемент и перемолотый доменный шлак). Замещение части портландцемента перемолотым доменным шлаком позволяет снизить себестоимость готовых изделий за счет более доступного и менее энергоемкого материала – доменного шлака, поскольку он является отходом промышленного производства и его использование экологически целесообразно.

Вяжущее вещество является основополагающей системой структуры бетона, которая в большей степени определяет его прочностные и эксплуатационные характеристики [49-51]. В настоящем исследовании в качестве основы композиционного вяжущего рассматривались два вида портландцемента, различающиеся по минералогическому составу и активности гидратации. Исследование нескольких видов цементов дает возможность сравнительного анализа их влияния на процесс формирования структуры ВППБ. Дополнительным элементом композиционного вяжущего является перемолотый доменный шлак, обладающий активными минеральными фазами, которые способны участвовать во вторичных процессах гидратации. Применение перемолотого доменного шлака в составе композиционного вяжущего позволяет сократить расход портландцемента, снизив себестоимость готовых изделий.

Проведён сравнительный анализ портландцементов марок ЦЕМ II 32.5 Н от ТОО «Жамбылская цементная производственная компания» и ЦЕМ I 42.5 Н от АО «Central Asia Cement». Активность портландцемента определялась согласно

методике по ГОСТ 31108-2020 на образцах-балочках размером 40x40x160 мм. Испытания на предел прочности при сжатии и изгибе проводились на 3, 7 и 28 сутки твердения образцов. После изготовления все образцы оставались в формах на протяжении 24 часов, после чего перемещались в водную ванну, где выдерживались при температуре  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Измерение прочностных параметров осуществлялось с использованием сертифицированного гидравлического пресса, соответствующего требованиям нормативной документации. Результаты испытаний приведены в таблице 2.1:

Таблица 2.1 - Результаты испытаний на выявление портландцемента с более высокой активностью

№	Сутки	ЦЕМ II 32.5 Н (МПа)	ЦЕМ I 42.5 Н (МПа)
1	3	18	22
2	7	30	36
3	28	42	52

Результаты испытаний показали, что портландцемент марки ЦЕМ I 42.5 Н обладает более высокой прочностью как на ранней стадии твердения, так и по окончании 28 суток, по сравнению с портландцементом ЦЕМ II 32.5 Н. Это подтверждает его более высокую активность и эффективность при использовании в конструкциях, предъявляющих повышенные требования к прочностным характеристикам (рисунок 2.1):

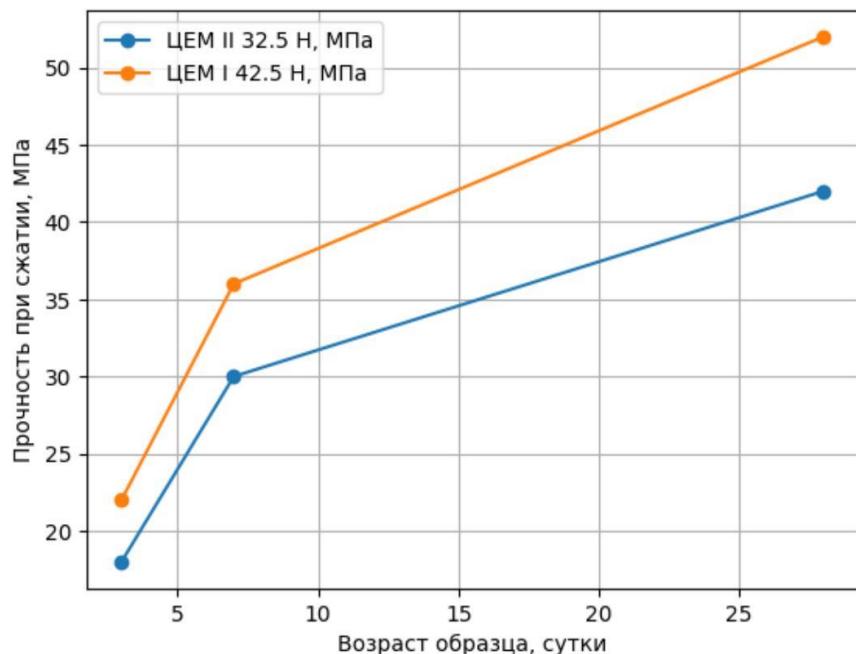


Рисунок 2.1 – Активность цементов разных марок

Различия в активности портландцементов продиктованы их химическим составом. Содержание оксидов определяет физико-механические свойства портландцемента, а также его поведение в процессе твердения и долговечность конструкций с его содержанием. В научной работе проведен анализ химического состава портландцементов по ГОСТ 5382-2019, согласно которому марка ЦЕМ I 42.5 Н показала активность выше, чем у портландцемента марки ЦЕМ II 32.5 Н. Контроль химического состава портландцемента позволяет контролировать качество готовой продукции с его содержанием. Проведение химического анализа есть первостепенный контроль при производстве товарного бетона и изделий из портландцемента. Определение содержания оксидов устанавливают химико-аналитическими методами.

Для проведения анализа из цемента отбирают среднюю пробу, после чего высушивают при температуре  $105 \pm 5$  °С до постоянной массы. Высушеннную пробу измельчают и просеивают через сито 008. Далее из просеянной массы отбирают навеску 1 г с точностью до 0,001. Разложение навески осуществлялось с использованием соляной кислоты. Процесс сопровождается подогревом до полного растворения вещества. Полученный раствор фильтруют и готовят к дальнейшему анализу.

Потери при прокаливании определяют нагревом пробы до температуры 950–1000 °С путем разности масс. На основании полученных данных вычисляют массовую долю каждого компонента и сравнивают значения с нормативами, установленными стандартами. Содержание  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  определяют минеральный состав цемента и его активность. Превышение допустимых значений  $\text{MgO}$  может привести к изменению сроков схватывания и повышенной усадке. Потери при прокаливании характеризуют чистоту сырья и стабильность технологического процесса. Полученные результаты представлены в таблице 2.2:

Таблица 2.2 - Химический состав портландцемента

Наименование вяжущего	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Cl}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	п.п.п
ЦЕМ I 42.5 Н	23,37	4,98	60,38	1,13	0,003	4,0	1,2

В химическом составе портландцемента преобладают оксиды кальция, кремния, алюминия и магния. Содержание кальция более 60% подразумевает щелочной характер системы. Данный оксид играет определяющую роль в формировании реакционной способности портландцемента и в процессах гидратации.

Оксид кремнезема является кислым оксидом, который участвует в образовании силикатных фаз. Его содержание играет определяющую роль в термостойкости материалов, а также его прочностных характеристиках. Способность кремнезема взаимодействовать с основными оксидами образует

устойчивые структуры, способные противостоять действию агрессивных сред и высоких температур.

Около 5 % химического состава приходится на оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ), который проявляет амфотерные свойства и участвует в формировании алюминатных фаз. Его наличие оказывает значительное влияние на устойчивость материала к воздействию высоких температур и агрессивных сред. Кроме того,  $Al_2O_3$  влияет на интенсивность процессов, таких как твердение или плавление. В присутствии кальция возможно образование соединений алюминатов кальция, характеризующихся гидравлической активностью.

Оксид магния ( $MgO$ ) в составе портландцемента способствует повышению жаростойкости материала, стабилизирует кристаллическую решётку и может предотвращать деформации, возникающие под действием высоких температур. Его избыточное содержание может привести к негативным последствиям, например, к объёмным изменениям из-за поздней гидратации.

Несмотря на низкое содержание, хлор требует контроля, поскольку в определённых условиях он может стать причиной коррозии металлических включений, а также спровоцировать возникновение высолов на поверхности изделий.

Таким образом, выявленный химический состав свидетельствует о преобладании основных оксидов и наличии кислых и амфотерных компонентов, что определяет комплексные свойства материала, включая его термическую устойчивость, реакционную способность и потенциальную прочность.

В качестве компонента к композиционному вяжущему исследовались химические активные материалы: зола-унос (рисунок 2.3) и молотый доменный шлак (МДШ) (рисунок 2.4).

Обоснование выбора материала к композиционному вяжущему основывается на доступности расположения и экономической выгоды при использовании. Зола – унос оседает в фильтрах, чем затрудняет доступность ее применения. В то же время доменный шлак находится в свободном доступе как отход металлургической промышленности. По ценовой политике доменный шлак является экономически более выгодным: цена золы-унос (по данным ТОО «Best Business KZ») составляет 2500 тг/т, цена доменного шлака (по данным ТОО «А СтрайТорг») составляет 1200 тг/т. Таким образом, в качестве компонента для композиционного вяжущего был выбран доменный шлак, как наиболее доступный и выгодный материал.



Рисунок 2.3 – Зола-унос с Астанинской ТЭЦ

Химико-материаловедческий анализ показал, что МДШ целесообразно использовать в качестве композиционного вяжущего для ВППБ, поскольку он обладает аморфной (стеклообразной) структурой. Именно это отличает его от других техногенных отходов. Также особенностью доменного шлака является наличие у него пылевидной фракции (более 8%) [52-54, 57]. Данная фракция обладает пущолановыми свойствами, а значит служит активной миндобавкой к композиционному вяжущему, повышающей ее прочность [54,55]. В сравнении с цементом, насыпная плотность шлака меньше, это позволяет ему заполнить капиллярное пространство в бетоне, что также способствует увеличению его прочности. Таким образом, снизив расход цемента, можно увеличить прочность бетона, и увеличить экономические показатели производства ВППБ.



Рисунок 2.4 – Залежи доменного шлака в г.Темиртау

Доменный шлак был отобран в г. Темиртау АО «Qarmet» и представляет собой частицы фракции 2,5-10 мм (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 - Доменный шлак фракции 2,5-10 мм

Помол осуществлялся в шаровой мельнице (рисунок 2.6) в лаборатории кафедры «Строительных материалов и технологий» НАО «Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова» г. Караганда:



Рисунок 2.6 – Шаровая мельница для измельчения доменного шлака

Помол осуществлялся в течении 4 часов. Согласно ГОСТ3476-2019, помол должен осуществляться до такой степени, чтобы на сите размером 0,008 оставалось не более 15% от массы частиц шлака (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Тонкость помола шлака через сито 0,008

Для установления химического состава доменного шлака проводились лабораторные испытания по ГОСТ 5382-2019. Суть метода заключалась в разности масс исследуемого оксида до и после прокаливания в муфельной печи. Навеску массой 0,5 г заключают в платиновый тигель, опрыскивают водой и добавляют определенное количество капель раствора  $H_2SO_4$  и  $HF$ , помещают в песчаную баню, и выпаривают содержимое, повторно добавляя  $HF$  и выпаривают досуха. Остаток, прокаленный в муфельной печи охлаждают, взвешивают, и вычисляют содержание оксида.

По результатам проведенных испытаний получен следующий химико-минералогический состав (таблица 2.3):

Таблица 2.3 – Химико-минералогический состав доменного шлака

Наименование показателя	Обозначение НД на методы испытаний	Требования НД	Фактически полученные результаты
1	2	3	4
1 Влажность, %	ГОСТ 3476	-	9,27
2 Массовая доля, %	ГОСТ 5382		
2.1 $Al_2O_3$			13,95
2.2 $MgO$		15,0, не более	9,45
2.3 $TiO_2$		4,0, не более	0,57
2.4 $CaO$		-	38,74

2.5 SiO <sub>2</sub>		-	36,5
2.6 MnO		2,0, не более	0,8
3 Коэффициент качества	ГОСТ 3476	Не менее 1,65 1 сорт	1,68
4 Содержание иона Cl <sup>-</sup> , %	ГОСТ 3476	Не более 0,1	0,038

Результаты исследования, представленные в таблице 2.3 демонстрируют, что значения химико-минералогического состава доменного шлака находятся в допустимых нормативных значениях.

Из-за высокого содержания оксидов кальция, кремния и алюминия (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO), бетон с содержанием доменного шлака становится более устойчив к агрессивным средам (щелочей, солей и кислот).

## 2.2 Полистирол

Выбор оптимального количества гранул полистирола исходил из главных показателей теплоизоляционного бетона: теплопроводности и прочности. Как показали экспериментальные данные, с увеличением содержания гранул полистирола возрастают его теплоизоляционные свойства, но падают прочностные показатели. Для исследования изготавливались образцы с разным процентным соотношением гранул полистирола от объема. Исследовались составы с 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86% и 90% содержание гранул полистирола (таблица 2.4). Шаг менее 10% не несет существенных тенденций, поэтому было принято повышение количества полистирола на каждые 10%. При 90% теплопроводность имела незначительную тенденцию, в то время как прочность снизилась до значительных показателей. Теплопроводность образцов измерялась методом стационарного теплового потока согласно ГОСТ 7076 с применением теплометра с датчиком теплового потока. Измерения фиксировались при установившемся температурном градиенте.

Таблица 2.4 - Зависимость теплопроводности и прочности от объема содержания гранул полистирола

№ пп	Доля гранул полистирола от объема 1м <sup>3</sup> , %	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/м К	Прочность, МПа
1	0	1200	1,2	15,0
2	10	1000	0,85	8,0
3	20	900	0,55	5,0
4	30	850	0,38	4,0
5	40	800	0,22	3,2
6	50	700	0,15	2,7
7	60	650	0,12	2,4

8	70	610	0,10	2,2
9	80	500	0,095	2,1
10	81	490	0,095	2,1
11	82	450	0,095	2,0
12	83	430	0,095	2,0
13	84	410	0,094	1,9
14	85	390	0,094	1,9
15	86	350	0,093	1,8
16	90	340	0,090	1,0

Результаты показали, что в диапазоне 80-85% содержаний гранул полистирола в 1м<sup>3</sup> наблюдалась область оптимального сочетания прочности и теплопроводности. При содержании более 86% прочность полистиролбетона становится ниже. Достижение необходимой прочности и теплопроводности наблюдалось при добавлении 85% гранул полистирола от объема (рисунок 2.8):

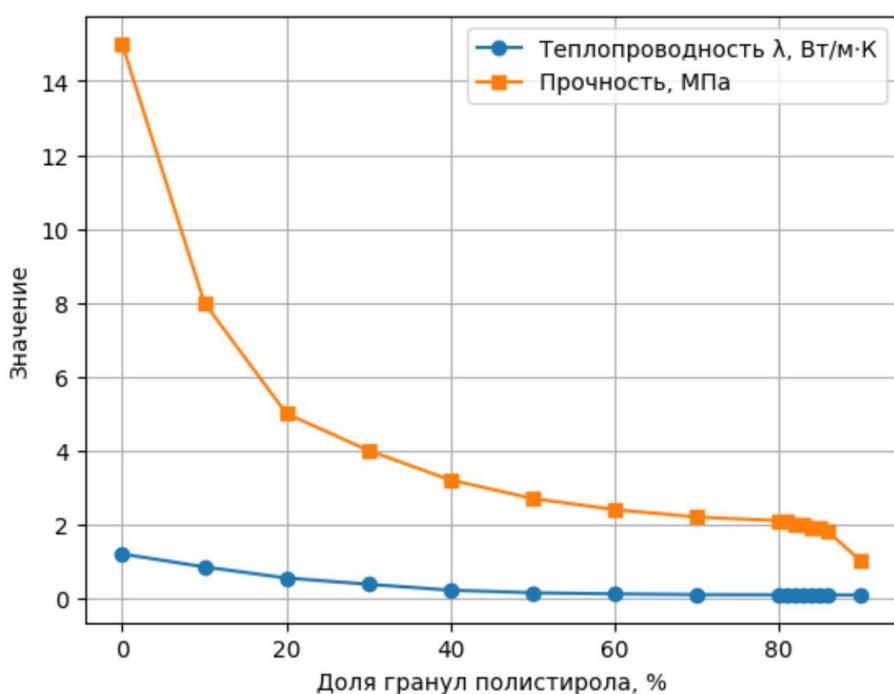


Рисунок 2.8 - Зависимость теплопроводности и прочности от объема содержания гранул полистирола

При меньшем содержании гранул полистирола, необходимая величина теплопроводности (0,1-0,18 Вт/м К) не была достигнута, а при его содержании более 85% наблюдалось снижение прочности ВППБ, а именно до 1,0 МПа при требуемой прочности 1,92 МПа.

Таким образом, результаты исследования показали, что прочность ВППБ снижается с увеличением содержания гранул полистирола в нем. Это происходит по причине замены цементной матрицы слабым заполнителем (гранулами

полистирола), а также слабой адгезией цементного камня с заполнителем, что приводит к частичной потери несущей способности конструкции.

Для подбора оптимальной фракции заполнителя, а также его количества на 1м<sup>3</sup> смеси, были использованы фракции 2,5-5 мм, 5-10 мм (рисунок 2.9). Фракция полистирола 2,5-5 была получена путем измельчения полистирола. Наиболее подходящая с точки зрения прочности ВППБ, сцепления гранул с матрицей композиционного вяжущего, а также равномерного распределения гранул по объему была определена фракция 2,5-5 мм, поскольку данная фракция способствует формированию более равномерной и однородной структуры макроструктуры ВППБ. Стоит также отметить, что применение более низкой фракции увеличивает суммарную удельную поверхность полистирольного заполнителя, находящегося в контакте с цементной матрицей. Это способствует улучшению адгезионной связи цементной матрицы с полистирольным заполнителем и уменьшению образования микротрещин. Кроме того, бетонная смесь с более мелкой фракцией полистирольного заполнителя характеризуется более высокой устойчивостью к расслоению. Применение гранул более крупной фракции дает снижение прочности по причине низкой прочности самого заполнителя.



Рисунок 2.9 – Гранулы ППС фракции 5-10 мм (слева), 2,5-5 мм (справа)

С помощью растрового электронного микроскопа Prisna E SEM были сделаны фото сцепления гранул полистирола с цементным тестом, где видно, что гранулы полностью вовлекаются в поры цементного теста (рисунок 2.10):

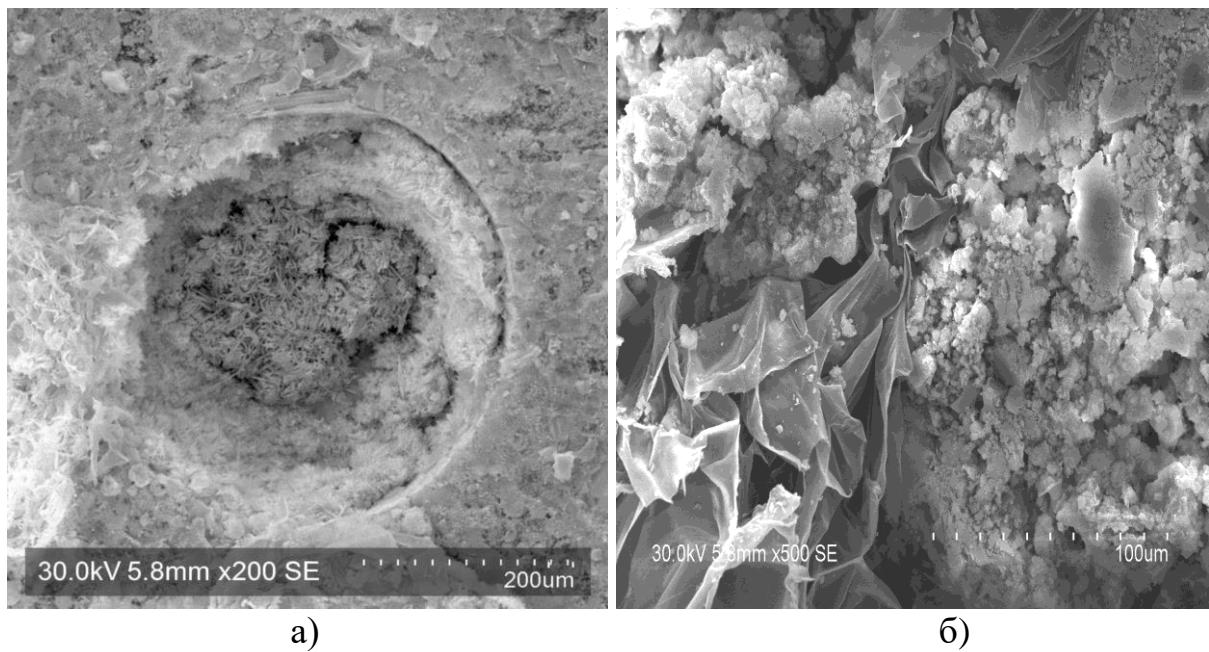


Рисунок 2.10 – Сцепление равномерных и гладких гранул полистирола с цементным тестом (а) и шероховатых измельченных гранул (б)

Следствием увеличения гранул полистирола в бетоне является повышение его влияния на свойства ВППБ. Поскольку прочностные характеристики полистирола находятся в низком диапазоне, прочность бетона достигается цементной матрицей. Она, в свою очередь, берет набор прочности за счет повышения расхода цемента. С целью стабилизировать экономический вопрос производства, используются добавки для ускорения твердения, а также активированием вяжущего вещества.

В проведенных исследованиях в области производства легких полистиролбетона [56], имеются результаты повышения прочности полистирола на 14% благодаря обработке зерен полистирола известковым молочком. ВППБ на композиционном вяжущем является сложной системой, в составе которой находятся частицы разного порядка (гидрофильные и гидрофобные). Следует учесть, что в составе данной системы имеется вода, а также гидрофобные гранулы полистирола, вследствие чего гранулы не смачиваются водой [56]. Была поставлена задача в создании тонких слоев (пленок), которые бы обеспечили сцепление как с пенополистиролом, так и с композиционным вяжущем. Создание таких слоев возможно при наличии добавки в составе системы. При незначительном повышении плотности полистиролбетона возможно повышение его прочности за счет уменьшения межзерновых пустот, которое достигается путем смешивания фракций гранул полистирола, тем самым увеличивая его насыпную плотность.

## 2.3 Характеристика модификаторов

Основные задачи при проектировании состава ВППБ состояла в улучшении его теплоизоляционных и механических свойств. Ведение химических модификаторов является наиболее эффективным инструментом регулирования структуры и физико-механических характеристик ВППБ. Увеличение количества микропор при помощи воздухововлекающего модификатора Master Air 200 позволило уменьшить теплопроводность (увеличить теплоизоляцию), но за счет закрытых пор оказывать минимальное влияние на подверженность усадке. В свою очередь, применение суперпластификатора MasterRheobuild 270 позволяет снизить количество воды, следовательно, снизить усадку при высыхании ВППБ.

В качестве воздухововлекающего модификатора применялся Master Air 200. Характеристики химического модификатора представлены в таблице 2.5:

Таблица 2.5 - Характеристики воздухововлекающего модификатора Master Air 200

№	Характеристики	Показатель
1	Цвет	Светло-коричневый
2	Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,02-1,09
3	Консистенция	Жидкая
4	Содержание ионов хлора, %	<0,01

Применение суперпластификатора MasterRheobuild 270 позволило увеличить сопротивление движению полистирольных гранул наверх, следовательно, предотвратить расслоение ВППБ. Это объясняется редуцирующими свойствами добавки, уменьшению количества воды. Характеристики химического модификатора представлены в таблице 2.6:

Таблица 2.6 - Характеристики добавки суперпластификатора MasterRheobuild 270

№	Характеристики	Показатель
1	Цвет	Желтый
2	Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,06
3	Консистенция	Жидкая
4	Содержание ионов хлора, %	<0,01

Введение химических модификаторов позволяет воздействовать на процессы структурообразования ВППБ и реологические свойства бетонной смеси. Комплексное применение воздухововлекающего и суперпластифицирующего

модификаторов способствует формированию рациональной поровой структуры ВППБ, а также снижению показателей его усадочных деформаций.

## 2.4 Влияние В/В отношения на свойства высокопоризованного полистиролбетона

Водовяжущее (В/В) отношение играет ключевую роль в качестве бетона. Избыток воды приводит к расслоению бетонной смеси, а затем к снижению прочности самого бетона вследствие неравномерной его структуры. Расслоение смеси происходит из-за разной плотности содержащихся в ней компонентов.

Целью данного этапа исследования являлось определение оптимального коэффициента В/В отношения, при котором сохранялась бы наиболее однородная структура. В исследовании мы использовали индекс сегрегации  $I_s$ , как количественное выражение степени неоднородности материала.

Практическая часть определения индекса сегрегации заключалась в отборе пробы бетонной смеси, изготовленной с рассчитанным теоретически В/В отношением, равным 0,6. После чего отдельно определялись плотности нижней и верхней частей. Проба отбиралась в формы для отбора проб со сторонами 100x100x100 мм. Затем образцы оставляли для схватывания на 1 час при температуре 20°C. Далее затвердевший бетон разрезался пополам горизонтально положения твердения, после чего определялась плотность каждой части. По формуле вычислялся индекс сегрегации:

$$I_s = \frac{p_h}{p_b}, \quad (2.1)$$

где  $p_b$  и  $p_h$  – плотность верхней и нижней частей соответственно ( $\text{кг}/\text{м}^3$ )

Чем однороднее по своей плотности верхняя и нижняя части, тем  $I_s$  будет ближе к 1. В ходе подбора состава с В/В отношением в 0,6 наблюдалось расслоение смеси по всему объему экспериментальных образцов (рисунок 2.11),  $I_s$  при этом был равен 1,35. Это говорит об избыточном содержании воды в смеси.



Рисунок 2.11 – Расслоение бетонной смеси при В/В 0,6

Избыточное количество воды приводит к расслоению бетонной смеси и чревато снижением прочности бетона. Это происходит потому, что компоненты имеют разную плотность, и по причине неоднородности смеси, более легкие стремятся к верху системы. При выбранном В/В отношении наблюдалось расслоение по всему объему смеси. Неравномерное распределение гранул полистирола и жидкой фазы оказало бы негативное влияние на стабильность и качество бетонной смеси.

Проведены дополнительные экспериментальные исследования, позволяющие определить оптимальное В/В отношение. Для экспериментальных исследований взяты теоретические данные В/В отношения, а именно равные 0,6; 0,55; 0,5; 0,45; 0,4; 0,35. Проведение испытаний сопровождалось одинаковым составом компонентов смеси с разным количеством воды. Результаты представлены в таблице 2.7:

Таблица 2.7 – Результаты плотности и индекса сегрегации высокопоризованного полистиролбетона

№	В/В	$\rho$ (низ), кг/м <sup>3</sup>	$\rho$ (верх), кг/м <sup>3</sup>	Индекс сегрегации
1	0,35	935	926	0,77
2	0,4	940	928	0,88
3	0,45	945	926	1,0
4	0,5	950	920	1,11
5	0,55	960	913	1,22
6	0,6	970	902	1,35

С учетом теоретических и экспериментальных данных, В/В отношение было снижено с 0,6 до 0,45, т.е на 18,3%. После чего наблюдалось изменение в равномерном распределении компонентов по всему объему (рисунок 2.12):



Рисунок 2.12 – Образцы ВПБ В/В = 0,45

Следует отметить, что на В/В отношение влияет цемент (марка, его активность, хим. состав), добавки, условия проведения испытаний. При изменении хотя бы одного из параметров необходимо провести дополнительные экспериментальные опыты.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что при В/В отношении равным 0,45 индекс сегрегации стремится к 1 и бетон однороден по своей структуре.

## 2.5 Многофакторное планирование эксперимента при разработке состава высокопоризованного полистиролбетона

Для изготовления ВПБ были использованы:

- портландцемент I 42,5Н, с удельной эффективной активностью естественных радионуклидов для сырьевых материалов:  $A_{\text{эфф}}(\text{цемент})=57$  Бк/кг с АО "Central Asia Cement";
- доменный шлак в качестве композиционно вяжущего к цементу;
- воздухововлекающая добавка;
- суперпластификатор с водоредуцирующими свойствами;
- вода затворения.

Разработка состава ВПБ осуществлялась методом многофакторного планирования эксперимента. Цель данного этапа исследования заключалась в подборе оптимального состава высокопористого полистиролбетона, обладающего необходимыми эксплуатационными характеристиками — минимальной

плотностью, пониженной теплопроводностью и достаточной прочностью на сжатие.

Данный метод позволяет одновременно оценить влияние нескольких переменных и получить регрессионные зависимости, описывающие изменения свойств материала в зависимости от его состава.

Факторами варьирования были приняты:  $x_1$  – соотношение портландцемент/шлак,  $x_2$  – количество гранул полистирола,  $x_3$  – воздухововлекающая добавка,  $x_4$  – суперпластификатор. Выходными параметрами (основные свойства ВППБ) определили: прочность на сжатие, теплопроводность, плотность.

Уравнение регрессии, включающее четыре фактора, рассмотренных на двух уровнях, записывается в следующем виде:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{1,2} x_1 x_2 + b_{1,3} x_1 x_3 + b_{1,4} x_1 x_4 + b_{2,3} x_2 x_3 + b_{2,4} x_2 x_4 + b_{3,4} x_3 x_4 + b_{1,2,3} x_1 x_2 x_3 + b_{1,2,4} x_1 x_2 x_4 + b_{1,3,4} x_1 x_3 x_4 + b_{2,3,4} x_2 x_3 x_4 + b_{1,2,3,4} x_1 x_2 x_3 x_4, \quad (2.2)$$

где:  $x_1, x_2, x_3, x_4$  – значения факторов;

$b_0$  – свободный член, равный выходу при  $x_0 = 1$ ;

$b_1, b_2, b_3, b_4$  – коэффициенты регрессии отдельных факторов, отражающие степень их влияния на рассматриваемый процесс;

$b_{1,2}, b_{1,3}, b_{1,4}, b_{2,3}, b_{2,4}, b_{3,4}$  – коэффициенты при произведениях факторов, свидетельствующие о наличии двойного взаимодействия между факторами;

$b_{1,2,3}, b_{1,2,4}, b_{1,3,4}, b_{2,3,4}$  – коэффициент регрессии, указывающий на тройное взаимодействие факторов;

$b_{1,2,3,4}$  – коэффициент регрессии, указывающий на взаимодействие четырех факторов;

Проведение эксперимента осуществлялось согласно таблицам 2.8 и 2.9. У каждого исследуемого фактора определен нулевой уровень.

Таблица 2.8 – Величины варьируемых факторов

Варьируемый фактор	Условное обозначение	Уровень варьирования факторов		
		-1	0	+1
Соотношение портландцемент/шлак	$X_1$	$40/60 = 0,6$	$50/50 = 1$	$60/40 = 1,5$
Количество гранул полистирола, % мас.	$X_2$	80	85	90
Воздухововлекающая добавка Master Air 200, % мас.	$X_3$	0,6	0,7	0,8
Количество суперпластификатора MasterRheobuild 270, % мас.	$X_4$	0,6	0,7	0,8

Таблица 2.9 – Матрица планирования ( $3^2$ )

№ состава	Матрица планирования			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
1	-1	-1	-1	-1
2	-1	0	0	0
3	-1	+1	+1	+1
4	0	-1	0	+1
5	0	0	+1	-1
6	0	+1	-1	0
7	+1	-1	+1	0
8	+1	0	-1	+1
9	+1	+1	0	-1

Исследуемые составы приведены в таблице 2.10:

Таблица 2.10 - Составы ВППБ

Наименование факторов	№ состава								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Соотношение портландцемент/шлак, % мас.	0,6	0,6	0,6	1,0	1,0	1,0	1,5	1,5	1,5
Количество гранул полистирола, % мас.	80	85	90	80	85	90	80	85	90
Воздухововлекающая добавка Master Air 200, % мас.	0,6	0,7	0,8	0,7	0,8	0,6	0,8	0,7	0,6
Количество суперпластификатора MasterRheobuild 270, % мас.	0,6	0,7	0,8	0,8	0,6	0,7	0,6	0,7	0,6

Коэффициенты регрессии рассчитывались по формулам:

$$b_i = 1/N \sum_{N=1}^N \bar{y}_N x_i^N, \quad (2.3)$$

$$b_{i,j} = 1/N \sum_{N=1}^N \bar{y}_N x_i^N x_j^N, \quad (2.4)$$

$$b_0 = 1/N \sum_{N=1}^N \bar{y}_N x_0^N, \quad (2.5)$$

где:  $N = 2^i$  — число вариантов в матрице планирования,  
 $y_N$  — значения среднего выхода процесса в  $N$ -м варианте,  
 $x_i^N$  — значения данного фактора в  $N$ -м варианте.

Для определения значимости коэффициентов регрессии, рассчитана их выборочная дисперсия  $s^2[b_i]$ . При вычислении коэффициентов регрессии использовались средние значения  $y_N$ , полученные на основе трёх повторных экспериментов.

Значимость коэффициентов в уравнениях регрессии оценивалась путем исключения из моделей тех факторов, которые оказывают несущественное влияние на функцию отклика. Коэффициент  $b_1$  признается значимым, если его значение заметно отличается от нуля. Доверительный интервал для коэффициентов  $b_1$  в модели выражается следующим образом:

$$\Delta b_1 = \mp t_\alpha \sqrt{S^2(b_1)} \quad (2.6)$$

где  $t_\alpha$  – коэффициента из таблицы Стьюдента.

Коэффициент  $t_\alpha$  подбирается исходя из количества числа измерений и доверительного интервала. Исходя из таблицы  $t_\alpha = 2,3$ .

$S^2(b_1)$  – дисперсия оценки коэффициентов модели,

$$S^2(b_1) = \frac{s^2(y)}{N} \quad (2.7)$$

$S^2(y)$  – дисперсия наблюдения,

$$S^2(y) = \frac{1}{N(n-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^n (Y_{ki} - \bar{Y}_i)^2. \quad (2.8)$$

где  $N$  – Количество опытов в плане экспериментов;

$n$  – количество повторных опытов.

Коэффициент  $b_1$  значим, если его абсолютное значение выше доверительного интервала, т.е.  $|b_1| > |\Delta b_1|$ . В обратном случае коэффициенты исключаются.

После проведения статистической проверки коэффициентов модели осуществлялся переход от нормированных значений факторов к их реальным значениям. Этот переход выполнялся по следующей формуле:

$$x_i = \frac{1}{\Delta x} (x_i - x_{i0}); \quad (2.9)$$

где  $x_{i0}$  – значение фактора на нулевом уровне варьирования;

$\Delta x$  – разность значений факторов  $x_{i0}$  и  $x_i$  на -1 уровне варьирования.

Результаты экспериментальных исследований составов ВППБ представлены в таблице 2.11:

Таблица 2.11 – Результаты исследования свойств ВППБ всех составов

№ состава	Наименование показателя		
	Теплопроводность $\lambda$ , Вт/м К	Плотность $P$ , кг/м <sup>3</sup>	Прочность $R$ , МПа
1	0,085	340	1,35
2	0,090	360	1,60
3	0,093	380	1,80
4	0,088	350	1,50
5	0,094	355	1,74
6	0,087	390	1,65
7	0,100	365	1,50
8	0,095	370	1,95
9	0,097	375	1,81

Из таблицы 2.11 видно, что теплопроводность обратно пропорциональна количеству полистирола в составе ВППБ. В то же время, прочность ВППБ обратно пропорциональна количеству полистирола. То есть, чем больше гранул полистирола в составе ВППБ, тем лучше будут его теплоизоляционные свойства, но тем ниже прочность. Наиболее оптимальным составом был выбран состав №8: соотношение цемент/шлак = 60%/40%, количество гранул полистирола = 85% от объема, суперпластификатора и воздухововлекающей добавки по 0,7% от массы вяжущего. Окончательный состав ВППБ представлен в таблице 2.12:

Таблица 2.12 - Подбор состава ВППБ

№	ЦЕМ I 42,5Н, кг	Доменный шлак, кг	Пенополистирол, кг	Воздухововлекающая добавка Master Air 200, %	Суперпластификатор MasterRheobuild 270, %
1	240	160	20	0,7	0,7

ВППБ, полученный на основании проделанных испытаний в ходе многофакторного планирования эксперимента и изготовленный по приведенному выше составу соответствует значениям нормативной документации и применим для использования в трехслойных стеновых панелей в качестве теплоизоляционного слоя.

## 2.5 Выводы

1. Портландцемент марки ЦЕМ I 42.5 Н обладает более высокой активностью как на ранней стадии твердения, так и по окончании 28 суток, по сравнению с портландцементом ЦЕМ II 32.5 Н. Выявленный химический состав ЦЕМ I 42.5 Н

свидетельствует о преобладании основных оксидов и наличии кислых и амфотерных компонентов, что определяет комплексные свойства материала, включая его термическую устойчивость, реакционную способность и потенциальную прочность.

2. Применение перемолотого доменного шлака в составе композиционного вяжущего позволяет сократить расход портландцемента, снизив себестоимость готовых изделий. Из-за высокого содержания оксидов кальция, кремния и алюминия ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ), бетон с содержанием доменного шлака становится более устойчив к агрессивным средам (щелочей, солей и кислот).

3. Результаты показали, что в диапазоне 80-85% содержаний гранул полистирола в  $1\text{m}^3$  наблюдалась область оптимального сочетания прочности и теплопроводности. Наиболее подходящая с точки зрения прочности ВППБ, сцепления гранул с матрицей композиционного вяжущего, а также равномерного распределения гранул по объему была определена фракция 2,5-5 мм, поскольку данная фракция способствует формированию более равномерной и однородной структуры макроструктуры ВППБ.

4. Увеличение количества микропор при помощи воздухововлекающего модификатора Master Air 200 позволило снизить теплопроводность. Применение суперпластификатора MasterRheobuild 270 позволяет снизить количество воды, следовательно, снизить усадку при высыхании ВППБ.

5. Результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что при В/В отношении равным 0,45 индекс сегрегации стремится к 1 и бетон однороден по своей структуре.

6. При помощи многофакторного планирования эксперимента был получен оптимальный состав ВППБ с заданными свойствами.

## **3 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОПОРИЗОВАННОГО ПОЛИСТИРОЛБЕТОНА**

### **3.1 SEM анализ структуры высокопоризованного полистиролбетона**

Эсплуатационные характеристики ВППБ в значительной степени определяются особенностями его внутреннего строения, сформированного на микроуровне. Именно характер порового пространства, состояние цементной матрицы и ее сцепление с полимерным включением (гранулами полистирола) обуславливают теплотехническую эффективность, механическую прочность и долговечность конструкции. Для получения сведений о внутреннем строении строения ВППБ требуется применение методов исследования, обеспечивающих высокое разрешение и возможность рассмотрения микроструктурных элементов.

SEM анализ (сканирующая электронная микроскопия) позволяет сделать микроструктурный анализ материала с исследованием распределения пор, цементной матрицы, а также характер сцепления между заполнителем и вяжущим веществом. Получаемые изображения позволяют более детально изучить структуру, а следовательно модернизировать состав и повлиять на характеристики полистиролбетона на микроуровне.

Для проведения SEM-анализа были подготовлены образцы полистиролбетона плотностью 300 кг/м<sup>3</sup>. После полного твердения образцы подвергались сушке при температуре 60–70 °С в течение 48 часов с целью исключения влаги, способной повлиять на качество визуализации. Поверхность образцов шлифовалась и покрывалась тонким слоем токопроводящего материала. Это необходимо для предотвращения накопления электрического заряда на диэлектрических участках.

Исследования образцов цементного теста и бетона проводились на растровом электронном микроскопе Prisna E SEM (рисунок 3.1) в г. Новосибирск.



Рисунок 3.1 – Растворный электронный микроскоп Prisna E SEM

В ВППБ дополнительные поры в цементном камне образуются за счет вводимой добавки. Аэротация бетона происходит за счет химических реакций, в ходе которых появляются пузырьки воздуха в бетонной смеси (рисунок 3.2).

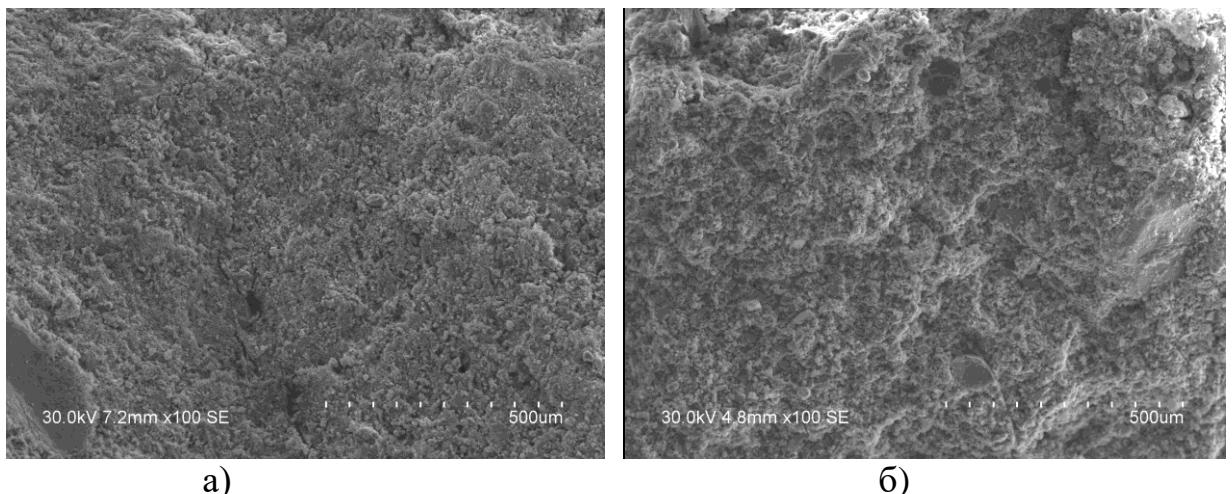


Рисунок 3.2 – Микрофотографии с увеличением в  $\times 100$  образцов цементного камня без воздуховлекающей добавки (а) и с ее добавлением (б)

На рисунке 3.2 можно отчетливо наблюдать равномерное распределение замкнутых пор, которые образовались после введения воздуховлекающей добавки. Ее введение в бетонную смесь увеличит теплоизоляционные свойства бетона, а также его шумо- и звукоизоляцию.

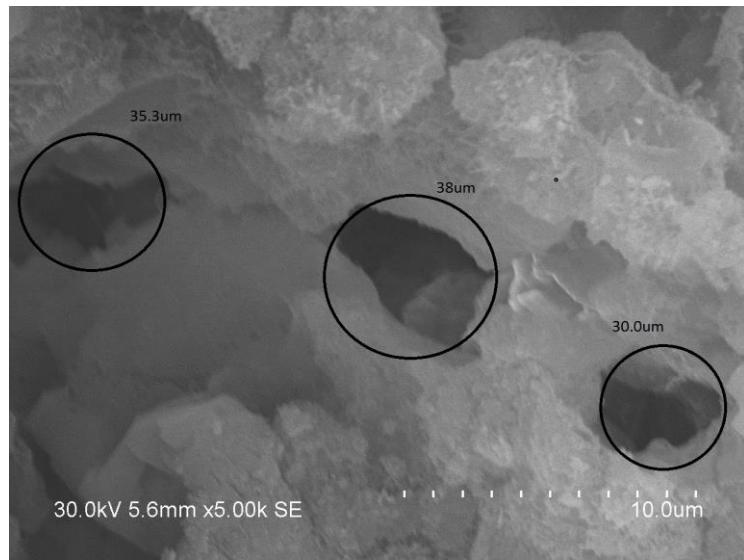


Рисунок 3.3 – Микрофотографии с увеличением в  $\times 5000$  образца цементного камня с размерами пор

Целью использования воздухововлекающего модификатора Master Air 200 являлось равномерное распределение мелких замкнутых пор и снижение плотности материала без потери однородности структуры.

SEM-изображения модифицированного состава показали следующие изменения:

- в структуре цементного камня появилось больше мелких сферических пор (диаметром 10–30 мкм), равномерно распределённых по всему объёму;
- поверхность гранул полистирола лучше смачивается цементной пастой, что визуально проявляется в уменьшении толщины переходной зоны;
- увеличение пористости цементной матрицы сопровождается улучшением структурной пластичности, что потенциально может снижать хрупкость материала при нагрузках;
- снижение количества крупных воздушных включений, за счёт стабилизации пузырьков воздуха в виде мелкодисперсной фазы, положительно влияет на равномерность структуры.

Таким образом, добавление воздухововлекающего модификатора Master Air 200 способствует формированию более мелкопористой и стабильной структуры, снижая концентрацию дефектов в критических зонах и улучшая однородность распределения компонентов.

Установлено, что наиболее подверженная разрушению зона – это зона сцепления цементной матрицы с заполнителем. Именно в ней происходят очаги локального разрушения при механических нагрузках [58].

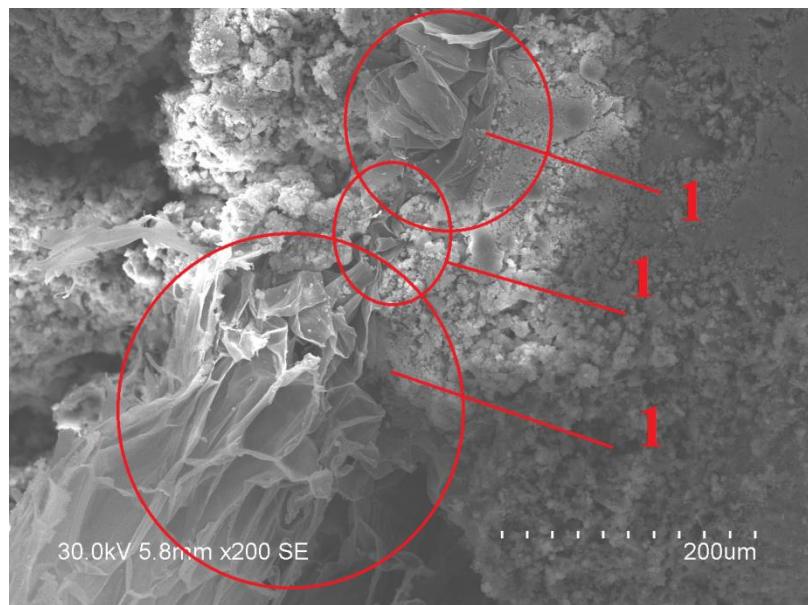


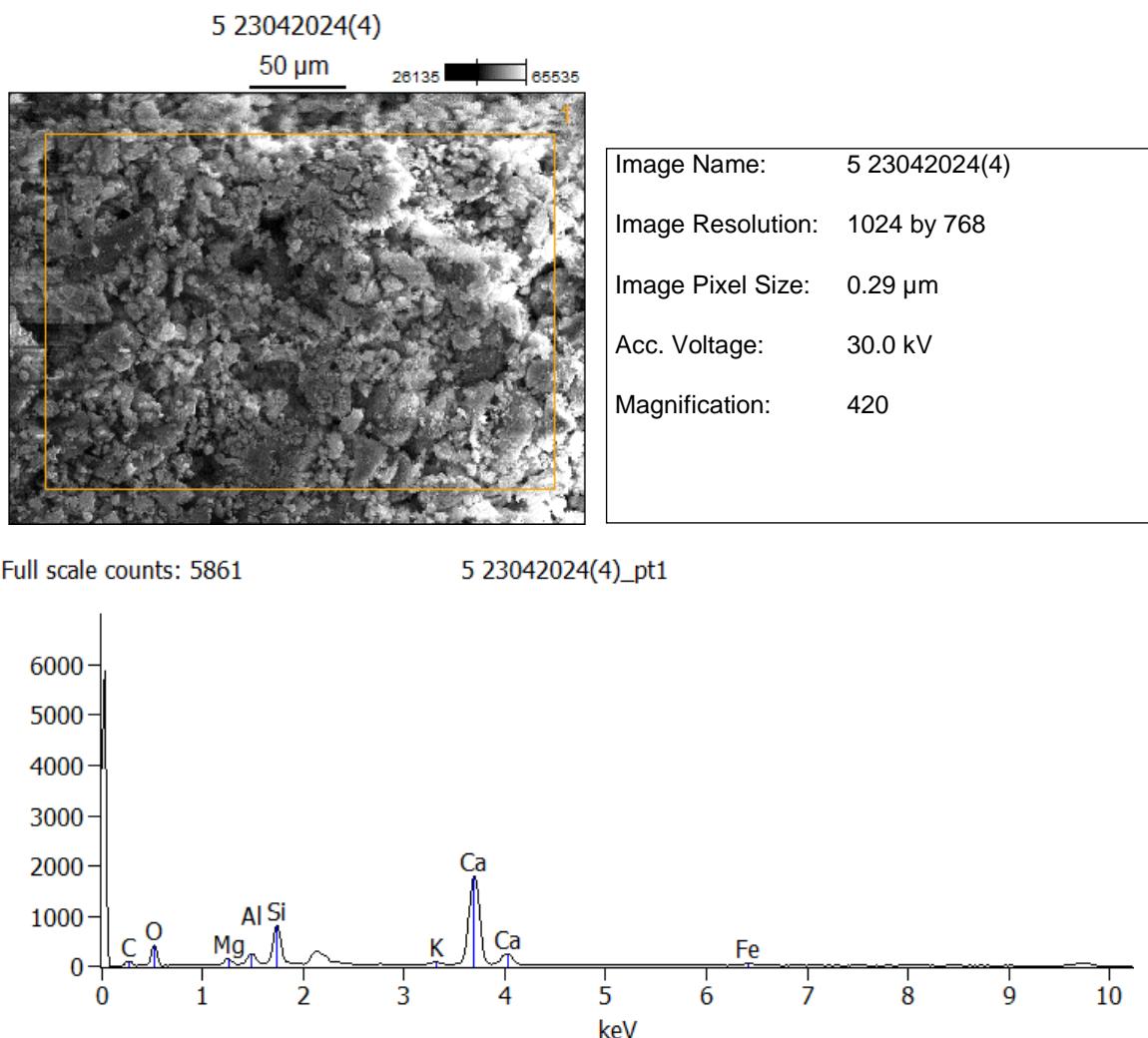
Рисунок 3.4 – сцепление полистирола с цементным тестом  
(1-гранулы полистирола)

Рисунок 3.4 иллюстрирует адгезионную связь между пенополистирольной гранулой и цементной матрицей, обусловленную предварительной обработкой поверхности гранулы известковым молочком [59]. Известковое молочко является водной дисперсией гидроксида кальция, которая обладает высокой щелочностью и способностью к образованию пленки на поверхности гранул полистирола. За счет этого создаются благоприятные условия для кристаллизации продуктов гидратации цемента, особенно гидросиликатов кальция. Формирование тонкого кальциевого слоя обеспечивает улучшенное смачивание поверхности гранулы цементным раствором, что способствует сохранению контактной зоны без заметных микротрещин или пустот. На поверхности гранулы имеется налёт гидроокиси кальция, который создаёт промежуточный слой для взаимодействия с цементными гидратами. Это способствует формированию плотной и непрерывной контактной зоны, которая характеризуется уменьшением количества микропустот на границе раздела фаз [59]. Результаты SEM анализа подтверждают, что применение известкового молочка, наблюдается отсутствие отрывов цементного камня от полимерных гранул, а также более равномерное распределение цементной матрицы в контактных зонах. Кроме того, положительный эффект использования известкового молочка проявляется в стабилизации структуры цементного камня в контакте с гранулами полистирола. Вследствие высокой концентрации ионов кальция происходит ускорение гидратации цементного теста, а также снижение подвижности воды в контактной зоне, что снижает риск локального расслоения. Цементная паста визуально проникла в мельчайшие неровности гранулы, обеспечив плотное и непрерывное соединение. Такая микроструктура является характерной для составов, где обработка известковым молочком улучшает межфазное сцепление. Результатом становится повышение

общей прочности композита, снижение склонности к локальным разрушениям и уменьшение количества дефектов, типичных для необработанных гранул.

### 3.2 Рентгеноспектральный анализ состава цементной матрицы

При проведении EDX (рентгеноспектрального) анализа двух составов цементного камня (предлагаемого состава с дополнительной поризацией и контрольного образца), были получены результаты с примерно идентичным химическим составом. При этом теплоизоляционные свойства предлагаемого состава выше, чем у контрольного, благодаря дополнительной поризации цементного теста.



Weight %								
	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
5 23042024(4)_pt1	6.60	46.12	2.26	3.62	11.11	0.56	28.51	1.22

Weight % Error (+/- 1 Sigma)								
	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
5 23042024(4)_pt1	±0.37	±1.16	±0.15	±0.10	±0.18	±0.05	±0.28	±0.12

Atom %								
	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
5 23042024(4)_pt1	11.44	60.03	1.94	2.79	8.24	0.30	14.81	0.46

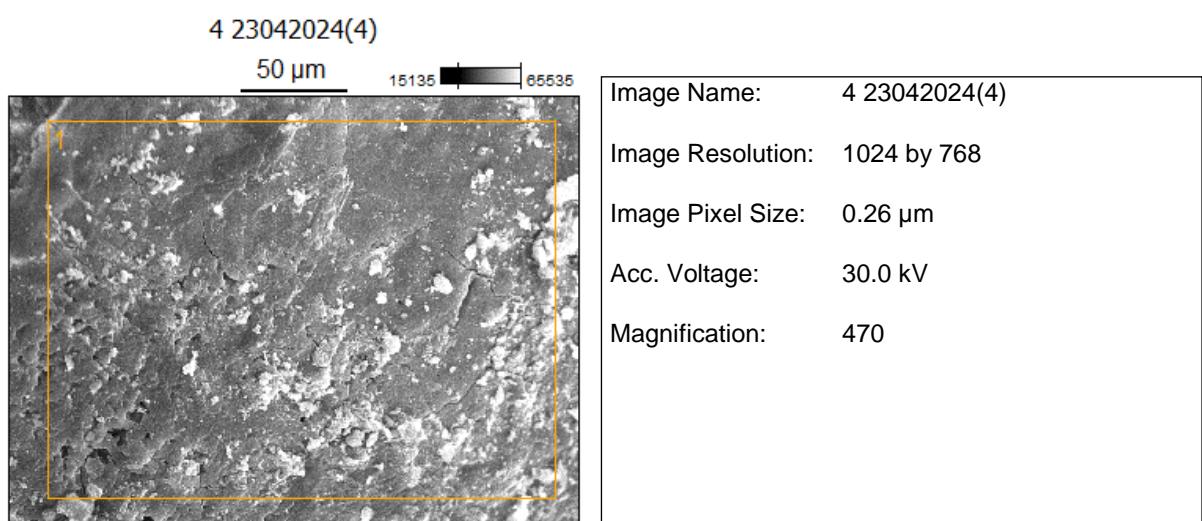
  

Atom % Error (+/- 1 Sigma)								
	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K
5 23042024(4)_pt1	±0.64	±1.50	±0.13	±0.08	±0.13	±0.03	±0.15	±0.04

Рисунок 3.5 - EDX (рентгеноспектрального) анализ предлагаемого состава

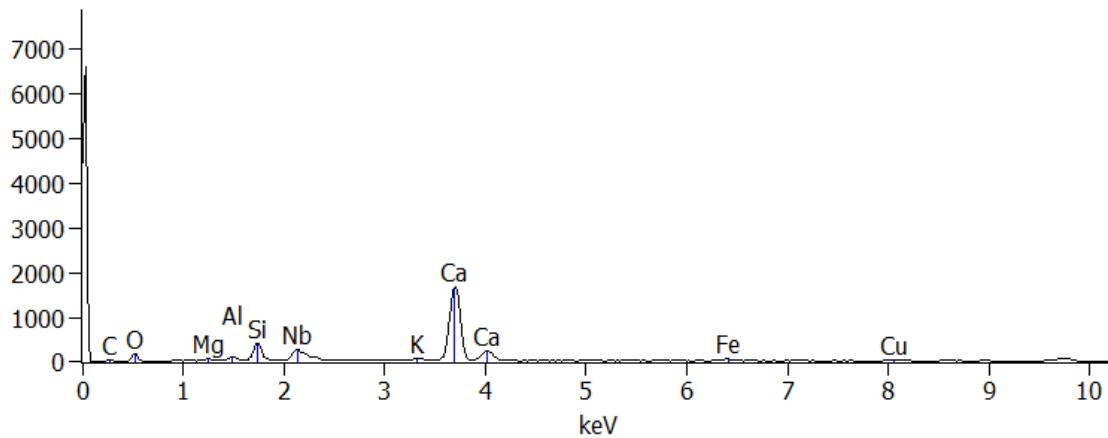
Применяемый молотый доменный шлак представляет собой аморфное кальций-алюмосиликатное стекло, которое вследствие добавления  $\text{H}_2\text{O}$  имеет тенденцию разрушаться. При этом выделяются Ca и  $\text{SiO}_2$ . Они в свою очередь вступают в реакцию с гидратов C–S–H и C–A–S–H, которые фиксируют частицы в системе.

В исследуемом шлаке содержание оксида кальция превышает 38%, данное количество обеспечивает набор прочности при взаимодействии с водой. Однако наличие кальция не обеспечивает неограниченную самостоятельную способность к твердению, что связано с медленным формированием гидратов кальций-силикатного типа (C–S–H). При взаимодействии с цементом, который служит активатором и повышает pH раствора, система получает способность к повышенной гидравлической активности [55].



Full scale counts: 6574

4 23042024(4)\_pt1



Weight %											
	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Cu-K	Nb-K	
4 23042024(4)_pt1	3.43	35.49	1.06	1.81	8.96	0.78	42.57	2.21	3.32	0.38	

Weight % Error (+/- 1 Sigma)											
	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Cu-K	Nb-K	
4 23042024(4)_pt1	$\pm 0.27$	$\pm 1.48$	$\pm 0.12$	$\pm 0.11$	$\pm 0.22$	$\pm 0.07$	$\pm 0.42$	$\pm 0.19$	$\pm 0.29$	$\pm 1.81$	

Atom %											
	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Cu-K	Nb-K	
4 23042024(4)_pt1	6.94	53.95	1.06	1.63	7.76	0.48	25.83	0.96	1.27	0.10	

Atom % Error (+/- 1 Sigma)											
	C-K	O-K	Mg-K	Al-K	Si-K	K-K	Ca-K	Fe-K	Cu-K	Nb-K	
4 23042024(4)_pt1	$\pm 0.54$	$\pm 2.26$	$\pm 0.12$	$\pm 0.10$	$\pm 0.19$	$\pm 0.04$	$\pm 0.26$	$\pm 0.08$	$\pm 0.11$	$\pm 0.47$	

Рисунок 3.6 - EDX (рентгеноспектрального) анализ контрольного образца

Из рисунков 3.5 и 3.6 видно, что химический состав практически не изменился, однако на предлагаемом образце (рисунок 3.5) видна более пористая структура материала, которая приведет к дополнительной теплоизоляции, а также уменьшению себестоимости материала.

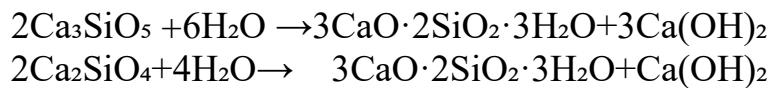
В формировании структуры и свойств цементного камня основную роль играют процессы гидратации и пуццолановые реакции, протекающие с участием активированных компонентов доменного гранулированного шлака. В ходе гидратации минеральных фаз цемента (в частности, трикальциевого и дикальциевого силикатов) образуются гидросиликаты кальция и гидроксид кальция, формирующие прочный каркас цементного камня.

Выделяющийся в процессе гидратации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  вступает во взаимодействие с активными кремнезём- и алюмосиликатсодержащими соединениями шлака, что инициирует пуццолановую реакцию. В результате этого взаимодействия

образуются дополнительные гидратные фазы — в основном низкоосновные гидросиликаты и гидроалюминаты кальция. Эти продукты повышают прочность и устойчивость к внешним воздействиям.

Таким образом, совместное протекание гидратационных и пущолановых процессов способствует формированию однородной и прочной микроструктуры цементного камня на основе доменного шлака, что обеспечивает улучшенные эксплуатационные характеристики и долговечность получаемого материала.

Гидратация силикатов кальция является основным процессом, формирующим структуру и прочность цементного камня:



При этом образуется гидросиликат кальция (С–S–Н-гель), формирующий основную структуру вяжущего, и гидроксид кальция, поддерживающий щелочную среду.

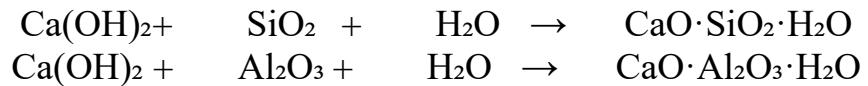
Гидратация алюминатов:



При наличии сульфатов протекает реакция образования этtringита:

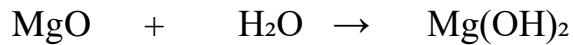


Реакция шлака с продуктами гидратации цемента (пущолановая реакция):



В результате данных реакций образуются дополнительные гидросиликаты и гидроалюминаты кальция, которые уплотняют структуру и повышают прочность материала.

Гидратация периклаза шлака:



Суперпластификатор адсорбируется на поверхности частиц цемента, создавая электростатическое отталкивание и повышая диспергирование:



В результате удается снизить количество воды затворения, следовательно, увеличить прочность бетона. Воздухововлекающая добавка снижает

поверхностное натяжение воды и способствует образованию стабильных воздушных пор.

В результате совместного протекания реакций гидратации и взаимодействия шлаковых фаз формируется плотная матрица из гелей С–S–Н и С–А–Н, пронизанная равномерно распределёнными порами от воздухововлекающей добавки и включениями гранул полистирола, обеспечивающих низкую теплопроводность.

### **3.3 Пористость высокопоризованного полистиролбетона**

Пористость бетонной смеси была исследована согласно ГОСТ 12730.4-2020 с применением компрессионного метода. Для исследования применялся поромер (рисунок 3.7)



Рисунок 3.7 – Поромер для определения пористости бетонной смеси

Практическим путем было зафиксировано, что применение воздухововлекающей добавки позволяет увеличить объем вовлеченного воздуха примерно на 1,5%. Также в работе [60] было установлено, что пропаривание бетона позволяет увеличить его пористость почти на 3 %. Увеличение объема вовлеченного воздуха более чем на 5% приводит к значительному снижению прочности бетона.

### **3.4 Влияние режима твердения на свойства высокопоризованного полистиролбетона**

Структурообразование в бетоне напрямую зависит от режима твердения, который, в свою очередь, определяется скоростью протекания гидратационных реакций. Качество структурообразования определяет в дальнейшем эксплуатационные характеристики бетонных изделий и конструкций, их поведение в условиях внешней среды. Грамотно выбранный режим структурообразования позволяет определять соотношение пористости и прочности, обеспечивая готовым изделиям нужные теплоизоляционные и физико-механические свойства [60-64].

Исследуемый ВППБ относится к группе теплоизоляционно-конструкционных бетонов, особенностью которого является высокое содержание воздушных пор и гранул полистирола. Такие характеристики обеспечивают ему низкую теплопроводность и достаточную несущую способность. Но контроль таких характеристик определяется условиями твердения, поскольку температурная составляющая твердения наибольшим образом влияет на качество и структуру цементной матрицы, а также стойкости полимерного заполнителя.

Естественные условия твердения (комнатная температура и стабильная влажность) способствуют постепенному увеличению прочности бетона. Такой режим благоприятен для сохранности пористой структуры, однако его главным недостатком является временной промежуток, а это, в свою очередь, снижает технологическую эффективность при производстве панелей [65,66].

Оптимизировать производство можно за счет применения тепловой обработки, которая позволит сократить время производства с нескольких дней до нескольких часов, благодаря воздействию правильно подобранного температурного режима. Температурное воздействие способствует активации гидратации цементных минералов, образованию гидросиликатов кальция и стабилизации ранней прочности цементного камня.

При установке температурного режима важно учитывать особенности поведения гранул полистирола, а именно их склонность к деструкции под воздействием высоких температур (75–80 °C). Разрушение гранул полистирола влечет изменение их формы и как следствие, ослабление сцепления между ними и цементной матрицей [67,68].

Таким образом, для обеспечения баланса между интенсивными химическими реакциями в цементной матрице и сохранности структуры полистирола, важно установить оптимальный режим твердения при производстве трехслойных стеновых панелей со слоем высокопоризованного полистиролбетона.

Исследования проводились по следующим режимам твердения:

- твердение в естественных условиях. Образцы испытывались на прочность в возрасте 3, 7, 14 и 28 суток. Образцы хранились в специализированном шкафу под пленкой с опилками. Средняя температура за 28 суток в лабораторном помещении  $t = 23^{\circ}\text{C}$  и  $W = 75^{\circ}\text{C}$ .

- твердение в условиях тепловой обработки.

Тепловая обработка ускоряет процессы твердения за счет гидратации вяжущего, следовательно, увеличивается прочность бетона на ранних сроках. На

на рисунке видно, что на начальном этапе твердения бетон уже набирает прочность, которую бетон в обычных условиях твердения набирает лишь к 28 суткам. Отсюда можно сделать вывод, что тепловая обработка позволяет:

- сократить срок набора прочности от начальной до требуемой;
- оптимизировать производственный цикл;
- повысить раннюю прочность, что особенно важно для транспортировки и монтажа,
- снизить затраты на хранение и складирование продукции.

Существуют риски деструктивных режимов тепловой обработки [68]. Чаще всего это резкий подъем температуры, а также чрезмерно высокая температура. Это может привести к образованию микротрещин, неравномерному твердению бетона, или снижению долговременной прочности. Стадии тепловой обработки представлены на рисунке 3.10:



Рисунок 3.10 - Стадии тепловой обработки трехслойных стеновых панелей

В процессе тепловой обработки происходит ускоренная гидратация цементного камня и снижение сроков набора итоговой прочности. Важно отметить, что гранулы полистирола «чувствительны» к температурному воздействию выше 80°C. По этой причине важно обеспечить баланс между ускорением гидратационных процессов и сохранностью гранул полистирола. По технологии нагрева выделяют три стадии: предварительный нагрев, изотермическая выдержка, постепенное охлаждение. Для высокопоризованного полистиролбетона ограничение температурного режима регламентируется 60-70 °C, а также относительной влажностью не ниже 90%. Такие параметры обеспечивают процессы гидратации без деструктивного воздействия на полимер.

Стадии тепловой обработки трехслойных стеновых панелей:

1) Нагрев до температуры 60  $^{\circ}\text{C}$  – 3 часа: целью данного этапа является равномерное распределение температуры по всему объему изделия с предотвращением термошока, а также активизацией начального этапа гидратации вяжущего ( $\text{C}_2\text{S}$  и  $\text{C}_3\text{S}$ ). Тепловой режим на первой стадии изменяется по экспоненциальному закону. Изменение температуры со временем можно описать следующим уравнением:

$$T(t) = T_o + (T_{\max} - T_o)(1 - e^{-kt}),$$

где:  $T_o$  – входная температура смеси,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$T_{\max}$  – температура в конце стадии,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$k$  – коэффициент теплопередачи ( $0,3\text{-}0,5 \text{ ч}^{-1}$ );

$t$  – время, ч

Продолжительность первой стадии обычно не превышает 2-3 ч, а скорость нагрева 15-20  $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$ . На этом этапе тепло, которое выделяется во время гидратации цемента соединяется с внешним тепловым воздействием, тем самым выстраивая плавный температурный градиент по сечению изделия. Также на данной стадии усиливается гидратация  $\text{C}_3\text{S}$ , происходит начало кристаллизации (C-S-H(I)), начинается связывание свободной  $\text{H}_2\text{O}$  в геле [64].

В первый этап термообработки также характеризуется тем, что изделие впитывает в себя дополнительную влагу за счет конденсации (охлаждения) пара при соприкосновении с изделием и бортиками форм [64]. При нагревании происходит расширение составляющих бетона, в особенности воды и воздуха, так как они имеют самые высокие коэффициенты температурного расширения. В первом периоде не допустимо снижение давления, так как это приведет к испарению воды и может являться причиной разрушения готового изделия.

2) Изотермическая выдержка изделий при температуре 60  $^{\circ}\text{C}$  – 12 часов. Целью этого этапа является достижение максимальной гидратации цементного камня. Во время изотермической выдержки бетон достигает около 80% проектной прочности. Здесь активно образовываются гидросиликаты и гидроалюминаты кальция, которые являются основополагающим фактором в структурообразовании бетона. Процессы, происходящие с бетоном в автоклаве, подчиняются термофизическими законам, влияющих на его структуру.

Общая реакция гидратации на данном этапе описывается следующим образом:



Частичная деструкция гранул полистирола под воздействием высоких температур снижает адгезию гранул с цементным камнем. Оптимальной признана температура не более 65  $^{\circ}\text{C}$ . При данной температуре происходит гидратация без повреждения гранул полистирола.

Экспоненциальное увеличение прочности на данном этапе описывается уравнением:

$$R_t = R_\infty (1 - e^{-\beta t}),$$

где  $R_t$  - прочность в момент времени  $t$ , МПа

$R_\infty$  - прочность при тотальной гидратации, МПа

$\beta$  – коэф. скорости гидратации, ( $0,25-0,35\text{ч}^{-1}$  для  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Следующим этапом требуется постепенное охлаждение.

3) Выдержка изделий в камере при снижении температуры – 4 часа. Основной упор в данной стадии делается на снятие термических напряжений в бетоне, предотвращение растрескивания и его усадки. Понижение температуры происходит постепенно ( $10-15\text{ }^{\circ}\text{C/ч}$ ). Температурная зависимость выражена следующим уравнением:

$$T(t) = T_{\max} - ut,$$

где  $u$  – скорость охлаждения,  $^{\circ}\text{C/ч}$

В процессе снижения давления, важно контролировать скорость снижения давления, чтобы предотвратить повреждения в бетоне. Остыивание происходит медленно из-за низкого теплообмена. Резкое понижение температуры приводит к образование трещин на границе цементный камень/гранулы полистирола. Это происходит из-за разных коэффициентов температурного расширения:

$$\Delta = (\alpha_c - \alpha_p) \Delta T$$

$\alpha_c \approx 10^{-5}\text{C}^{-1}$  – для цементного камня,

$\alpha_p \approx 7 \times 10^{-5}\text{C}^{-1}$  – для полистирола.

Таким образом, плавное понижение температуры предотвращает микротрещины в изделии, а оптимальный режим тепловой обработки позволяет добиться прочности в структуре бетона.

Проведены исследования влияния тепловой обработки на прочность изделий в сравнении с прочностью изделий, твердеющих в нормальных условиях [60-68].

Преимущество пропаривания подтверждается также тем, что прочность прогретого бетона стабильно выше примерно на 30% по сравнению с аналогичными образцами, выдержаными без тепловой обработки. Таким образом, градуировочная зависимость, представленная на рисунке 3.9, может служить основой для корректировки технологических режимов производства и оптимизации процессов твердения в зависимости от требований к прочности на различных этапах.

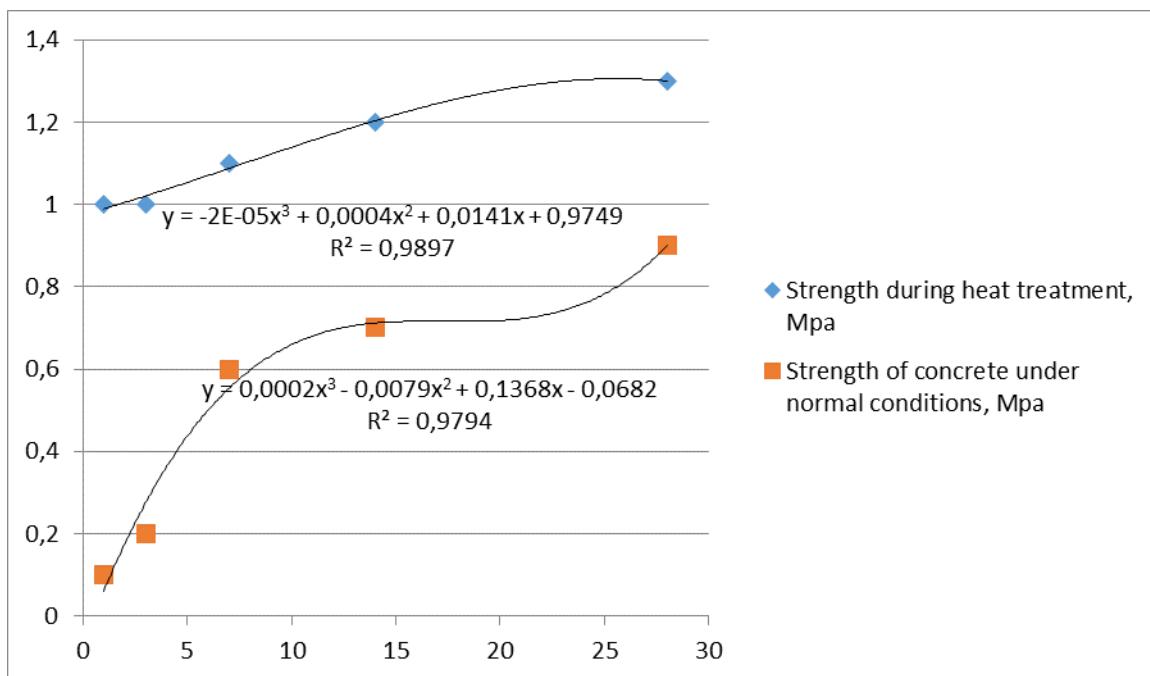


Рисунок 3.9 – Кореляционная зависимость набора прочности образцов

На начальной стадии прогрева происходит активное удаление воздуха и летучих компонентов (в частности, изопентана), выделяющегося из гранул вспученного полистирола при нагреве. Образующаяся при этом паровоздушная смесь, находясь в жидкой фазе цементного теста, формирует микроканалы и поры, способствующие дальнейшему выводу газов. Этот процесс облегчён за счёт расширения смеси и наличия технологических швов в формах, которые обеспечивают пути выхода.

Подтверждением этого служит снижение плотности полистиролбетона после тепловой обработки на 7% по сравнению с образцами, твердевшими в нормальных условиях (см. таблицу 1). Уменьшение плотности связано с уменьшением содержания влаги и удалением воздушно-газовой смеси из структуры материала, что, в свою очередь, влияет на формирование более облегчённой и равномерной пористой структуры.

Тем не менее, такая структура не приводит к ухудшению прочностных характеристик, а напротив — в совокупности с ускоренной гидратацией цемента и повышенной кристаллизацией гидратных фаз способствует росту прочности. Таким образом, правильно подобранный режим прогрева позволяет не только ускорить твердение, но и формировать оптимальные физико-механические свойства материала.

### 3.5 Выводы

1. В ВППБ дополнительные поры в цементном камне образуются за счет вводимой добавки. Аэродоражия бетона происходит за счет химических реакций, в ходе которых появляются пузырьки воздуха в бетонной смеси.

2. Результаты SEM анализа подтверждают, что применение известкового молочка, наблюдается отсутствие отрывов цементного камня от полимерных гранул, а также более равномерное распределение цементной матрицы в контактных зонах.

3. При проведении EDX (рентгеноспектрального) анализа двух составов цементного камня (предлагаемого состава с дополнительной поризацией и контрольного образца), были получены результаты с примерно идентичным химическим составом. При этом теплоизоляционные свойства предлагаемого состава выше, чем у контрольного, благодаря дополнительной поризации цементного теста.

4. При взаимодействии доменного шлака с цементом, который служит активатором и повышает рН раствора, система получает способность к повышенной гидравлической активности.

5. Применение воздухововлекающего модификатора в совокупности с тепловой обработкой позволяет увеличить пористость материала примерно на 3%.

6. Для обеспечения баланса между интенсивными химическими реакциями в цементной матрице и сохранности структуры полистирола, важно установить оптимальный режим твердения при производстве трехслойных стеновых панелей со слоем высокопоризованного полистиролбетона.

7. Для высокопоризованного полистиролбетона ограничение температурного режима регламентируется 60-70 °C, а также относительной влажностью не ниже 90%. Такие параметры обеспечивают процессы гидратации без деструктивного воздействия на полимер.

## **4 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕХСЛОЙНЫХ СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ С ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫМ СЛОЕМ ВЫСОКОПОРИЗОВАННОГО ПОЛИСТИРОЛБЕТОНА**

Разработка технологии производства трехслойных стеновых панелей со слоем высокопоризованного полистиролбетона требует решения ряда задач, которые напрямую затрагивают такие аспекты, как: подбор состава для легкого и тяжелого бетонов, обеспечение адгезии между слоями, оптимизация технологических режимов формования и гидратации.

При проектировании конструкции трехслойной панели учитываются различия в физических свойствах внутреннего и наружных слоев панели, а именно – модуль упругости, коэффициент теплового расширения и влагоперенос [69]. С целью обеспечения прочности сцепления слоев и их совместной работы следует определить рациональный порядок укладки смесей, их уплотнение и твердение. Трехслойная стеновая панель со слоем ВППБ разрабатывалась согласно ГОСТ 31310. На разработанную технологию производства получено свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом №66084 (приложение Б).

### **4.1. Разработанная конструкция трёхслойной панели с теплоизоляционным слоем высокопоризованного полистиролбетона**

Разработка технологии изготовления трехслойной стеновой панели направлена на изготовление конструкции, теплоизоляционным слоем которой выступает слой высокопоризованного полистиролбетона. Оптимизация технологических параметров повысит производительность, сохраняя при этом теплоизоляционные и прочностные свойства [70-72].

Механические и теплофизические характеристики всех слоев предлагаемой панели были исследованы в аккредитованной лаборатории г. Караганда ТОО «Технический контроль зданий и сооружений» (приложение В) и имеют следующие показатели (таблица 4.1):

Таблица 4.1 - Механические и теплофизические характеристики слоев трехслойной стеновой панели

Характеристика	Внутренний слой	Высокопоризованный полистиролбетон	Наружный слой
Теплопроводность, мВт/м <sup>0</sup> С	1,74	0,095	1,74
Паропроницаемость, мг/м <sup>2</sup> *ч*Г	0,03	0,087	0,03
Марка по прочности на сжатие	B30	B1,5	B30

Все показатели исследуемой панели соответствуют стандартам нормативной документации [69].

## 4.2 Теплотехнический расчет трехслойной стеновой панели

Теплоизоляционная эффективность применения трехслойных стеновых панелей с теплоизоляционным слоем ВППБ, а также их соответствие нормативным требованиям по тепловой защите зданий подтверждается теплотехническим расчетом.

Толщина наружного слоя тяжелого бетона выбрана 80 мм класса В25 обеспечивает необходимую морозостойкость и стойкость к атмосферным воздействиям (солнечная радиация, атмосферные осадки). Толщина менее 80 мм увеличивается риск растрескивания конструкции и появление термоусадочных деформаций при тепловой обработке.

Теплоизоляционный слой высокопоризованного полистиролбетона в 310 мм класса В1.5 определен исходя из теплотехнического расчета:

$$R_0 = \frac{1}{a_u} + \frac{\delta_{вн}}{\lambda_{вн}} + \frac{\delta_{т.с}}{\lambda_{т.с}} + \frac{\delta_{нап}}{\lambda_{нап}} + \frac{1}{a_n} \quad (4.1)$$

где  $R_0 \geq R_{тр}$  – нормы сопротивления теплопередаче для наружных стен.

В условиях резко-континентального климата центрального Казахстана нормативное значение  $R_{тр}$  составляет не менее  $3,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ . Расчет показал, что при  $\delta_{т.с} = 0,31 \text{ м}$  сопротивление  $R_0 = 3,52 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ , что соответствует требованиям энергоэффективности с запасом 10%. Кроме того, выбранная толщина обеспечивает смещение изотермы  $0^\circ\text{C}$  ближе к наружной зоне, тем самым снижая риск влаги внутреннего бетона. Толщина более 310 мм приведет к нерациональному использованию ресурсов, а также избыточна с точки зрения теплотехники.

Внутренний слой трехслойной панели выполняет роль конструктивной жесткости и восприятия нагрузок при монтаже, а также стабилизации микроклимата внутри помещения, обеспечивает сцепление с армокаркасом и анкерами. Толщина 70 мм приемлема для обеспечения необходимой прочности и анкеровки без избыточного утяжеления конструкции. Снижение толщины приведет к снижению несущей способности, а увеличение толщины нецелесообразно утяжелит конструкцию.

Таким образом толщина слоев трехслойной стеновой панели со слоем высокопоризованного полистиролбетона равна:

$$\delta_{нап} = 0,08 \text{ м}$$

$$\delta_{т.с} = 0,31 \text{ м}$$

$$\delta_{\text{вн}} = 0,07 \text{ м}$$

Теплотехнический расчет выполнен по следующим нормативным документам: МСП 2.04-101-2001 «Проектирование тепловой защиты зданий»

СН РК 2.04-07-2022\* «Энергопотребление и тепловая защита гражданских зданий»

- СП РК 2.04-107-2022 «Строительная теплотехника»

ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях»

В первую очередь необходимо определение требуемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций

Расчетная температура воздуха внутри жилых помещений  $t_{\text{int}} = +21^{\circ}\text{C}$  (принята по таблице 1 МСП 2.04-101-2001, согласно ГОСТ 30494-2011).

Исходные данные для расчета были приняты согласно приложению 3 СН РК 2.04-07-2022\*:

- расчетная температура наружного воздуха наиболее холодной пятидневки  $t_{\text{ext}} = -32^{\circ}\text{C}$  (таблица 1\*); по СНиП 23-01-99\* МСН 2.04-01-98

- расчетная температура наружного воздуха средней за отопительный период  $t_{\text{ext}}^{\text{av}} = -6,9^{\circ}\text{C}$  (таблица 3.1\*);

- продолжительность отопительного периода  $z_{\text{ht}} = 214$  сут (таблица 3.3\*).

Согласно п. 4.1.2 МСП 2.04-101-2001 градусо- сутки отопительного периода  $D_d$  вычисляются по формуле (4.2):

$$D_d = (t_{\text{int}} - t_{\text{ext}}^{\text{av}}) \cdot z_{\text{ht}}; \quad (4.2)$$

$$D_d = (21 - (-6,9)) \cdot 214 = 5971 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{сут};$$

Нормируемые значения сопротивления теплопередаче  $R_0^{\text{req}}$  ограждающих конструкций принимаем исходя из величины градусо- суток отопительного периода для жилых зданий и помещений по таблице 4 СН РК 2.04-07-2022. Согласно примечанию 1 промежуточные значения  $R_0^{\text{req}}$  определяются по формуле (4.3):

$$R_0^{\text{req}} = a \cdot D_d + b; \quad (4.3)$$

Требуемые значения сопротивления теплопередаче наружной стены-

$$R_w = 0,00035 \cdot 5971 + 1,4 = 3,49 \text{ (м}^2 \cdot \text{ }^{\circ}\text{C) / Вт};$$

Согласно п. 6.3 приложения 6 СН РК 2.04-21-2004\* условия эксплуатации ограждающих конструкций определяются в зависимости от влажностного режима помещений и зон влажности:

- влажностный режим помещений- сухой (таблица 6.1);

- условия эксплуатации ограждающих конструкций- А (таблица 6.2);

Согласно МСП 2.04-101-2001 сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции определяется по формуле (4.4):

$$R_0 = R_{si} + R_k + R_{se} \quad (4.4)$$

где

$R_k$ - термическое сопротивление ограждающей конструкции,

$R_{si} = 1/\alpha_i$  ,  $\alpha_i$  - коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ , принимаемый по таблице 4\* СНиП РК 2.04-03-2002;

$R_{se} = 1/\alpha_e$  ,  $\alpha_e$  - коэффициент теплоотдачи (для зимних условий) наружной поверхности ограждающей конструкции,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ , принимаемый по таблице 6\* СНиП РК 2.04-03-2002;

$$\alpha_i = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}); \alpha_e = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}).$$

Коэффициент теплопроводности материала – 0,1  $\text{Вт}/\text{м}^* \text{°C}$ .

Толщину теплоизоляционного материала принимаем 310 мм.

$$R_0 = 1/8,7 + 0,08/1,74 + 0,31/0,095 + 0,075/1,74 + 1/23 = 3,52 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт};$$

$$R_0 = 3,52 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$$

$$R_0 = 3,52 > R_w = 3,49 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$$

Таким образом, суммарное сопротивление теплопередаче всех слоев трехслойной стеновой панели, включая сопротивления теплоотдаче внутренних и наружных поверхностей, обеспечивает требуемый уровень теплозащиты здания в условиях заданного температурного режима эксплуатации.

### 4.3 Расчет прочности трехслойной стеновой панели

Для расчета прочности были использованы два вида панелей (приложение Г). Расчетная схема была построена и рассчитана в ПК Лира-САПР 2024. Согласно расчетам, максимальный прогиб панелей от действия ветровой нагрузки составляет 1,4мм, что не превышает предельных значений  $6000/200=30$ мм. Прочность по 2-му предельному состоянию обеспечена. По результату анализа, для обеспечения прочности панелей, требуемое армирование слоёв из тяжелого бетона сеткой диаметром 8мм класса А500 с шагом 150мм.

#### **4.4 Существующая технологическая схема изготовления трехслойных стеновых панелей**

Конструкция трехслойных стеновых панелей является многослойной системой, состоящей из железобетонных наружного и внутреннего слоев, а также из теплоизоляционного слоя эффективного утеплителя. Слои соединены между собой гибкими связями (сварными, стальными или композитными).

Технологическая схема производства таких панелей совершенствовалась параллельно с новшествами в нормативной документации и появлением новых ресурсов с сфере строительства. На сегодняшний день процесс производства трехслойных стеновых панелей это комплекс технологических операций, включающих в себя формирование точных геометрических параметров, теплоизоляционных свойств панели, обеспечение прочности панели за счет арматурных каркасов, послойное бетонирование, установку связей, тепловую обработку, а также контроль качества на всех стадиях [72-74].

На заводах ЖБИ изделия производятся по следующей технологии:

1. Паллета с формами для изделий очищается и смазывается на станции очистки.
2. Параллельно рабочими изготавливается арматурный каркас для изделий.
3. После станции очистки паллета отправляется на пост армирования, где устанавливаются в формы готовые объемные арматурные каркасы.
4. После окончания операции службой контроля производится проверка сборки и подготовки формы.
5. После окончания работ по сборке армирования паллета отправляется на пост бетонирования, где бетоносмесительный узел замешивает необходимое количество бетонной смеси и разгружает его в бетонораздатчик, расположенный на посту бетонирования. Цемент хранится в сilosах. Крупный и мелкий заполнители хранятся в бункерах, куда подаются с основных открытых складов. Вода для затворения подается с резервуара, добавка хранится в герметичных резервуарах.
6. После укладки смеси производится виброуплотнение.
8. Далее устанавливаются плиты утеплителя (пенополистирол).
9. После - бетонирование второго слоя. Далее происходит заглаживание поверхности изделий.
10. Далее паллета с заформованными изделиями отправляется по линии в камеру тепло-влажностной обработки.
11. По истечении времени, необходимой для набора распалубочной прочности, паллета вынимается из камеры и производится съем изделий.
12. Изделия после проверки ОТК отгружаются на склад готовой продукции.
13. Освобожденная паллета вновь по новому циклу направляется на станцию чистки и смазки.

Существующая технология требует некоторого ручного труда по сравнению с предлагаемой, например, установка связей и укладка пенополистирольной плиты (рисунок 4.3):



Рисунок 4.3 – Процесс установки связей на полистирольную плиту

Каждый этап производства оказывает существенное влияние на поведение трехслойных стеновых панелей во время эксплуатации. Так, изготовление и укладка бетонной смеси определяет прочность конструкции и ее адгезию, выбор и установка утеплителя определяет теплоизоляционные свойства панели, режимы тепловой обработки – прочность и долговечность конструкции [75].

#### **4.5 Технологическая схема изготовления трехслойных стеновых панелей со слоем ВППБ**

Технология производства трехслойных стеновых панелей со слоем ВППБ разработана на основании существующей технологии, однако себестоимость изделий значительно ниже, кроме того, затрачивается меньше времени на производство. Технология изготовления стеновых панелей с использованием теплоизоляционного слоя из полистиролбетона (рисунок 4.4):

1. На форму с опалубкой устанавливается арматурная сетка, после чего подается смесь тяжелого бетона.
2. После укладки смесь уплотняется в течение 30 с.

3. Затем палета отъезжает в камеру предварительного твердения до начала схватывания бетонной смеси на 10 мин, а на ее место поступает новая палета.

4. По истечении 10 мин на только что схватившуюся смесь тяжелого бетона укладывается смесь легкого ВПБ.

5. После укладки двух слоев бетона, палета снова отправляется в камеру предварительного твердения для схватывания легкого бетона на 10 мин.

6. На схватившуюся смесь легкого бетона устанавливается каркас арматуры и заливается второй слой тяжелого бетона аналогично с первым слоем.

7. Второй слой тяжелого бетона уплотняется с помощью погружного вибратора.

8. Готовая стеновая панель отправляется в камеру тепловлажностной (ТВО) обработки на 12 часов, где проходит все стадии изотермического прогрева.

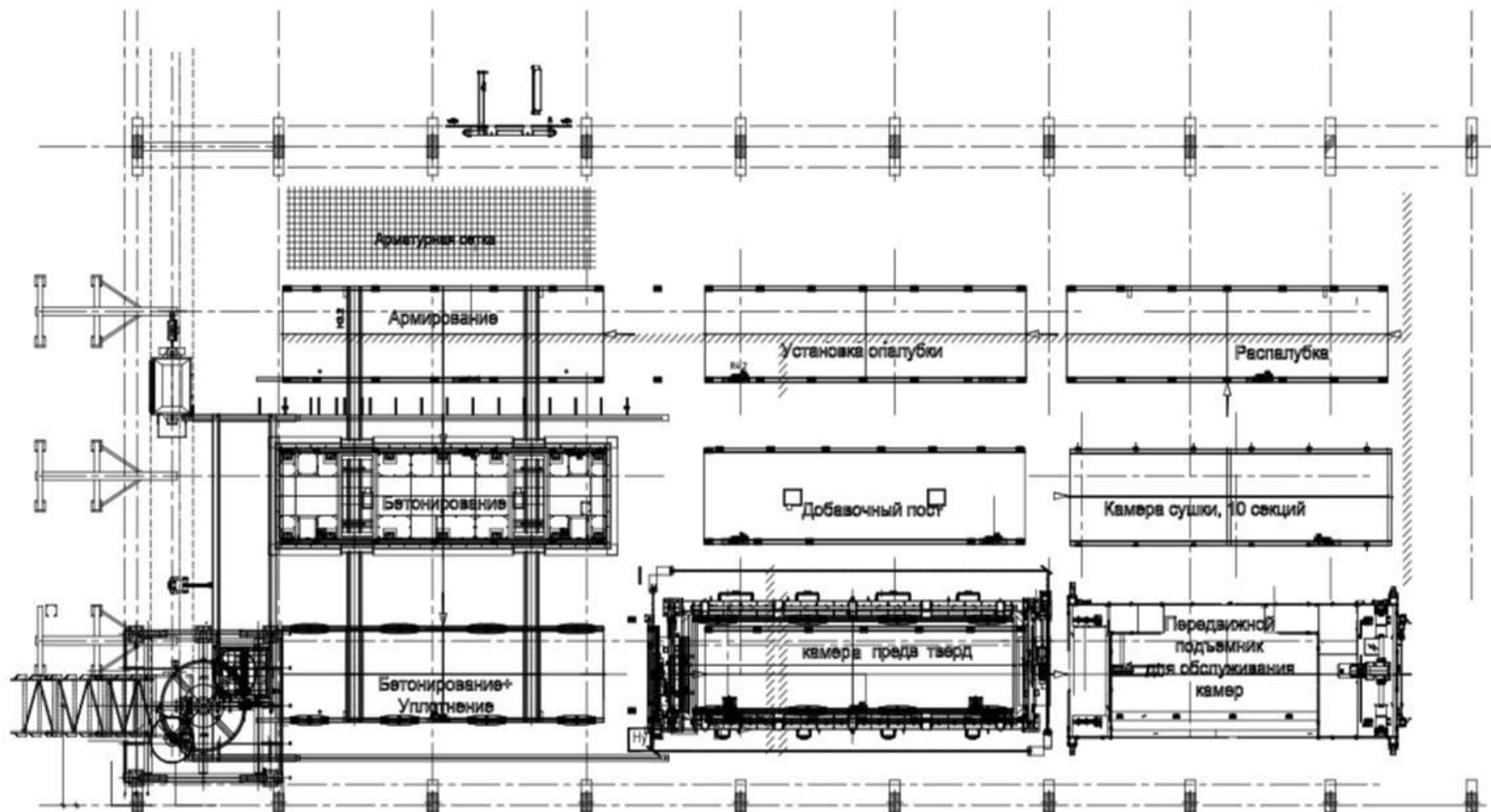


Рисунок 4.4 – Технологическая схема предлагаемой технологии производства трехслойных стеновых панелей

Сравнительная времененная характеристика существующей и предлагаемой технологий приведена в таблице 4.2:

Таблица 4.2 - Сравнительная временная характеристика существующей и предлагаемой технологий изготовления трехслойных стеновых панелей

№	Существующая технология	t, мин	Разработанная технология	t, мин
1	Установка форм	10	Установка форм	10
2	Установка арматурной сетки	3	Установка арматурной сетки	3
3	Укладка тяжелого бетона	5	Укладка тяжелого бетона	5
4	Уплотнение тяжелого бетона	1	Уплотнение тяжелого бетона	1
5	Нарезка ППС плиты для укладки на слой тяжелого бетона	15	Укладка ТИ слоя	5
6	Укладка ППС плиты	5	Установка арматурного каркаса	5
7	Установка связей для сцепления ППС плиты с бетоном (вручную)	7	Укладка тяжелого бетона	5
8	Установка арматурного каркаса	5	Уплотнение тяжелого бетона	1
9	Укладка тяжелого бетона	5	ТВО	720
10	Уплотнение тяжелого бетона	1		
11	ТВО	720		
ИТОГО		777		755

Процесс укладки и формования слоев бетона осуществляется с помощью бетонораздаточного бункера (имеющего два отсека) (рисунок 4.5).

Важно, чтобы до прохождения ТВО структура бетона не сформировалась, поскольку вследствие температурных перепадов его объем будет находиться в напряженном состоянии и существует риск нарушения микроструктуры, а также образования трещин. Это также увеличит сцепление слоев легкого и тяжелого бетонов.

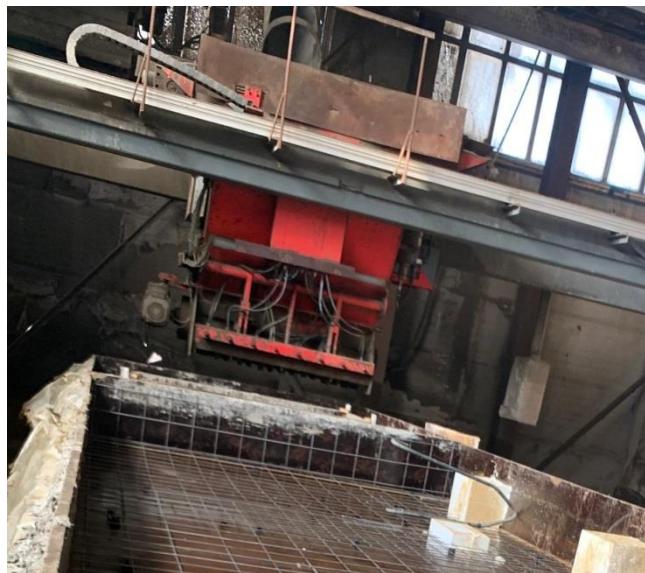


Рисунок 4.5 – Бетонораздатчик для формовки изделий

Смесь легкого бетона не уплотняется, поскольку важно достигнуть высокой поризации. Суперпластификатор в составе смеси исключит дальнейшую усадку легкого бетона.

Таблица 4.3 - Сравнительные показатели технологий изготовления стеновых панелей

№	Показатель	Существующая технология	Разработанная технология
1	Сцепление слоев	Необходимо наличие связей	Плотное прилегание слоев
2	Время от начала до конца изготовления изделий	19,5 часов	19,5 часов
3	Прочность теплоизоляционного слоя	-	B1,5
4	Теплоизоляционные функции изделия	Возникновение мостиков холода за счет неполного сцепления ППС плиты с бетоном	Отсутствие мостиков холода за счет сцепления двух видов бетона
5	Полностью автоматизированный процесс	Требуются рабочие для установки связей ППС плит	да
6	Горючность ТИ слоя	Г4(сильно горючий)	Г1(стоеч к возгоранию)
7	Токсичность ТИ слоя	Токсичен	Не является токсичным материалом
8	Время изготовления изделий, мин	777	755

Технология изготовления трехслойных стеновых панелей представляет собой комплексную систему, в которой все операции взаимосвязаны между собой. От подготовки материалов и формирования многослойной структуры до контроля качества на всех этапах. Технологические решения позволяют создавать изделия с высокой устойчивостью к атмосферному воздействию, склонными к долгосрочному использованию.

#### 4.6 Прочностные свойства высокопоризованного полистиролбетона

Прочность ВППБ есть совокупность прочности цементной матрицы и гранул полистирола. Ранее считалось, что гранулы полистирола не влияют на общую прочность бетона по причине низкой плотности и низкой несущей способностью. Считалось, что он только формирует макроструктуру бетона и служит для снижения средней плотности бетона. Однако на сегодняшний день известно, что с оптимальной долей полистирола в бетоне и распределения его гранул по объему, а также качественного сцепления полистирола с цементной матрицей, он может влиять на механическую прочность самого полистиролбетона. Определение прочности проводилось на прессе, представленном на рисунке 4.6:



Рисунок 4.6 – пресс для определения прочности образцов ВППБ

Анализ ранее проведённых исследований показал, что ранее был предложен ряд эмпирических формул для определения предела прочности полистиролбетона при сжатии. Эти уравнения учитывают характеристики исходных компонентов и особенности внутренней структуры материала. Однако, несмотря на это, между теоретически рассчитанными и фактически измеренными значениями прочности остаются заметные расхождения.

В частности, [75,76], основываясь на результатах экспериментов, отметили необходимость более точного описания внутреннего строения полистиролбетона. Они рассматривали прочность полистиролбетона как прочность цементной матрицы, заполненной гранулами полистирола. На основании данной концепции ими была выведена формула, связывающая прочность полистиролбетона со следующими параметрами: прочностные характеристики цементной матрицы, прочность и плотность гранул полистирола, объёмная доля полистирольного заполнителя в общем объёме материала.

Предложенная модель позволяет точнее учитывать влияние слабого по прочности наполнителя, а также учитывать структурную неоднородность полистиролбетона, что особенно важно при расчётах на сжатие. В отличие от традиционных подходов, она охватывает не только свойства компонентов, но и особенности их пространственного размещения в цементной основе.

Следовательно, использование данной зависимости может существенно повысить точность расчётов прочностных показателей полистиролбетона и найти применение при проектировании составов с заданными физико-механическими характеристиками.

$$R_{бет} = 0,11 \frac{R_p(5\varphi - 1)\varphi^{2/3}}{\varphi^{D/2}} \quad (5.1)$$

где  $R_{бет}$  – прочность бетона, МПа;  $R_p$  – прочность на растворной доли, МПа;  $\varphi$  – доля крупного заполнителя по объему;  $D$  – усредненный размер зерен заполнителя, мм.

Испытание прочности полистиролбетона на сжатие проводилось по методике, изложенной в ГОСТ 10180-2012.

Кубиковую прочность на сжатие определяли на образцах в форме кубов размером  $150 \times 150 \times 150$  мм.

Образцы испытывались на прочность на гидравлическом прессе в возрасте 3, 7 и 28 суток для наблюдения роста или снижения прочности во времени.

Характер разрушения трехслойных стеновых панелей со слоем ВППБ представлены на рисунке 4.7:

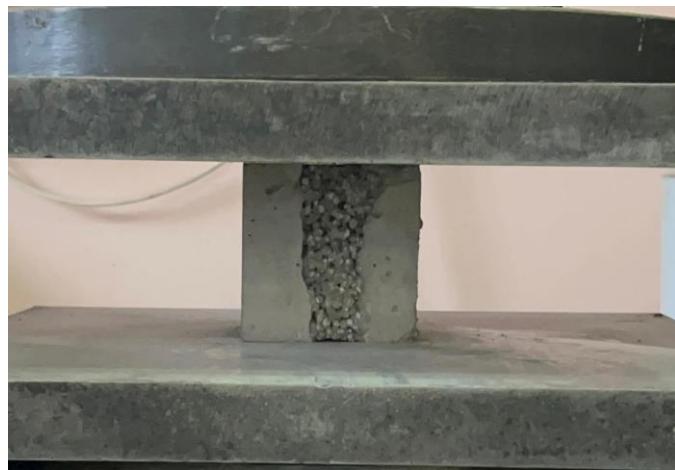




Рисунок 4.7 – Характер разрушения образцов трехслойных стеновых панелей со слоем ВППБ

По характеру разрушения видно, что деструкция происходит по внутреннему и наружному слоям бетона. Расслоения, а также отделения слоев друг от друга во время испытания на сжатие не наблюдается (рисунок 4.8):



Рисунок 4.8 – Сравнение макетов после испытания нагрузкой со слоем ВППБ и слоем полистирольной плиты

На рисунке 4.8 видно, что адгезионная прочность на границе тяжелого бетона и полистирольной плиты существенно ниже, по сравнению со сцеплением тяжелого бетона и ВППБ. Это объясняется отсутствием капиллярной пористости у полистирольной плиты, что препятствует сцеплению слоев. В то же время, ВППБ, обладающий развитой пористой структурой и

минеральной матрицей на цементном вяжущем, что является схожей по своей структуре с тяжелым бетоном.

#### **4.7 Деформации усадки высокопоризованного полистиролбетона**

Усадочные процессы в полистиролбетоне обусловлены, в первую очередь, старением цементного геля в ходе твердения и перемещением влаги по капиллярной системе, а также процессами карбонизации. Первая усадка проявляется на ранней стадии твердения, особенно при естественных условиях выдерживания, до того момента, как материал достигнет проектной прочности, что обычно происходит к 28 суткам. Это связано с тем, что химические реакции, сопровождающие твердение цементного камня, продолжаются в течение всего этого периода и не завершаются моментально [76].

Основные усадочные деформации в ВППБ возникают преимущественно в результате испарения влаги из пор цементного камня. Также установлено [72], что влажностная усадка полистиролбетона усиливается при снижении его прочности. Ключевое отличие ВППБ от рассматриваемых традиционных видов бетона – в наличии гранул полистирола, которые не участвуют в усадочных процессах, поскольку являются химически инертными. Газобетон и пенобетон состоят из капилляров и пор, образованных цементным камнем. Поэтому их структура проницаема и чувствительна к изменению влажностного состояния, что усиливает усадку при высыхании

Целью данной главы диссертации является сравнительный анализ деформаций усадок ВППБ и традиционных легких бетонов (пенобетона и газобетона) плотностью D400.

Для проведения исследования нами были изготовлены образцы-призмы по ГОСТ 24544-2020 размером 40x40x160мм всех трех видов бетона. Пенобетон был получен путем механического вспенивания с белковым пенообразователем (пенообразователь БК), газобетон получен путем химического газообразования при помощи алюминиевой пудры в условиях нормального давления. Половина образцов каждого вида легкого бетона твердели при нормальных условиях (при температуре  $20\pm2^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности  $60\pm5\%$ ), вторая половина образцов подвергалась ТВО.

Изменение усадочных деформаций производились контактным методом с применением тензометрического датчика с точностью до 0,001 мм на протяжении 180 суток. Начальные отсчеты измерялись после схватывания цементного камня (для образцов, твердеющих в нормальных условиях) и сразу после ТВО. Измерения проводились через сутки, 3, 7, 14, 28, а затем каждые 2 недели до 180 суток (т.е. пока величина усадки не превышала погрешность измерительных приборов).

Относительная линейная деформация усадок определялась по формуле:

$$\varepsilon_{yc} = \frac{l_0 - l_t}{l_0},$$

где  $l_0$  – начальная длина образца, мм

$l_t$  – длина образца в момент времени  $t$ , мм

При необходимости усадка выражалась в микродеформациях:

$$\varepsilon_{yc} = \frac{l_0 - l_t}{l_0} \cdot 10^6,$$

Данные об усадочных деформациях на 28 и 180 суток представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Величина деформаций усадки разных видов бетона через 28 и 180 суток

Вид бетона	Условия твердения	Плотность	Усадка ч/з 28 сут., мм	Усадка ч/з 180 сут., мм
ВППБ	Нормальные условия	D400	0,32	0,58
Пенобетон			0,85	1,25
Газобетон			1,15	1,70
ВППБ	ТВО	D400	0,18	0,35
Пенобетон			0,45	0,72
Газобетон			0,65	0,95

ВППБ продемонстрировал наименьшее значение усадочных деформаций на всех стадиях по сравнению с другими видами легкого бетона. Через 180 суток величина усадки составила 0,58 мм, что в 2,2 раза меньше, чем у пенобетона и в 2,9 раз меньше, чем у газобетона. Газобетона показал наибольшее значение усадочных деформаций, что объясняется его мелкопористой капиллярной структурой с высокой удельной поверхностью, которая усиливает испарение влаги и развитие капиллярных напряжений. Усадка пенобетона занимает промежуточное значение, однако ее величина выше, чем у ВППБ.

Усадка ВППБ после ТВО составила 0,35 мм, что в 2 раза меньше, чем у газобетона и у пенобетона. Сравнительная диаграмма представлена на рисунке 4.9:

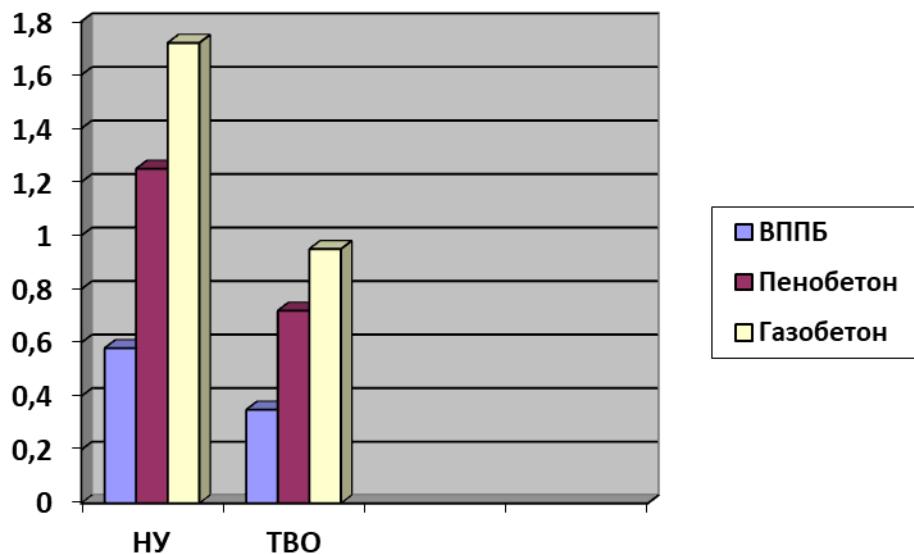


Рисунок 4.9 – Сравнение деформаций усадки бетонов плотности D400 через 180 суток при нормальных условиях твердения (НУ) и ТВО

В режиме ТВО наблюдается значительное снижение усадочной деформации для всех видов бетона, что объясняется предварительным удалением значительного количества свободной воды и более интенсивной гидратацией цементного камня в раннем возрасте, вследствие этого стабилизируется структура бетона. Тенденция для всех видов бетона остается прежней, однако величины усадочных деформаций ниже, чем при естественных условиях твердения.

#### 4.8 Морозостойкость высокопоризованного полистиролбетона

Морозостойкость бетонов является комплексным показателем, который демонстрирует устойчивость бетона к многократному воздействию низких температур. Для высокопоризованного полистиролбетона такой параметр имеет принципиальное значение, так как его пористая структура и наличие полимера в составе регламентируют специфические механизмы взаимодействия влаги и твердой матрицы в процессе попеременного воздействия температур. Структура такого бетона ограничивает проникновение воды, но также и создает зоны с пониженной адгезией и упругостью, в результате чего усиливаются локальные напряжения при фазовых миграциях влаги [77-80]. В связи с этим, необходимым критерием определения качества разработанного высокопоризованного полистиролбетона является определение его морозостойкости.

Исследования проводились в аккредитованной лаборатории г. Караганда ТОО «Технический контроль зданий и сооружений». Испытание ВППБ на

морозостойкость проводилось согласно ГОСТ 10060-2012 пп 5.1 заморозкой образцов, насыщенных водой. Согласно данному базовому первому методу, образцы в насыщенном водой состоянии проходят попеременные циклы замораживания и оттаивания, согласно таблице. Метод подходит для всех видов бетонов, за исключением дорожных и бетонов, эксплуатирующихся в минерализованной воде. Размеры образцов 100x100x100 мм насыщали водой и замораживали при температуре – 19<sup>0</sup>С в течении не менее 2,5 часов. Оттаивание происходило в ванне с водой при температуре +20<sup>0</sup>С в течении 2,5 часов.

Испытания на морозостойкость проводились в специализированной камере (рисунок 4.10):



Рисунок 4.10 – Камера для определения морозостойкости

Согласно результатам испытания, которые представлены в приложении 2, марка ВППБ по морозостойкости F150. Данная марка может применяться в наружных ограждающих конструкциях зданий, эксплуатируемых в условиях резко-континентального климата.

#### **4.9 Горючность высокопоризованного полистиролбетона**

Горючность материалов, применяемых при возведении зданий и сооружений, является одним из ключевых характеристик, показывающих допустимость их

использования в строительной сфере [81,82]. Для высокопоризованного полистиролбетона данная характеристика приобретает особое значение в связи с наличием гранул полистирола в его составе, которые относятся к группе горючих материалов [82].

Определение группы горючести определялось в испытательном центре г. Алматы ТОО «ТЕКС» (приложение Д). С целью определения стойкости ВППБ к возгоранию, были проведены испытания на определение группы горючести (рисунок 4.11; 4.12).



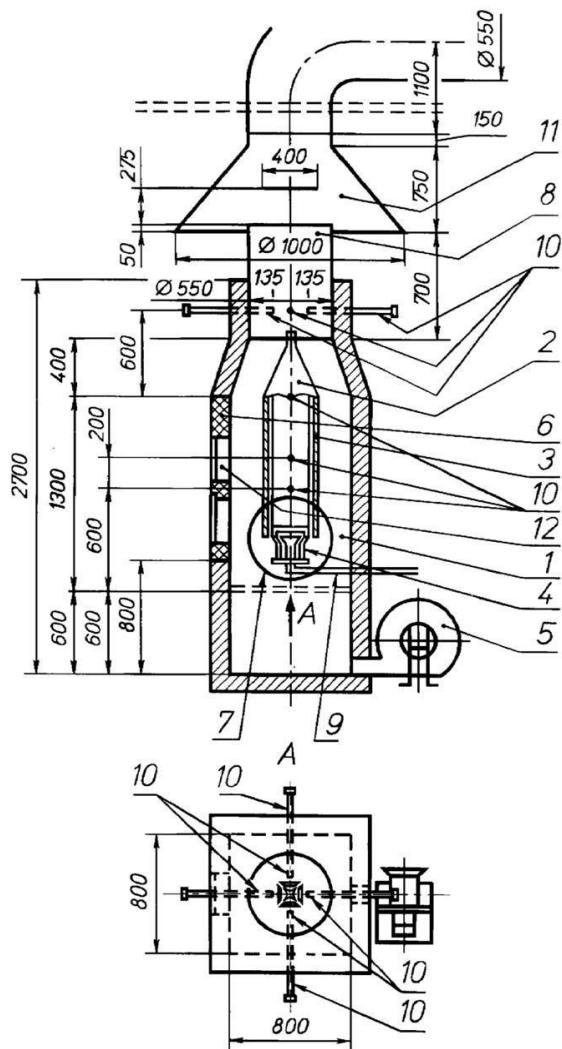
Рисунок 4.11 – Подготовка образцов к определению группы горючести

Для определения группы горючести (Г) горючих строительных материалов были изготовлены образцы 1000 мм по длине, 190 мм по ширине, и 310 мм по толщине в количестве 12 штук по ГОСТ 30244-94. Толщина образца не должна быть меньше фактической толщины слоя в стеновой панели. Блоки армировались с целью целостной транспортировки на дальнее расстояние в г. Алматы. Сжигание материала происходило в специальной установке для испытаний материалов на горючесть (рисунок 5.8).



Рисунок 4.12 – Процесс исследования группы горючести ВППБ

Установка состоит непосредственно из камеры сгорания, газоотводной и вентиляционной систем. В самой камере устанавливается держатель образцов и источник сжигания (рисунок 4.13).



1 — камера сжигания; 2 — держатель образца; 3 — образец; 4 — газовая горелка; 5 — вентилятор подачи воздуха; 6 — дверца камеры сжигания; 7 — диафрагма; 8 — вентиляционная труба; 9 — газопровод; 10 — термопары; 11 — вытяжной зонт; 12 — смотровое окно

Рисунок 4.13 – Установка для испытаний на горючесть

В качестве источника сжигания применялась газовая горелка. Согласно методике, проводится 3 испытания по 4 образца с раз. Далее образцы взвешивают, помещают в камеру и включают измерительные приборы в камере, а также подачу газа для сжигания. Воздействие температуры длится 10 минут. По истечению этого времени источник зажигания выключается и далее фиксируется время тления материала. Испытание считается законченным после остывания материала до температуры окружающей среды. После проведения испытания фиксируются такие показатели, как:

- масса образцов до и после испытания;
- температура дымовых газов;

- время тления;
- длина повреждения образца

Результаты испытаний приведены в таблице 4.5:

Таблица 4.5 - Результаты испытаний определения группы горючести

№ п/п	Наименование показателей, ед.изм.	НД на методы испытаний	Нормы по НД	Фактические результаты
1	2	3	4	5
	- температура дымовых газов, $^{\circ}\text{C}$	ГОСТ 30244-94 пп.7.5	Г1 (слабогорючие) – не более 135 Г2 (умеренногорючие) – не более 235 Г3 (нормальногорючие) не более 450 Г4 (сильногорючие) – более 450	75
	- степень повреж- дения по длине, %		Г1 (слабогорючие) – не более 65 Г2 (умеренногорючие) – не более 85 Г3 (нормальногорючие) более 85 Г4 (сильногорючие) – более 85	25,09
	- продолжительность самостоятельного горения, с		Г1 (слабогорючие) –0 Г2 (умеренногорючие) – не более 30 Г3 (нормальногорючие) не более 3005 Г4 (сильногорючие) – более 300	0
	-степень повреждения по массе, %		Г1 (слабогорючие) – не более 20 Г2 (умеренногорючие) – не более 50 Г3 (нормальногорючие) не более 50 Г4 (сильногорючие) – более 50	2,68

Исходя из результатов испытаний можно сделать однозначный вывод о том, что по всем показателям ВППБ относится к слабогорючим материалам (группа Г1).

#### **4.10 Испытание высокопоризованного полистиролбетона на содержание радионуклидов**

Контроль радиационной безопасности строительных материалов является обязательным этапом оценки их пригодности для применения в жилых и общественных зданиях [84]. Наличие в составе высокопоризованного полистиролбетона таких материалов, как доменный шлак и полистирол, наводит на проведение обязательного исследования на содержание радионуклидов [85, 86]. Содержание радиоактивных веществ, оказывают пагубное влияние на здоровье и жизнедеятельность человека.

Определение содержания естественных радионуклидов в ВППБ определялось в испытательном центре г. Алматы ТОО «ТЕКС». Испытания на выявление естественных радионуклидов определялось в испытательном центре г. Караганда АО «Национальный центр экспертизы и сертификации». Для определения токсичности высокопоризованного полистиролбетона в специальное оборудование поместили измельченную пробу, после чего на приборе были зафиксированы показатели содержания естественных радионуклидов в пробе (рисунок 4.14) [87].





Рисунок 4.14 – Процесс проведения испытаний ВППБ на токсичность

По окончанию испытания были получены следующие результаты, представленные в таблице 4.6:

Таблица 4.6 – Результаты испытаний на определение естественных радионуклидов

№ п/п	Наименование испытуемого материала	Наименование показателей, ед.изм.	НД на методы испытаний	Нормы по НД	Фактические результаты
1	2	3	4	5	6
1	ВППБ	удельная эффективная активность естественных радионуклидов, <sup>0</sup> C	ГОСТ 30108-94 пп.4.4	не более 370	62,3
2	Тяжелый бетон				100,32

Согласно результатам испытаний, ВППБ относится к безопасным материалам, поскольку его фактическое содержание естественных радионуклидов почти в 6 раз ниже допустимого значения. Это говорит о возможности его повсеместного применения в строительной отрасли.

## 4.11 Выводы

1. Теплотехнический расчет показал, что суммарное сопротивление теплопередаче всех слоев трехслойной стеновой панели, включая сопротивления теплоотдаче внутренних и наружных поверхностей, обеспечивает требуемый уровень теплозащиты здания в условиях заданного температурного режима эксплуатации.

2. Согласно расчету прочности трехслойных панелей, максимальный прогиб панелей от действия ветровой нагрузки составляет 1,4мм, что не превышает предельных значений  $6000/200=30$ мм. Прочность по 2-му предельному состоянию обеспечена. По результату анализа, для обеспечения прочности панелей, требуемое армирование слоёв из тяжелого бетона сеткой диаметром 8мм класса А500 с шагом 150мм.

3. Разработанная технология производства трехслойных панелей позволяет сократить время производства на 22 минуты.

4. Деструкция происходит по внутреннему и наружному слоям бетона, не затрагивая при этом процессы расслоения с теплоизоляционным слоем.

5. Адгезионная прочность на границе тяжелого бетона и полистирольной плиты существенно ниже, по сравнению со сцеплением тяжелого бетона и ВППБ.

6. ВППБ продемонстрировал наименьшее значение усадочных деформаций на всех стадиях по сравнению с другими видами легкого бетона. Через 180 суток величина усадки составила 0,58 мм, что в 2,2 раза меньше, чем у пенобетона и в 2,9 раз меньше, чем у газобетона.

7. В режиме ТВО наблюдается значительное снижение усадочной деформации для всех видов бетона, что объясняется предварительным удалением значительного количества свободной воды и более интенсивной гидратацией цементного камня в раннем возрасте, вследствие этого стабилизируется структура бетона.

8. Согласно результатам испытания, марка ВППБ по морозостойкости F150. Данная марка может применяться в наружных ограждающих конструкциях зданий, эксплуатируемых в условиях резко-континентального климата.

9. Согласно результатам испытаний ВППБ относится к слабогорючим материалам (группа Г1).

10. ВППБ относится к безопасным материалам, поскольку его фактическое содержание естественных радионуклидов почти в 6 раз ниже допустимого значения. Это говорит о возможности его повсеместного применения в строительной отрасли.

## 5 ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНОЙ СТЕНОВОЙ ПАНЕЛИ СО СЛОЕМ ВЫСОКОПОРИЗОВАННОГО ПОЛИСТИРОЛБЕТОНА

### 5.1 Эффективность применения конструктивного решения трехслойной стеновой панели со слоем высокопоризованного полистиролбетона

С целью определения эффективности применения предлагаемых панелей, были проанализированы пять типов многослойных конструкций. В качестве новой конструкции предложена трехслойная стеновая панель со слоем высокопоризованного полистиролбетона [88] (рисунок 6.1):

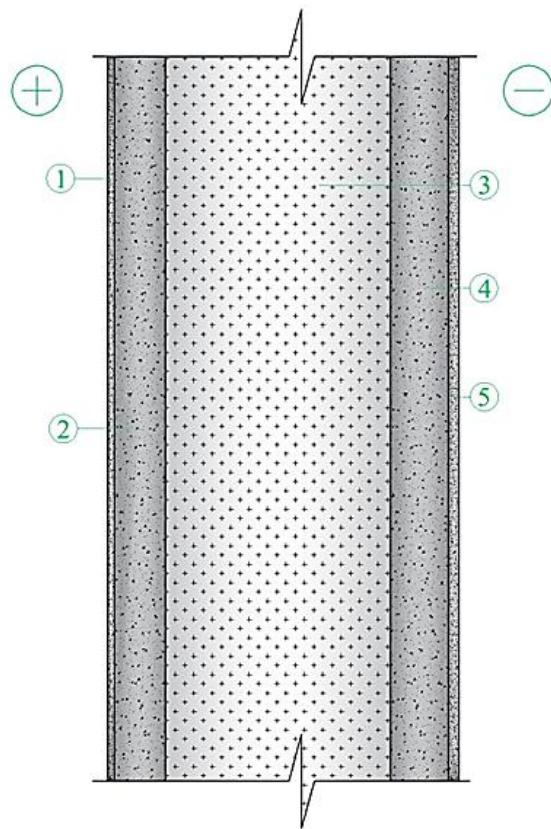


Рисунок 5.1 – Трехслойная стеновая панель со слоем высокопоризованного полистиролбетона

1- Цементно-песчаная затирка; 2- тяжелый бетон; 3- ВППБ; 4- тяжелый бетон; 5- цементно-песчаная затирка

Предлагаемая конструкция сравнивалась с существующими вариантами ограждающих конструкций (рисунки 5.1, 5.3-5.5):

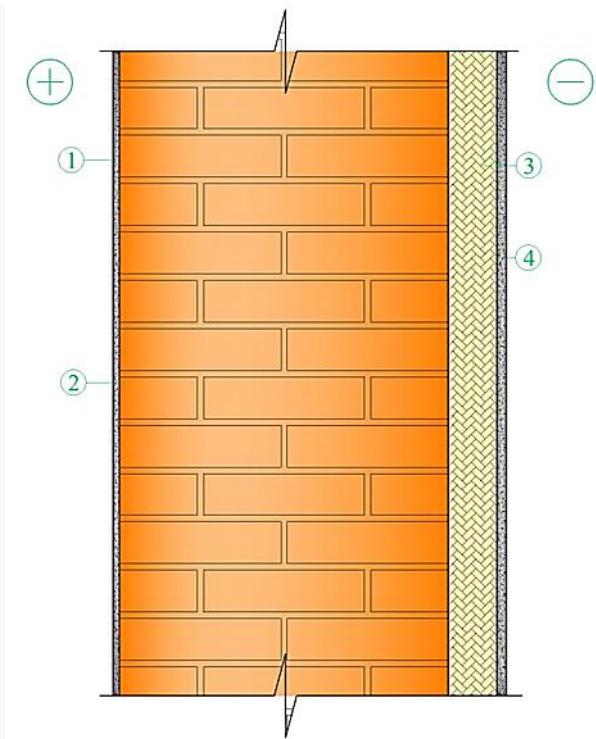


Рисунок 5.2 - Традиционное ограждение из полнотелого керамического кирпича  
1- Цементно-песчаная затирка; 2- Полнотелый керамический кирпич плотностью 1800 кг/м3; 3- Экструдированный пенополистирол плотностью 35 кг/м3; 4- Цементно-песчаная затирка

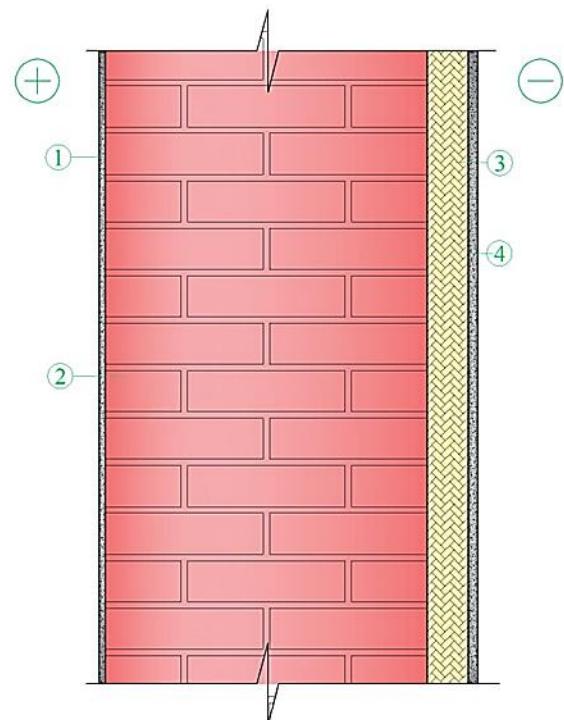


Рисунок 5.3 - Традиционное ограждение из пустотелого керамического кирпича 1- Цементно-песчаная затирка; 2- Пустотелый керамический кирпич плотностью 1000 кг/м3; 3- Экструдированный пенополистирол плотностью 35 кг/м3; 4- Цементно-песчаная затирка

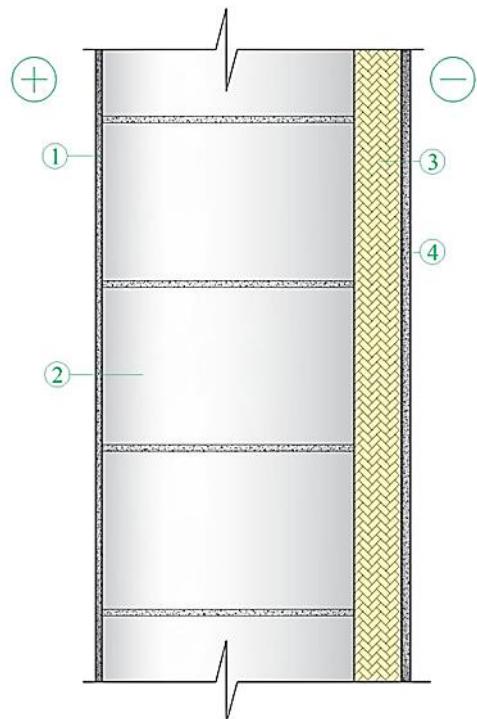


Рисунок 5.4 - Традиционное ограждение пеноблока 1- Цементно-песчаная затирка; 2- Пеноблок плотностью 1200 кг/м3; 3- Экструдированный пенополистирол плотностью 35 кг/м3; 4- Цементно-песчаная затирка

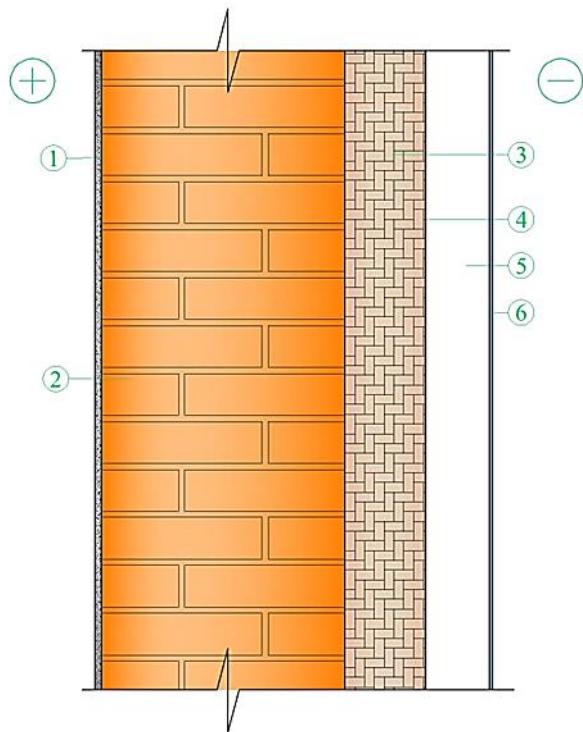


Рисунок 5.5 - Наружное ограждение с вентилируемой прослойкой 1. Цементно-песчаный раствор; 2. Полнотелый керамический кирпич плотностью 1800 кг/м<sup>3</sup>; 3. Минераловатные плиты; 4. Гидроветрозащитная пленка; 5. Вентилируемый воздушный зазор; 6. Облицовочный материал (композитные панели)

Для расчета применялись следующие теплотехнические характеристики материала [89]:

Таблица 5.1 - Теплотехнические характеристики исследуемых объектов

№	Наименование слоя	Теплопроводность для зоны эксплуатации А, $\lambda$ , (W/(m·°C))	Теплоусвоение, $S$ , (W/(m·°C))	Паропроницаемость, $\mu$ , (mg/m·h·Pa)	Сопротивление воздухопроницаемости, $R_U$ (m <sup>2</sup> ·h·Pa/kg)
Трехслойная стеновая панель со слоем ВППБ					
1	Раствор цементно-песчаный	0.76	9.6	0.09	373
2	Тяжелый бетон	1,74	16,77	0,03	19620
3	ВППБ	0,095	2,07	0,087	79

4	Тяжелый бетон	1,74	16,77	0,03	19620
5	Раствор цементно-песчаный	0.76	9.6	0.09	373
Многослойная конструкция наружного ограждения из полнотелого керамического кирпича					
1	Раствор цементно-песчаный	0.76	9.6	0.09	373
2	Полнотелый керамический кирпич, плотностью 1800кг/м <sup>3</sup>	0.7	9.2	0.11	18
3	Экструдированный пенополистирол, плотностью 35кг/м <sup>3</sup>	0.029	0.36	0.018	79
4	Раствор цементно-песчаный	0.76	9.6	0.09	373
Многослойная конструкция наружного ограждения из пустотелого керамического кирпича					
1	Раствор цементно-песчаный	0.76	9.6	0.09	373
2	Пустотелый керамический кирпич, плотность 1000кг/м <sup>3</sup>	0.47	6.16	0.17	2
3	Экструдированный пенополистирол, плотностью 35кг/м <sup>3</sup>	0.029	0.36	0.018	79
4	Раствор цементно-песчаный	0.76	9.6	0.09	373
Многослойная конструкция наружного ограждения из пеноблока					
1	Раствор цементно-песчаный	0.76	9.6	0.09	373
2	Пеноблок, плотностью 1200кг/м <sup>3</sup>	0.52	8.17	0.075	196
3	Экструдированный пенополистирол,	0.029	0.36	0.018	79

	плотностью 35кг/м <sup>3</sup>				
4	Раствор цементно-песчаный	0.76	9.6	0.09	373
Многослойная конструкция наружного ограждения с вентилируемой прослойкой					
1	Раствор цементно-песчаный	0.76	9.6	0.09	373
2	Полнотелый керамический кирпич, плотность 1800кг/м <sup>3</sup>	0.7	9.2	0.11	18
3	Плиты минераловатные	0,045	0,74	0,3	1,5
4	Гидро-ветрозащитная пленка	0.76	-	0.09	150
5	Вентилируемая воздушная прослойка	-	-	-	-
6	Облицовочный материал (композитные панели)	-	-	-	-

Потенциальная тепловая эффективность ограждений была произведена в 3 этапа, согласно [89, 93]: теплового, влажностного и воздушного режимов (рисунок 6.6, 6.7, 6.8).

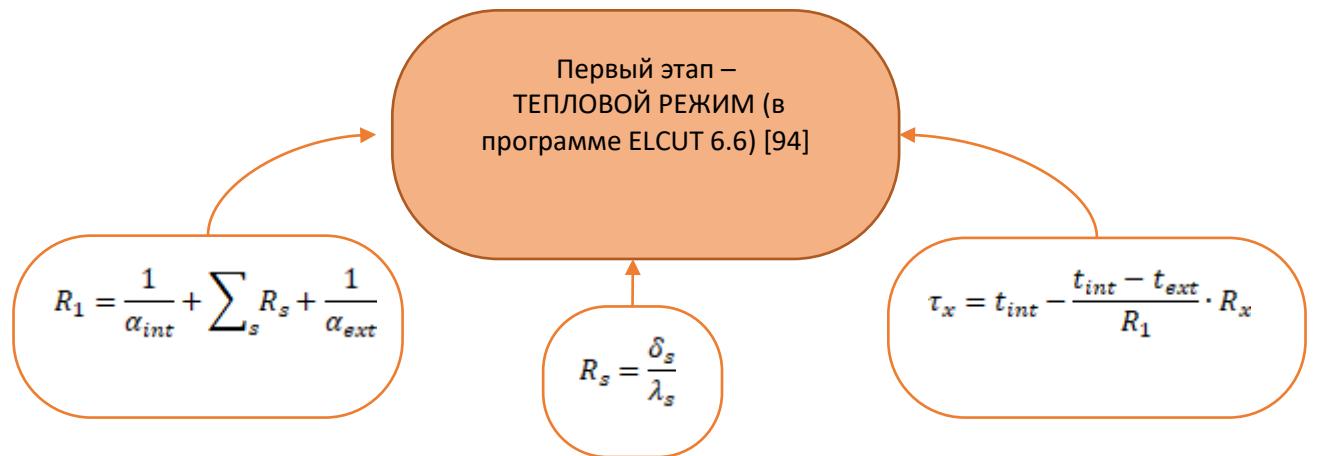


Рисунок 6.6 – Методика определения теплового режима многослойных наружных ограждающих конструкций

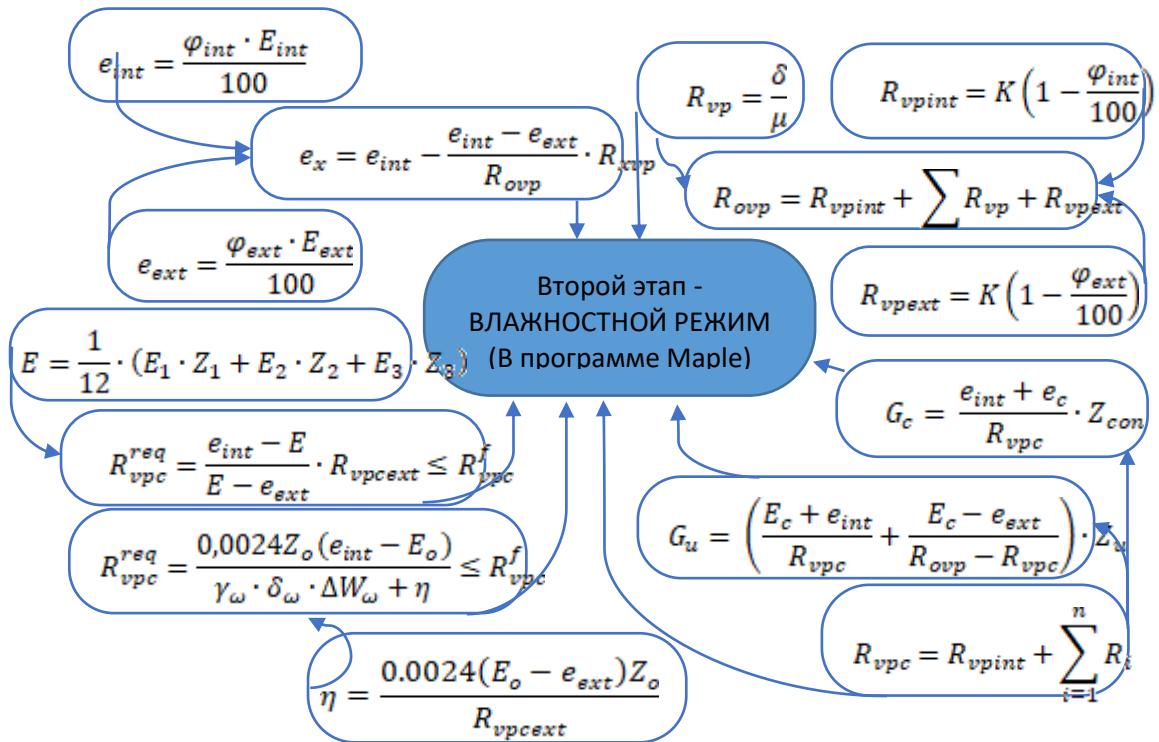


Рисунок 6.7 – Методика определения влажностного режима многослойных наружных ограждающих конструкций

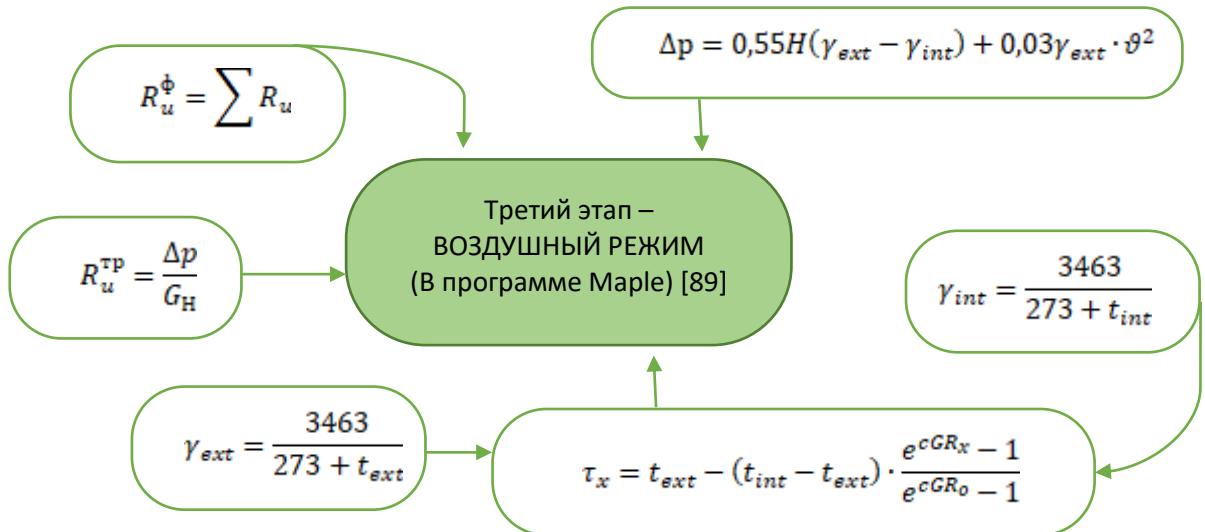


Рисунок 6.8 – Методика определения воздушного режима многослойных наружных ограждающих конструкций

Расчет производился с учетом климатических показателей г. Караганды [95, 96]:

Влажностной режим помещения	Нормальный
Зона влажности	Сухой
Условие эксплуатации ограждающих конструкций	А
Абсолютная максимальная температура	40.2 °C.
Абсолютная минимальная температура	–42.9 °C
Средняя годовая температура	3.7 °C
Средняя температура наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0.92	–28.9 °C
Средняя максимальная температура наиболее тёплого месяца (июля)	26.8 °C.
Максимальная амплитуда суточных колебаний температуры наружного воздуха в июле	12.9 °C
Среднемесячная месячная температура наружного воздуха за июль	20.4 °C
Среднемесячная температура наиболее холодного месяца (январь)	–13.6 °C
Средняя относительная влажность наиболее холодного месяца (январь)	79%
Среднегодовая влажность	65%
Максимальная из средних скоростей по румбам в январе	6.6 м/с
Длительность отопительного сезона	207 дней
Внутренняя температура зимой	20°C
Внутренняя влажность	55%
Требуемое расчетное сопротивление согласно Градусо-сутки отопительного периода 3.2 Вт/м <sup>2</sup> ·°C	
Оценка фактического сопротивления теплопередаче в многослойных наружных ограждающих конструкциях	

На рисунке 5.9 продемонстрирован результат оценки фактических сопротивлений теплопередачи многослойных конструкций наружных ограждений:

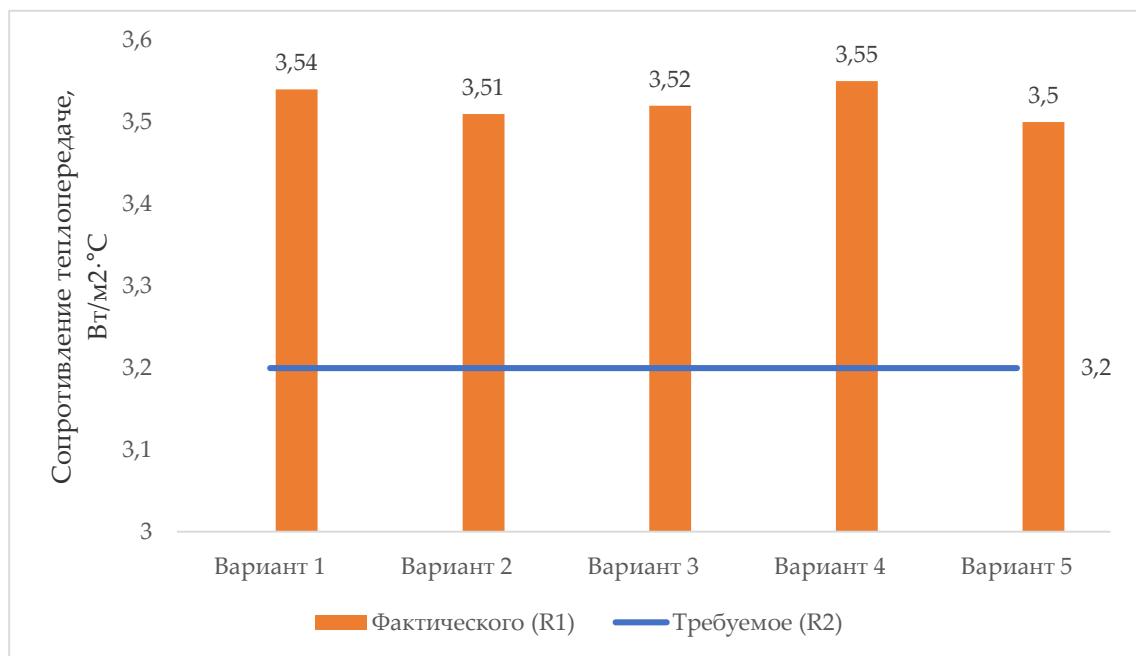
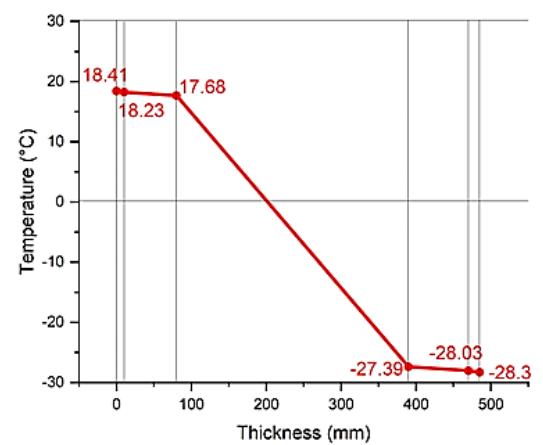
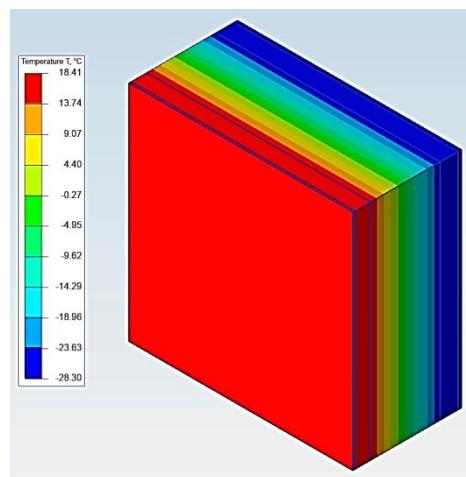


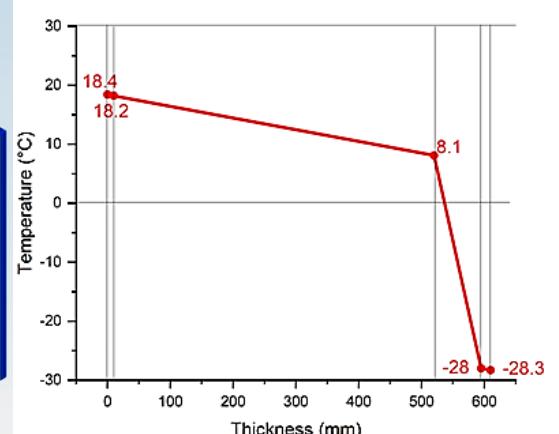
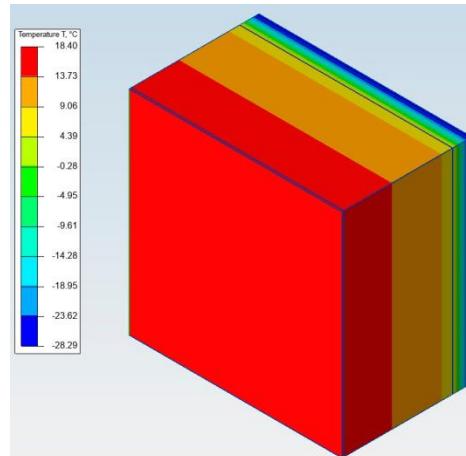
Рисунок 5.9 - Фактическое ( $R_1$ ) и требуемое ( $R_2$ ) сопротивление теплопередачи: вариант 1 - трехслойная панель из высокопоризованного полистирол бетона; вариант 2 - традиционное ограждение из полнотелого керамического кирпича; вариант 3 - традиционное ограждение из пустотелого керамического кирпича; вариант 4 - традиционное ограждение пеноблока; вариант 5 – наружное ограждение с вентилирумой прослойкой

Анализ температурного распределения на стыках слоёв ограждающих многослойных конструкций производился следующим образом.

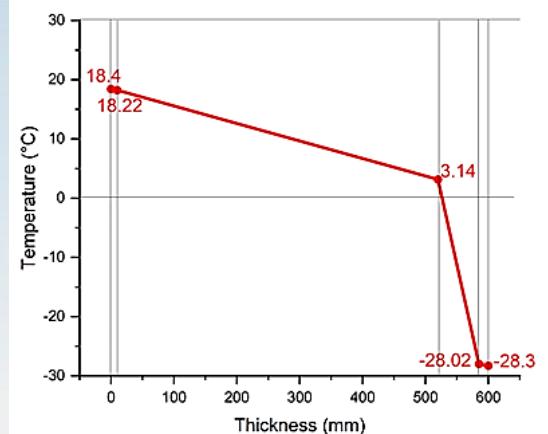
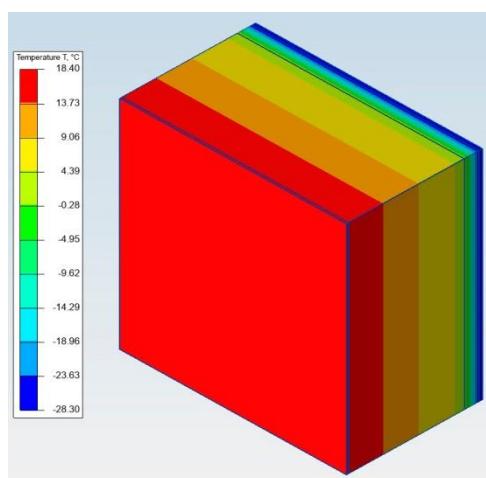
На рисунке 5.10 отображены результаты моделирования температурных характеристик наружных ограждений, выполненного в среде ELCUT версии 6.6 [94, 97, 98]:



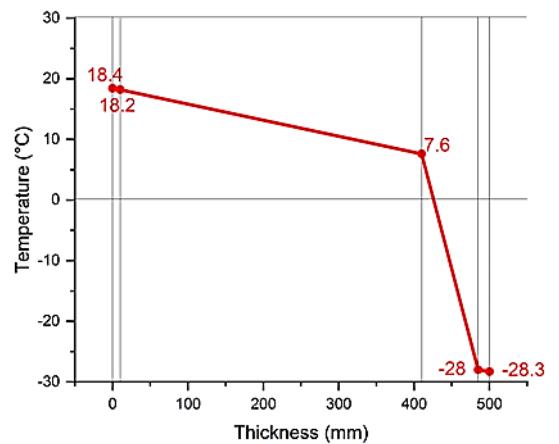
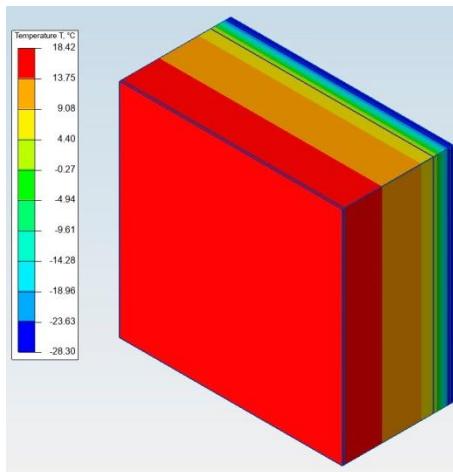
A)



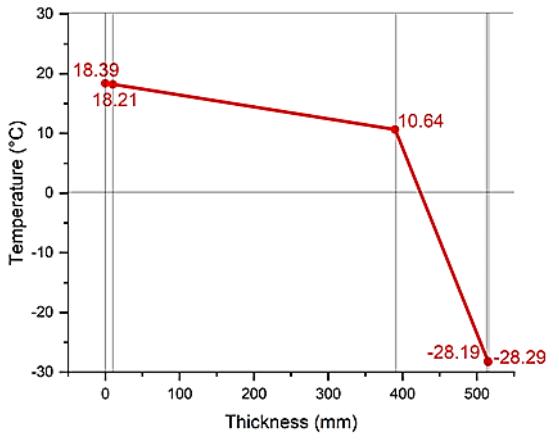
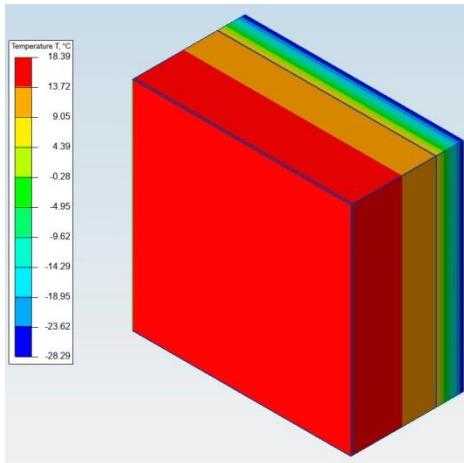
Б)



Б)



Г)



Д)

Рисунок 5.10 - Значение температурных полей многослойных конструкции наружных ограждений: А -трехслойная панель из высокопоризованного полистирол бетона; Б - традиционное ограждение из полнотелого керамического кирпича; В - традиционное ограждение из пустотелого керамического кирпича; Г- традиционное ограждение пеноблока; Д – наружное ограждение с вентилируемой прослойкой

Анализ влажностного состояния многослойных наружных ограждающих конструкций определен следующим образом.

1. Определение образования конденсата во внутренней структуре многослойных ограждений.

На рисунке 5.11 приведены результаты расчёта процессов конденсации влаги в слоях наружных многослойных конструкций:

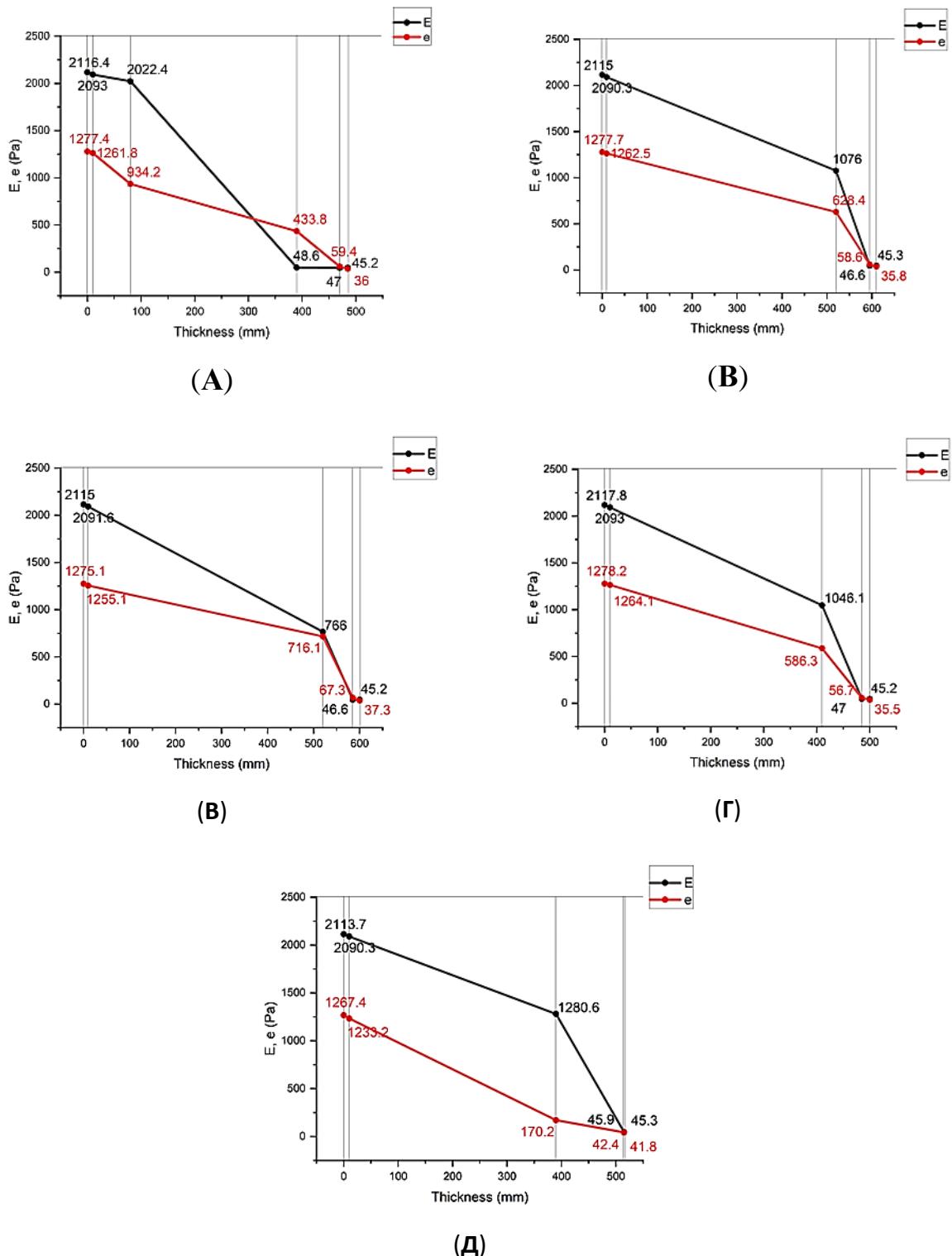


Рисунок 5.11 - Значения конденсации влажности в многослойных конструкциях наружных ограждений: А -трехслойная панель из высокопоризованного полистирол бетона; Б - традиционное ограждение из полнотелого керамического кирпича; В - традиционное ограждение из

пустотелого керамического кирпича; Г - традиционное ограждение пеноблока;  
Д – наружное ограждение с вентилируемой прослойкой

2. Определение объема влаги, образующейся в многослойных наружных ограждающих конструкциях в течение периода влагонакопления. На рисунке 5.12 показаны результаты вычислений количества влаги, образующейся вследствие конденсации в многослойных ограждающих конструкциях за время накопления влаги:

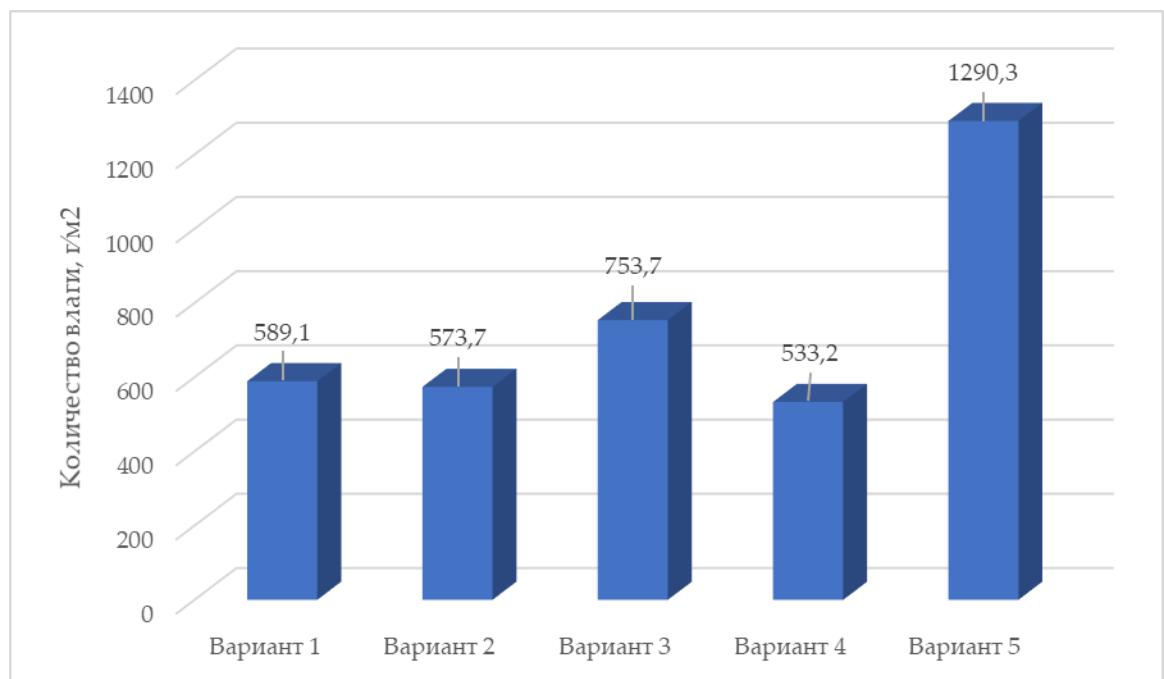


Рисунок 5.12 - Результаты расчёта накопления конденсационной влаги в слоях наружных ограждающих конструкций за анализируемый период: вариант 1 - трехслойная панель из высокопоризованного полистирол бетона; вариант 2 - традиционное ограждение из полнотелого керамического кирпича; вариант 3 - традиционное ограждение из пустотелого керамического кирпича; вариант 4 - традиционное ограждение пеноблока; вариант 5 – наружное ограждение с вентилируемой прослойкой

1. Определение объема влаги, испаряющейся из многослойных наружных ограждающих конструкций в течение периода высыхания. На рисунке 5.13 приведены результаты расчета объема влаги, удаляющейся из многослойных конструкций наружных ограждений в процессе высыхания.

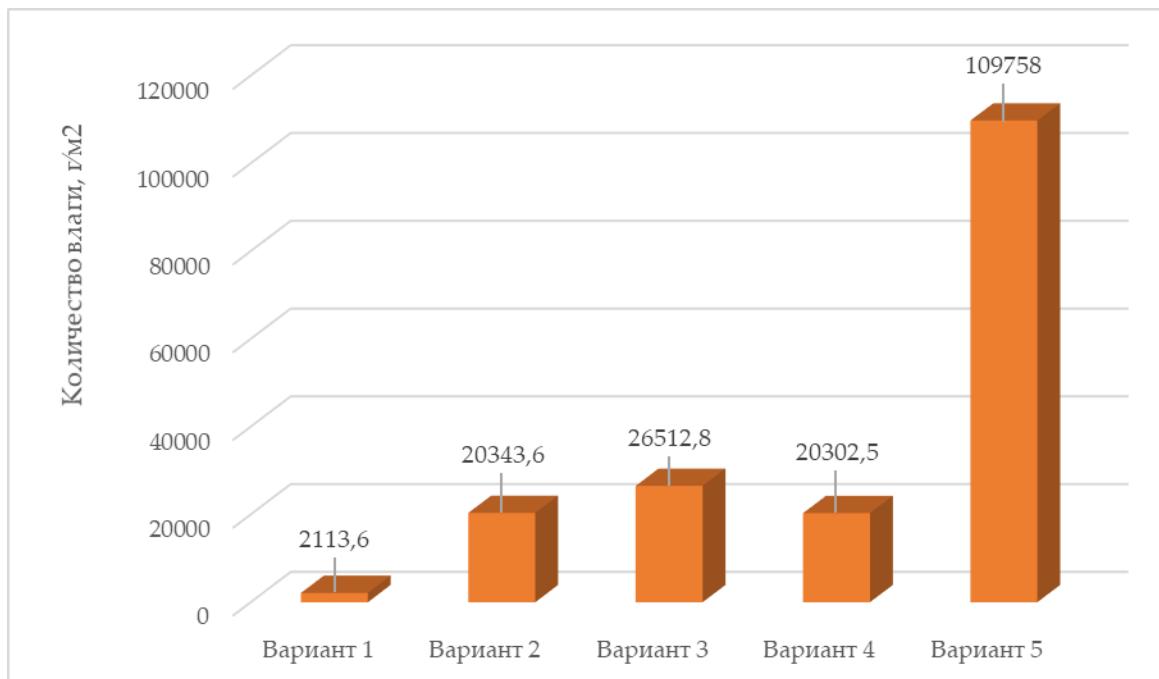


Рисунок 5.13 - Результаты расчёта количества влаги, удаляемой из многослойных конструкций ограждений за время высыхания: вариант 1 - трехслойная панель из высокопоризованного полистирол бетона; вариант 2 - традиционное ограждение из полнотелого керамического кирпича; вариант 3 - традиционное ограждение из пустотелого керамического кирпича; вариант 4 - традиционное ограждение пеноблока; вариант 5 – наружное ограждение с вентилируемой прослойкой

4. Оценка соответствия конструкции наружных ограждений требованиям по недопущению накопления влаги в течение года эксплуатации  $(R_{vpc}^f \geq R_{vpc}^{req})$   
 На рисунке 5.14 приведены результаты расчета, демонстрирующие условия, при которых недопустимо накопление влаги в многослойных наружных ограждающих конструкциях за годовой период эксплуатации.

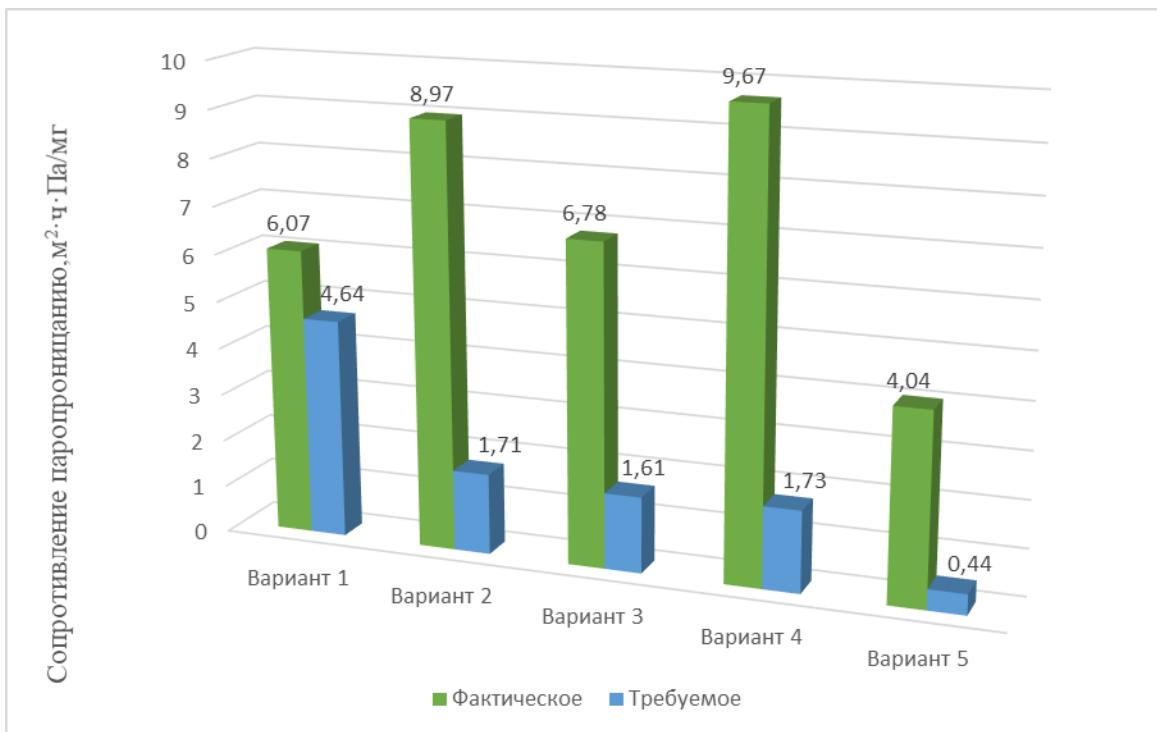


Рисунок 5.14 - Показатели, отражающие превышение допустимого уровня накопления влаги в наружных многослойных конструкциях в течение года: вариант 1 - трехслойная панель из высокопоризованного полистирол бетона; вариант 2 - традиционное ограждение из полнотелого керамического кирпича; вариант 3 - традиционное ограждение из пустотелого керамического кирпича; вариант 4 - традиционное ограждение пеноблока; вариант 5 – наружное ограждение с вентилируемой прослойкой

5. Анализ условий, при которых недопустимо накопление влаги в многослойных наружных ограждающих конструкциях в течение периода влагонакопления ( $R_{vpc}^f \geq R_{vpc}^{req}$ ). На рисунке 5.15 представлены результаты расчета, отражающие превышение допустимого уровня увлажнения в слоях наружных ограждающих конструкций за время влагонакопления.

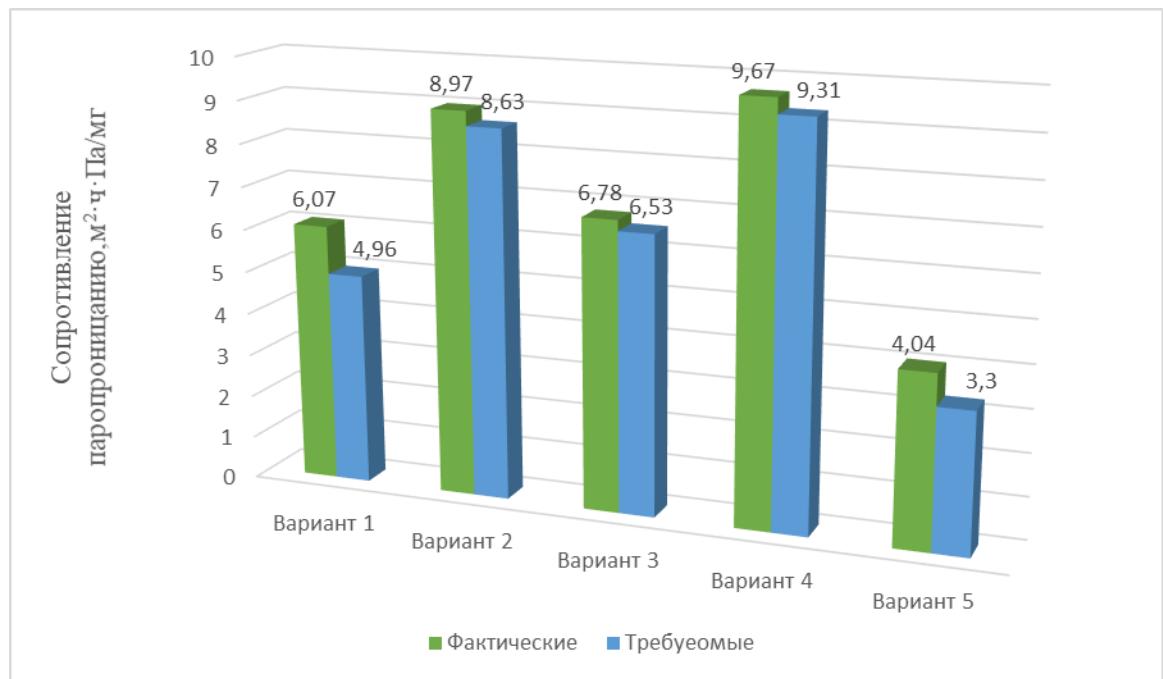


Рисунок 5.15 - Расчтные показатели превышения допустимого уровня влагонакопления в многослойных наружных ограждающих конструкциях за соответствующий период: вариант 1 -трехслойная панель из высокопоризованного полистирол бетона; вариант 2 - традиционное ограждение из полнотелого керамического кирпича; вариант 3 - традиционное ограждение из пустотелого керамического кирпича; вариант 4 - традиционное ограждение пеноблока; вариант 5 – наружное ограждение с вентилируемой прослойкой

1) Анализ воздушного режима в наружных многослойных ограждающих конструкциях ( $R_u^{req} \leq R_u^f$ ):

- определение сопротивления воздухопроницаемости многослойных наружных ограждающих конструкций.

В таблице приведены результаты расчета нормативного и рассчитанного сопротивления воздухопроницаемости для многослойной конструкции наружного ограждения.

Таблица 5.2 - Показатели нормативного и фактического сопротивления воздухопроницаемости многослойных наружных ограждающих конструкций

№	Схемы	Требуемое сопротивление воздухопроницанию, в зависимости от высоты здания	Фактическое сопротивление воздухопроницанию	Выполнение условия

		H=3м	H=15м		
1	Вариант – 1	43,79	75,07	30131,91	Выполнено
2	Вариант – 2	43,79	75,07	719,9	Выполнено
3	Вариант – 3	43,79	75,07	703,9	Выполнено
4	Вариант – 4	43,79	75,07	822,9	Выполнено
5	Вариант – 5	43,79	75,07	419,4	Выполнено

- Анализ температурного распределения на стыках слоёв многослойных наружных ограждающих конструкций с учетом воздушной инфильтрации. В таблице представлены результаты расчета температурного поля на границах материалов в составе многослойной конструкции наружного ограждения.

Таблица 5.3 - Показатели распределения температуры на межслойных поверхностях многослойных наружных ограждающих конструкций

Условие	$\tau$	Схемы				
		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5
Без учета фильтрации воздуха, $^{\circ}\text{C}$ согласно рис 3	$\tau_{int}$	18,41	18,40	18,40	18,42	18,39
	$\tau_1$	18,23	18,21	18,22	18,23	18,21
	$\tau_2$	17,68	8,05	3,14	7,63	10,62
	$\tau_3$	-27,39	-28,02	-28,02	-28,03	-28,19
	$\tau_4$	-28,03	-	-	-	-
	$\tau_{ext}$	-28,30	-28,29	-28,30	-28,30	-28,29
С учетом фильтрации воздуха, $^{\circ}\text{C}$	$\tau_{int}$	18,41	18,25	18,25	18,29	18,14
	$\tau_1$	18,23	18,05	18,05	18,09	17,93
	$\tau_2$	17,67	7,21	2,09	6,87	9,40
	$\tau_3$	-27,40	-28,10	-28,10	-28,10	-28,29
	$\tau_4$	-28,03	-	-	-	-
	$\tau_{ext}$	-28,30	-28,35	-28,35	-28,35	-28,38

Разница	%	До 0,5	10,4	33,4	9,96	11,5
---------	---	--------	------	------	------	------

Анализ тепловой инерционности наружных многослойных ограждающих конструкций. На рисунке 5.16 показаны результаты расчёта параметров тепловой инерции, характеризующих поведение многослойных наружных ограждений при тепловом воздействии.

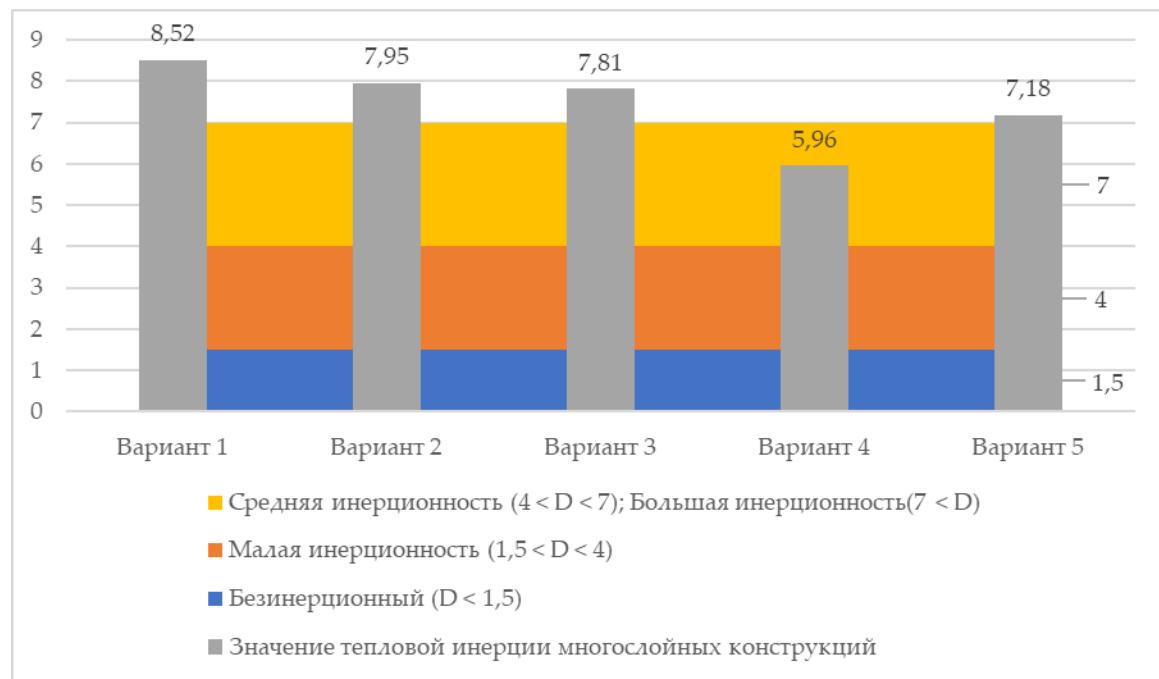


Рисунок 5.16 — Расчетные значения параметров тепловой инерции в многослойных элементах наружного ограждения: вариант 1 -трехслойная панель из высокопоризованного полистирол бетона; вариант 2 - традиционное ограждение из полнотелого керамического кирпича; вариант 3 - традиционное ограждение из пустотелого керамического кирпича; вариант 4 - традиционное ограждение пеноблока; вариант 5 – наружное ограждение с вентилируемой прослойкой

Исходя из рыночной стоимости ограждающих конструкций из расчета на 1м<sup>2</sup> на 2024 г.:

- трехслойная панель из высокопоризованного полистирол бетона - 19 236 тг;
- традиционное ограждение из полнотелого керамического кирпича – 49 792 тг;
- традиционное ограждение из пустотелого керамического кирпича – 46 449;
- традиционное ограждение пеноблока – 23 225;
- наружное ограждение с вентилируемой прослойкой – 37 828 тг.

На рисунке 6.17 продемонстрирована рыночная стоимость ограждающих конструкций из расчета на 1м<sup>2</sup>:

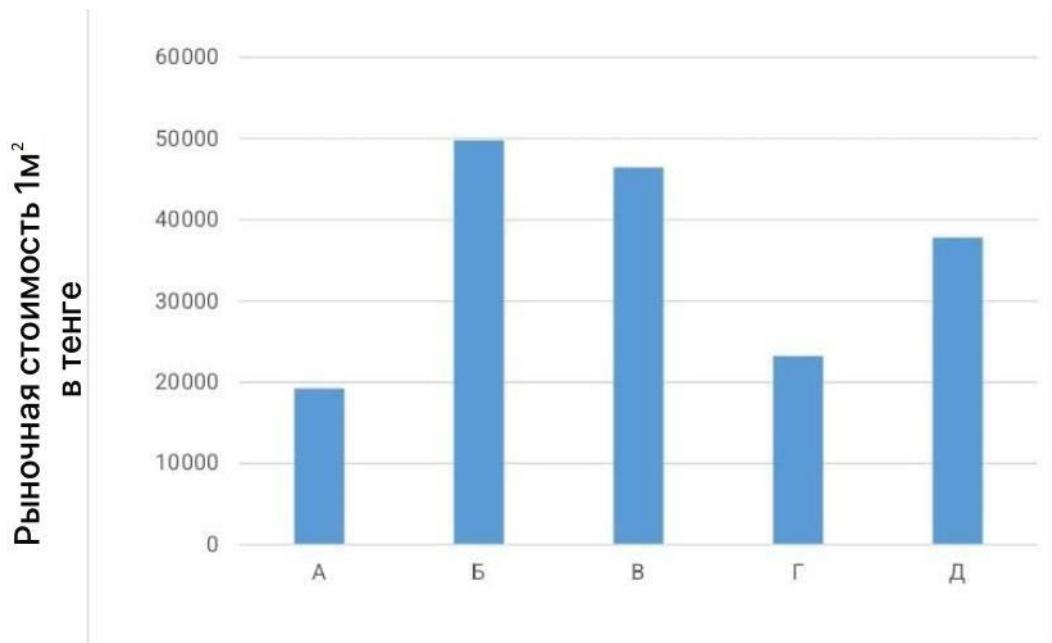


Рисунок 5.17 – Рыночная стоимость ограждающих конструкций из расчета на 1м<sup>2</sup>: А -трехслойная панель из высокопоризованного полистирол бетона; Б - традиционное ограждение из полнотелого керамического кирпича; В - традиционное ограждение из пустотелого керамического кирпича; Г - традиционное ограждение пеноблока; Д – наружное ограждение с вентилируемой прослойкой

В рамках данной работы выполнено всестороннее теоретическое исследование новой технологии устройства многослойной наружной ограждающей конструкции на основе трехслойной панели, выполненной из высокопористого полистиролбетона (см. рисунок 5.1 А). Проведено сравнение с традиционными типами ограждений (рисунки 5.1 Б, В, Г, Д), моделирование которых осуществлялось с применением программного комплекса ELCUT 5.6 и системы компьютерной алгебры Maple.

Комплексная оценка всех рассматриваемых вариантов многослойных ограждающих конструкций проводилась в три этапа: на первом этапе изучались параметры теплового режима (рисунок 5.2); на втором - показатели влажностного режима (рисунок 5.3); на третьем - характеристики воздушного режима (рисунок 5.4).

Основные геометрические и теплофизические свойства конструкций отражены на рисунке 5.1 и в таблицах 5.1–5.5. В качестве климатической зоны исследования выбрана центральная часть Республики Казахстан (город

Караганда), при этом исходные климатические параметры были приняты в соответствии с данными источниками.

Результаты анализа, проведённого на первом этапе исследования, показали, что нормативное значение сопротивления теплопередаче ( $R_2$ ) для рассматриваемого региона составляет  $3,2 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ . Этот показатель установлен на основе величины градусо-суток отопительного периода, принятой согласно нормативным документам [85-95].

С учетом указанного значения  $R_2$  в исследовании была определена толщина слоёв многослойных ограждающих конструкций таким образом, чтобы удовлетворить нормативному требованию. Фактические значения сопротивления теплопередаче ( $R_1$ ), полученные в результате расчётов, приведены на рисунке 5.9. Они варьируются в пределах от 3,5 до  $3,55 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ , что практически соответствует нормативу при заданной толщине конструкций.

На основании этих данных установлено, что при одинаковом уровне термического сопротивления (рисунок 5.5) толщина традиционных ограждающих конструкций (рисунки 5.1 В, С, Д, Е) превышает толщину разработанного варианта (рисунок 5.1 А) на 25,77%, 23,71%, 3,09% и 27,83% соответственно [90].

Следовательно, при приведении толщин всех ограждающих элементов к эквивалентному термическому сопротивлению, анализ температурных полей показал, что температура на внутренней поверхности конструкций остаётся практически одинаковой во всех случаях, составляя в среднем около  $18,40 \text{ }^\circ\text{C}$  (рисунок 5.6).

Результаты второго этапа исследования (рисунок 5.3) показали, что во всех рассмотренных конструкциях наблюдается процесс накопления влаги (рисунок 6.7). Согласно расчетам объема влаги, накапливаемой в ограждающих элементах (рисунок 6.8), конструкции вариантов 2 и 4 продемонстрировали более низкие значения накопления влаги — на 2,61% и 9,48% соответственно по сравнению с разработанным решением. В то же время варианты 3 и 5 показали превышение на 27,94% и 119% соответственно [90].

Тем не менее, последующий анализ испарения влаги из многослойных ограждающих конструкций в течение периода высыхания подтвердил, что весь объем накопившейся влаги полностью удаляется (рисунок 5.9).

Дополнительно было проведено исследование соответствия конструкций требованиям по недопущению накопления влаги как в течение годового эксплуатационного периода (рисунок 5.10), так и за весь период влагонакопления (рисунок 5.11). Во всех рассмотренных случаях условие ( $R_{vpc}^1 \geq R_{vpc}^2$ ) оказалось выполненным, что свидетельствует о соответствии разработанной конструкции нормативным требованиям. Это подчёркивает её эффективность даже при наличии значительных отличий в толщине по сравнению с традиционными вариантами [95].

Анализ данных третьего этапа исследования (рисунок 6.8) показал, что во всех рассматриваемых многослойных наружных ограждающих конструкциях соблюдается условие  $(R_u^2 \leq R_u^1)$ , где фактическое сопротивление воздухопроницаемости соответствует или превышает требуемое. Расчётные значения приведены в таблице 5.7.

При этом в разработанном варианте конструкции (рисунок 5.1 а) фактическое сопротивление воздухопроницаемости значительно выше, чем в традиционных решениях, что оказывает положительное влияние на теплотехническое состояние ограждений. В частности, температура внутренней поверхности  $(R_u^2 \leq R_u^1)$  в новом варианте конструкции сохраняется на стабильном уровне ( $18,41^{\circ}\text{C}$ ), даже с учётом фильтрации воздуха. В то время как в традиционных конструкциях этот показатель может снижаться до  $1,35^{\circ}\text{C}$  в зависимости от конкретной конфигурации, что в условиях холодного климата считается нежелательным [90].

Дополнительно был выполнен анализ тепловой инерционности как для разработанной, так и для традиционных конструкций. Согласно полученным результатам, новая конструкция демонстрирует высокую тепловую инерционность (категория  $D > 7$ ), превышая показатели традиционных решений на 6,69%, 8,33%, 30,04% и 15,72% соответственно. Это также является важным преимуществом в условиях пониженных температур [90].

## 5.2 Экономическая эффективность применения трехслойной стеновой панели со слоем высокопоризованного полистиролбетона

Производство трехслойной стеновой панели с теплоизоляционным слоем высокопоризованного полистиролбетона позволить сократить не только использование ручного труда, повысив автоматизацию процесса, но также снизит себестоимость конструкции за счет сокращения использования материалов и их доставки от стран-поставщиков. С целью определения экономической эффективности применения предлагаемой конструкции был проведен сравнительный анализ между существующей трехслойной панелью и нами внедряемой. Для этого определена стоимость бетона для их производства, а также деталей (арматуры, фанеры), которые также используются на производстве.

В таблице 5.4 просчитана стоимость тяжелого бетона класса С25/30, так как он применяется как наружный и внутренний слой у трехслойной стеновой панели:

Таблица 5.4 - Стоимость тяжелого бетона для производства трехслойных стновых панелей

Наименование	Ед. изм.	Кол-во	Цена	Сумма без НДС
Основные материалы				13 986,3
1. Портландцемент М500-Д0	т	0,38	30 579	10 375,0
2. Песчано-гравийная смесь	т	0,98	821	718,4
3. Щебень 5-20	т	0,92	2 200	1 807,1
4. Вода	м <sup>3</sup>	0,2		0,0
5. Добавка 0,8%	кг	3,04	400	1 085,7
6. Транспортно-заготовительные расходы:				
а) цемент	т*км	0,4	3656	1 240,4
б) песчано-гравийная смесь	т*км	36,0	32	1 129,0
в) щебень	т*км	7,0	32	206,1
7. Электроэнергия	кВт ч	20	60	1 071,4
8. Газ	кг	6	160	857,1
9. Складские расходы		5%		699,3
10. Основная заработка плата	тг			950,0
11. Социальный налог		15%		137,8
12. Накладные расходы ЗП		95%		902,5
ИТОГО СЕБЕСТОИМОСТЬ:	тг			21 180

Далее расчетную стоимость тяжелого бетона используем для просчета стоимости панелей (существующей и разработанной). Для начала рассчитаем себестоимость существующей панели (таблица 5.5):

Таблица 5.5 - Стоимость существующей трехслойной стеновой панели со слоем пенополистирола

Наименование	Кол-во ед.шт	Ед. изм.	Расход материала	Цена за ед.изм, тг	Стоимость, тг
Габаритные размеры,мм	2625*2980*400 (L*B*h)				
Класс бетона		C25/30			
Объем бетона		1,62 м <sup>3</sup>		21180	34311
Портландцемент М500-Д0		тонн	0,62	27302,68	16 906
Песчано-гравийная смесь		тонн	1,59	821,00	1 303
Шебень 5-20		тонн	1,49	2 200,00	3 279
Вода		л	0,2		

Проволока ВР-1; ф4,8; Бунты; ТС 173-062-2014	2	кг	57,95	250000,00	14 488
Арматура А500С; ф16x11700; МД; ГОСТ 34028-2016	1	кг	0,01	245535,71	3
Арматура А500С; ф8; Бунты ГОСТ 34028-2016	2	кг	11,33	252678,57	2 863
Арматура А500С; ф12*1170 МД; ГОСТ 34028-2016	2	кг	3,03	245535,71	744
Арматура А500С; ф28*1170 МД; ГОСТ 34028-2016	1	кг	1,59	250000,00	397,5
Круг СТ3СП-1; ф10x11700; МД; В1-И-2ГП, без т/о; I ГОСТ 2590-2006; ГОСТ 535 2005	2	кг	0,01	270535,71	2 056
Гибкая связь горизонт. СПА 7,5.300.2.1 (60)	2	шт	30	79,43	2 383
Гибкая связь наклон. СПА 7,5.425.2.1(85)	1	шт	28	102,82	2 879
Разделительная смазка ЭЛИТ-LV	5	кг	0,95	669,640	636
ППС17 (пенопласт ПСБ-С М-25) 3000*1000*190 ГОСТ 15588-2014	2	м <sup>3</sup>	1,33	24107,14	31 990
Мин. плита ОС (М 50-200)	4	м <sup>3</sup>	0,16	13 326,23	2 132
Материалы					125 26
Трудозатраты на 1 м <sup>3</sup>	32 000				51 840
Накладные СГП, ЭМС, ИТР					20 736
					15 967
Амортизационные расходы	6 429				10 414
Себестоимость					224 283
НДС			12%		26 914
ИТОГО цена с НДС					251 200

Исходя из проделанных расчетов, итоговая цена с НДС для существующей трехслойной стеновой панели с теплоизоляционным слоем пенополистирола равна 251200 (двести пятьдесят одна тысяча двести) тенге. В данную стоимость были вложены все заводские расходы, включая стоимость материалов, трудозатрат, накладных расходов и логистических операций.

При расчете стоимости предлагаемой панели также были включены перечисленные позиции, но исключаемые (гибкие связи, мин.вата) были заменены на данные, необходимые для производства высокопоризованного полистиролбетона:

Таблица 5.6 - Стоимость разработанной трехслойной стеновой панели со слоем высокопоризованного полистиролбетона

Наименование	Кол-во ед.шт	Ед. изм.	Расход материала	Цена за ед.изм, тг	Стоимость, тг
Габаритные размеры,мм		2625*2980*400 (L*B*h)			
Класс бетона		C25/30			
Объем бетона		1,62 м <sup>3</sup>		21180	34311
Портландцемент		тонн	0,62	27302,68	16 906
Песчано-гравийная смесь		тонн	1,59	821,00	1 303
Шебень 5-20		тонн	1,49	2 200,00	3 279
Вода		л	0,2		
Проволока ВР-1; ф4,8; Бунты; ТС 173-062-2014	2	кг	57,95	250000,00	14 488
Арматура А500С; ф16x11700; МД; ГОСТ 34028-2016	1	кг	0,01	245535,71	3
Арматура А500С; ф8; Бунты ГОСТ 34028-2016	2	кг	11,33	252678,57	2 863
Арматура А500С; ф12*1170 МД; ГОСТ34028-2016	2	кг	3,03	245535,71	744
Арматура А500С; ф28*1170 МД; ГОСТ 34028-2016	1	кг	1,59	250000,00	397,5
Круг СТ3СП-1; ф10x11700; МД;В1-П-2ГП, без т/o;I ГОСТ 2590-2006; ГОСТ 535 2005	2	кг	0,01	270535,71	2 056
Портланцемент					
Цемент			0,39	49518,48	19252,79
Шлак			0,26	892,86	231,43
Гранулы полистирола			0,57	24107,14	13668,75
Воздухововлек. модиф.		кг	4,3	300	1290
Суперпластиф.		кг	4,3	300	1290
Разделительная смазка ЭЛИТ-LV	5	кг	0,95	669,640	636
Материалы					125 26
Трудозатраты на 1 м <sup>3</sup>	32000				51 840
Накладные СГП, ЭМС, ИТР					20 736
					15 967
Амортизационные расходы	6 429				10 414
Себестоимость					212 128

НДС			12%		25 455
ИТОГО цена с НДС					237 600

Таким образом, стоимость разработанной трехслойной стеновой панели со слоем высокопоризованного полистиролбетона равна 237 600 (двести тридцать семь тысяч шестьсот) тенге, что на 13 600 тг меньше стоимости существующей панели. Экономическая выгода от производства панелей при производительности 10 м<sup>3</sup>/сут составляет 21,8 млн тг/год.

## 5.1 Выводы

1) При приведении традиционных многослойных ограждающих конструкций к аналогичному значению фактического сопротивления теплопередаче ( $R_1$ ), соответствующему нормативному ( $R_2$ ), наблюдается увеличение их толщины по сравнению с разработанным вариантом. Рост составляет от 3,09% до 27,83% в зависимости от типа конструкции, что может привести к увеличению строительных затрат и снижению экономической эффективности.

2) Во всех исследованных конструкциях выявлено накопление влаги в диапазоне от 2113,6 до 109 758 г/м<sup>2</sup>. При этом, если в вариантах 2 и 4 объем накопленной влаги оказался меньше по сравнению с разработанной системой на 2,61% и 9,48% соответственно, то в вариантах 3 и 5 он превышен на 27,94% и 119%. Однако, согласно расчетам, весь накопленный объем влаги испаряется в течение фазы высыхания. Кроме того, все исследованные конструкции удовлетворяют требованиям по недопустимости накопления влаги как за год эксплуатации, так и за период влагонакопления.

3) Фактические и нормативные значения сопротивления воздухопроницаемости удовлетворяют условию ( $R_u^2 \leq R_u^1$ ), что положительно влияет на термическое поведение ограждений при наличии инфильтрации воздуха. Так, в разработанной конструкции температура на внутренней поверхности ( $R_u^2 \leq R_u^1$ ), остаётся стабильной (18,41 °C), тогда как в традиционных системах она снижается вплоть до 1,35 °C в зависимости от варианта, что может оказывать негативное влияние в холодный сезон.

4) Анализ коэффициента тепловой инерционности (D) показал, что разработанная конструкция относится к категории высокой инерционности (при  $D > 7$ ) и превосходит традиционные аналоги на величину до 30,04%, в зависимости от варианта. Это преимущество также отразилось на поддержании температуры внутренней поверхности ограждений с учетом процессов фильтрации воздуха.

5) Экономическая эффективность разработанной технологии и состава составляет 21,8 млн тг/год.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Приоритетные направления развития науки на 2024–2026 годы утверждены в Казахстане // Официальный информационный ресурс Премьер-министра Республики Казахстан. — 28 сент. 2023. — URL: <https://primeminister.kz/ru/news/prioritetnye-napravleniya-razvitiya-nauki-na-2024-2026-gody-utverzhdeny-v-kazakhstane-25716>
2. Постановление Правительства Республики Казахстан от 28 марта 2023 года № 264 / ИПС «Әділет». Available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2300000264>
3. Ravindrarajah,R.;Tuck, A.J. Properties of hardened concretecontainingtreated expanded polystyrene beads. Cement and ConcreteComposites, 1994, 16, 273–277.https://doi.org/10.1016/0958-9465(94)90039-6
4. Sun, Y.; Li, C.; You, J.; Bu, C.; Yu, L.; Yan, Z.; Liu, X.; Zhang, Y.; Chen, X. An Investigation of the Properties of Expanded Polystyrene Concrete with Fibers Based on an Orthogonal Experimental Design. Materials 2022, 15, 1228. <https://doi.org/10.3390/ma15031228>
5. Meddage, D.P.P.; Chadee, A.; Jayasinghe, M.T.R.; Rathnayake, U. Exploring the applicability of expanded polystyrene (EPS) based concrete panels as roof slab insulation in the tropics. Case Studies in Construction Materials. 2022, 17, e01361.https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01361
6. Zhangabay, N., Kudabayev R., A., Mizamov N., et al. Study of the model of the phase transition envelope taking into account the process of thermal storage under natural draft and by air injection. Case studies in Construction Materials. 2023, 18, e02050. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02050>
7. Григорьев В. В., Морозов А. Н. Технология лёгких бетонов. — М.: Стройиздат, 2019. — 256 с.
8. Костина Л. П. Теплоизоляционные материалы и изделия. — СПб.: Питер, 2021. — 312 с.
9. СниП 23-02-2003 "Тепловая защита зданий"
10. Кирсанов И. Н. Легкие бетоны и их применение в строительстве. — М.: АСВ, 2020. — 198 с.
11. Кузнецова Е. В. Современные строительные материалы. — Екатеринбург: УрФУ, 2022. — 176 с.
12. Ravindrarajah,R.;Tuck, A.J. Properties of hardened concretecontainingtreated expanded polystyrene beads. Cement and ConcreteComposites, 1994, 16, 273–277.https://doi.org/10.1016/0958-9465(94)90039-6
13. Sun, Y.; Li, C.; You, J.; Bu, C.; Yu, L.; Yan, Z.; Liu, X.; Zhang, Y.; Chen, X. An Investigation of the Properties of Expanded Polystyrene Concrete with Fibers Based on an Orthogonal Experimental Design. Materials 2022, 15, 1228. <https://doi.org/10.3390/ma15031228>

14. Meddage, D.P.P.; Chadee, A.; Jayasinghe, M.T.R.; Rathnayake, U. Exploring the applicability of expanded polystyrene (EPS) based concrete panels as roof slab insulation in the tropics. *Case Studies in Construction Materials.* 2022, 17, e01361. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01361>
15. Meddage, D.P. P.; Jayasinghe, M.T. R. Use of EPS Based Light-Weight Concrete Panels as a Roof Insulation Material for NERD Slab System. *ICSBE 2020, Singapore.* 2022, 375–384. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-4412-2\\_28](https://doi.org/10.1007/978-981-16-4412-2_28)
16. Leão, L.S.; Spini, G.P.; deFrança, M.S.; Costa, E.B.C. Recycled expanded polystyrene (EPS) as an eco-friendly alternative for sand in rendering mortars. *Construction and Building Materials.* 2024, 414, 135018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135018>
17. Prasittisopin, L.; Termkhajornkit, P.; Kim, Y.H. Review of concrete with expanded polystyrene (EPS): Performance and environmental aspects. *Journal of Cleaner Production.* 2022, 366, 132919. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132919>
18. Xiang, J.; Song, Y.; Shu, H.; Li, Z.; Qiu, J. Gu, X. Expanded polystyrene (EPS) particles as a carrier to improve the growth of microorganisms in concrete. *Journal of Cleaner Production.* 2022, 369, 133363. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133363>
19. Rakhimova, G.; Zhangabay, N.; Samoilova, T.; Rakhimov, M.; Kropachev, P.; Stanevich, V.; Karacasu, M.; Ibraimova, U. Computational Research of the Efficiency of Using a Three-Layer Panel Made of Highly Porous Polystyrene Concrete. *Materials.* 2024, 17(16), 4133; <https://doi.org/10.3390/ma17164133>
20. Zhangabay, N.; Tagybayev A.; Utelbayeva, A.; Buganova, S.; Tolganbayev, A.; Tulesheva, G.; Jumabayev A.; Kolesnikov, A.; Kambarov, M.; Imanaliyev, K.; Kozlov, P. Analysis of the influence of thermal insulation material on the thermal resistance of new facade structures with horizontal air channels. *Case Studies in Construction Materials.* 2023, 18, e02026. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02026>
21. Bonopera, M.; Baidilla, I.; Utelbayeva, A.; Tursunkululy, T. Research of Heat Tolerance and Moisture Conditions of New Worked-Out Face Structures with Complete Gap Spacings. *Buildings.* 2023, 13(11), 2853. <https://doi.org/10.3390/buildings13112853>
22. Blazejczyk, A.; Jastrzebski, C.; Wierzbicki, M. Change in Conductive–Radiative Heat Transfer Mechanism Forced by Graphite Microfiller in Expanded Polystyrene Thermal Insulation—Experimental and Simulated Investigations. *Materials.* 2020, 13(11), 2626. <https://doi.org/10.3390/ma13112626>,
23. Coquard, R.; Quenard, D.; Baillis, D. Numerical and experimental study of the IR opacification of Polystyrene Foams for Thermal Insulation enhancement. *Energy Build.* 2018, 183, 54–63. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.037>
24. Hasanzadeh, R.; Azdast, T.; Doniavi, A.; Eungkee Lee, R. Multi-objective optimization of heat transfer mechanisms of microcellular polymeric foams from

thermal-insulation point of view. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 2019, 9, 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.11.002>

25. Samoilova, T., Rakhimov, M., Rakhimova, G., & Zhangabay, N. Effect of heat treatment of expanded polystyrene concrete on its compressive strength. *Technobius*, 2024, 4(2), 0059. <https://doi.org/10.54355/tbus/4.2.2024.0059>

26. Плотникова, Л.Г.; Пичугин, А.П.; Веригин, Ю.А. Влияние тепловой обработки на пористость бетона. *Вестник*, 2012, 1/2, 93–97. <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-teplovoye-obsorbotki-na-poristost-betona> (accessed on 25 March 2025)

27. Kathiravel, R.; Weerasinghe, P.; Jayasinghe, M. T. R. Hygrothermal performance of micro inhomogeneous insulation materials - EPS-based wall panel. *Journal of Building Engineering*. 2024, 92, 109682. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109682>

28. Zhangabay, N.; Tursunkululy, T.; Ibraimova, U.; Abdikerova, U. Energy-Efficient Adaptive Dynamic Building Facades: A Review of Their Energy Efficiency and Operating Loads. *Appl. Sci.* 2024, 14(23), 10979; <https://doi.org/10.3390/app142310979>

29. ГОСТ 13578-2019. Панели из лёгких бетонов на пористых заполнителях для наружных стен производственных зданий. Москва. Стандартинформ. 2019. С-16. <https://files.stroyinf.ru/Data/708/70837.pdf>

30. ГОСТ 11024-2012. Панели стеновые наружные бетонные и железобетонные для жилых и общественных зданий. Москва. Стандартинформ. 2014. С-23 <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293780/4293780423.pdf>

31. Мальдонадо-Бандала, ЕЕ; Ньевес-Мендоса, Д.; Ромеро-Лопес, Р.; Тобиас-Харамильо, Р.; Альмерая-Кальдерон, Ф.; Барриос-Дурстевиц, СР; Нуњес Хакес Р.Э. Электрохимические и механические свойства легких бетонных блоков с пенополистиролом. Междунар. Дж. Электрохим. Sci 2015, 10, 472–485.

32. Shtepi, L.; Astolfi, A.; Badino, E.; Volpatti, G.; Zampini, D. More Than Just Concrete: Acoustically Efficient Porous Concrete with Different Aggregate Shape and Gradation. *Appl. Sci.* 2021, 11, 4835.

33. Рахимов М.А., Рахимов А.М.- Модифицированный легкий бетон на стекловидном заполнителе из отходов промышленности // Республиканский журнал «Труды университета». Караганда, 2019. № 2 (75). С. 90-94.

34. Станевич В.Т., Столбоушкин А.Ю., Рахимова Г.М., Вышарь О.В., Рахимов М.А. - Экологические аспекты использования вскрышных пород угледобычи в производстве строительной керамики // В сборнике: Актуальные вопросы современного строительства промышленных регионов России. труды III всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Новокузнецк, 2022. С. 212-216.

35. Rakhimov M., Rakhimova G., Tkach E., Assan A. - Determining the difference between three different seismic modular methods

// Республиканский журнал «Труды университета». Караганда, 2021. № 4 (85). С. 203-211.

36. Байджанов Д.О., Рахимов М.А., Рахимов А.М. - Технология получения пеностеклокристаллических теплоизоляционных материалов на основе отходов промышленности // Республиканский журнал «Труды университета». Караганда, 2017. № 4 (69). С. 73-76.

37. Research on thermal properties of polystyrene granular concrete under the influence of multiple factors - Zhou-ping Yu , Wei-jun Yang

38. Zhangabay, N., Giyasov, A., Ybray, S., Tursunkululy, T., Kolesnikov, A. Field thermovision study of external enclosure for multi-storey residential building under climatic conditions of Northern Kazakhstan. *Construction Materials and Products*. 2024. 7 (1). 1. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-1-1>

39. Sheikholeslami, M., Hazim, R.A. Analyzing efficiency of solar heat storage unit within a building including trombe wall equipped with phase change material in existence of fins. *Journal of Building Engineering*. 2023, 71. 106406. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106406>

40. Pirasaci, T. Investigation of phase state and heat storage form of the phase change material (PCM) layer integrated into the exterior walls of the residential-apartment during heating season. *Energy*. 2020, 207, 118176. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118176>

41. Gonçalves, M., Simões, N., Serra, C., Flores-Colen, I. A review of the challenges posed by the use of vacuum panels in external insulation finishing systems. *Applied Energy*. 2020, 257, 114028. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114028>,

42. Zhuang, J., Ghaffar, S.H., Fan, M., Corker, J. Restructure of expanded cork with fumed silica as novel core materials for vacuum insulation panels. *Compos Part B Eng.* 2017, 127, 215-221, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.019>,

43. Simmler, H. , Brunner, S. Vacuum insulation panels for building application: Basic properties, aging mechanisms and service life. *Energy Build*, 2005, 37, 1122-1131, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.06.015>

44. Joo, N., Song, S. Improvement of thermal insulation performance of precast concrete curtain walls for apartment buildings. *Energy and Buildings*. 2023, 296, 113350. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113350>

45. Cuong, N., Gayoon, L., An, H., An, S., Whan Han, S., Lee K. Experimental evaluation of a vertical heat bridge insulation system for the structural performance of multi-residential buildings. *Structures*. 2023, 58, 105686. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105686>

46. Kim, S., Hong, W., Ko, H., Kim, J. The energy efficient expansion remodeling construction method of bearing wall apartment buildings with pre-cast composite structural systems. *Energy and Buildings*. 2013, 66, 714-723. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.080>

47. Рахимов М.А., Сулеймбекова З.А. - Исследование подвижности цементно-зольных паст с гиперпластификаторами // Республиканский журнал «Труды университета». Караганда, 2020. № 2 (79). С. 110-114.
48. Ткач Е.В., Рахимов М.А., Рахимова Г.М., Мудренко В.В. – Исследование влияния комплексного модификатора на физико-механические свойства полистиролбетона // Республиканский журнал «Труды университета». Караганда, 2022. № 1 (70). С. 167-169.
49. Chen, B., Liu, J., & Chen, L. Z. (2010). Experimental study of lightweight expanded polystyrene aggregate concrete containing silica fume and polypropylene fibers. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 15(2), 129-137. DOI: 10.1007/s12204-010-9550-3.
50. Kharun, M., & Svintsov, A. P. (2017). Polystyrene concrete is 10-30% lower [density], but the compressive strength is 10-15% higher than the cellular concrete. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 4(10), 40-45.
51. Wang, E., Xiang, L., Tang, B., Dai, X., Cao, Z., Jiang, T., Wang, Y., Chen, X., Li, W., Zhao, Y., ... Wu, X. (2023). Preparation and Compression Resistance of Lightweight Concrete Filled with Lightweight Calcium Carbonate Reinforced Expanded Polystyrene Foam. *Polymers*, 15(24), 4642. DOI: 10.3390/polym15244642.
52. Özen M., Güler M. Quantification of segregation in Portland cement concrete based on spatial distribution of aggregate size fractions // *International Journal of Applied Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 17, No. 4. – P. 2020042. – DOI: 10.6703/IJASE.202012\_17(4).2020042.
53. Иванова, Н. В. и др. "Роль пылевидной фракции доменного шлака в составе бетонов". — Журнал «Цемент и его приложения», 2018, № 12, с. 41-46.
54. Николаев, С. В., Грачёв, А. Н. "Влияние пылевидных фракций доменного шлака на прочностные характеристики бетонов". — Журнал «Строительные технологии», 2022, т. 98, № 1, с. 44-49.
55. Васильева, Л. К., Сергеев, С. А. "Доменный шлак как компонент для модификации бетонов с улучшенными эксплуатационными характеристиками". — Журнал «Инновации в строительстве», 2023, № 2, с. 112-118.
56. Karolina, R., Simanjuntak, R., Syahrizal, & Putra Handana, M. A. (2018). The Effect of Polystyrene on Concrete Mechanical Properties. *EAI Conference Proceedings*. DOI: 10.4108/eai.3-11-2018.2285654.
57. Surati, V. N., Soni, N. P., Shah, K. P. Application of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) In High Performance Concrete. *Journal of Science & Technology*, 2022, Vol. 7(9), с. 12-23. DOI:10.46243/jst.2022.v7.i09.pp12-23.
58. Gernay T. Fire behavior of lightweight concretes with polymer-based aggregates // *Fire Safety Journal*. — 2018. — Vol. 100. — P. 82–95.
59. Fan, L., Xu, F., Wang, S., Yu, Y., Zhang, J., & Guo, J. (2023). A review on the modification mechanism of polymer on cement-based materials. *Journal of*

60. Dong S., Liu D., Li Y., et al. Influence of early thermal curing regimes on concrete properties: hot water, hot air, steam, autoclave and microwave curing // Construction and Building Materials. – 2024. – Vol. 412. – P. 133–149.
61. Xu D., Zhang L., Chen Q., et al. Influence of curing regimes on hydration and microstructure development of cementitious systems // Cement and Concrete Research. – 2023. – Vol. 165. – P. 1–14.
62. eng G., Li R., Zhou Y., et al. Effect of thermal curing regimes on the mechanical properties and durability of ultra-high performance concrete: A review // Materials Today Communications. – 2025. – Vol. 39. – P. 102012.
63. Garcia D. C. S., Oliveira M., Santos L. Evaluating the effect of autoclave curing on porosity and microstructure of high-strength concrete // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 348. – P. 128182.
64. Wibowo A. P., Nugroho H., et al. Thermal advantages of fly ash-coated expanded polystyrene beads for lightweight concrete // Polymers. – 2024. – Vol. 16. – P. 1452.
65. Ahmed M. I., Abdullah A., Hassan R. Optimization and performance of expanded polystyrene concrete panels under different curing regimes // Journal of Materials Research and Technology. – 2025. – Vol. 38. – P. 455–470.
66. Ramazanova A.E. Effect of heat and moisture treatment and heat treatment on the structure of concrete // Scientific and educational magazine for students and teachers *Stud Net*. – 2022. – № 6. – С. 50–13.
67. Gelardi G., Le Saout G. Advances in Understanding Cement Hydration Mechanisms // Cement and Concrete Research. — 2018. — Vol. 110. — P. 3–15.
68. Gao P., Ng P. Thermal Curing Effects on Lightweight Polymer-Modified Concretes // Construction and Building Materials. — 2020. — Vol. 250. — Article 118865.
69. СП-362.1325800-2017. Ограждающие конструкции из трёхслойных панелей. Правила проектирования.
70. Pozo-Lora F. F. et al. State-of-the-Art Review of Concrete Sandwich Wall Panels // Sustainability. — 2025. — Vol. 17(8).
71. Запруднов В. И. Разработка монолитных трёхслойных стеновых конструкций с теплоизоляционным слоем // Вестник МГУЛ (БГТУ). — 2018. — № 2. — С. 117–119.
72. Филатов Е. Ф. Конструктивные особенности трёхслойных наружных стеновых панелей с дискретными связями // Строительные конструкции и технологии. — 2017.
73. Евдокимов А.А., Дайнеко О.С., Приезжев В.А. Укрупненные панели из полистиролбетона для сельскохозяйственных зданий // Бетон и железобетон. - 1985. - № 10. – С. 4-5.

74. Евдокимов А.А., Дайнеко О.С. Прочностные и деформативные свойства конструкционно-теплоизоляционного керамзитобетона и полистиролбетона по нижней плотности / Сб. научн. тр. Эффективные легкие бетоны и конструкции из них – М.: НИИЖБ, 1984. – С. 15-24.
75. Chen B., Liu J., Li Z. Experimental study of lightweight expanded polystyrene concrete and its shrinkage behavior // Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China. — 2010. — Vol. 4(2). — P. 159–165.
76. Maghfouri M., Nguyen V., Formosa L. Drying shrinkage properties of expanded polystyrene lightweight concrete: A review. — NTNU Research Publication, 2022. — 42 p.
77. Золотов А. А. Пористая структура и морозостойкость бетона // Строительные материалы. — 2017. — № 6. — С. 12–16.
78. Козлова В. К. Влияние структуры пор на морозостойкость легких бетонов // Вестник МГСУ. — 2019. — № 8. — С. 56–65.
79. Tengfei Fu, Jianxin Wang. Effects of air-void system on freeze-thaw resistance of lightweight concretes // Materials. — 2020. — Vol. 13(12). — Article 2754.
80. Al-Alusi M. R. M., Abdullah A. Freeze-thaw performance of lightweight concrete with EPS and recycled fibers // Construction and Building Materials. — 2024. — Vol. 390. — Article 131728.
81. Wu H., Wang Q. Thermo-mechanical degradation of polymer-modified lightweight concrete during fire exposure // Materials & Design. — 2022. — Vol. 221. — Article 110971.
82. Peng G., Xu J. Influence of expanded polystyrene particles on fire resistance of lightweight concretes // Construction and Building Materials. — 2021. — Vol. 279. — Article 122471.
83. Баженов Ю. М., Королев В. А. Модифицированные бетоны: структура, свойства, технологии. — М.: АСВ, 2010. — 287 с.
84. Turhan S. Radiological impact of the use of lightweight concretes containing natural materials // Journal of Environmental Radioactivity. — 2017. — Vol. 167. — P. 117–125.
85. Ammar H., Toumi N. Assessment of natural radionuclides in lightweight composites with polymer additives // Construction and Building Materials. — 2021. — Vol. 310. — Article 125258.
86. Santos A. J. Indoor radiation from construction materials: influence of density and porosity // Journal of Environmental Radioactivity. — 2020. — Vol. 213. — Article 106145.
87. ГОСТ 30108-94 – Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов.
88. Samoilova, T., Rakhimov, M., Rakhimova, G., & Zhangabay, N. Effect of heat treatment of expanded polystyrene concrete on its compressive strength. *Technobius*, 2024, 4(2), 0059. <https://doi.org/10.54355/tbus/4.2.2024.0059>

89. СП РК 2.04-107 -2022. Тепловая защита зданий. Свод правил Республики Казахстан. Комитет по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства. Астана 2022, 135с.  
[https://online.zakon.kz/Document/?doc\\_id=39838250](https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=39838250) (accessed on 25 July 2024)

90. СП 50.13330.2012 – Свод правил «Тепловая защита зданий». – Дата введения 2013-07-01. – Режим доступа: <https://aluprof.su/index.php/dokumentatsiya/gosty-i-snipy> (accessed on 25 July 2024)

91. Sanitary Standards of the Republic of Kazakhstan 2.04-04-2011 Thermal Protection of Buildings: State Standards in the Field of Architecture, Urban Planning and Construction. Code of Rules of the Republic of Kazakhstan. – JSC “KazNIISA”, LLP “Astana Stroy-Consulting”, 2013. Approved and Enacted on 1 July 2015. 14 p.  
[https://hoffmann.kz/files/12\\_SN\\_RK\\_2-04-04-2011.pdf](https://hoffmann.kz/files/12_SN_RK_2-04-04-2011.pdf) (accessed on 18 July 2024)

92. Sanitary Regulations of the Republic of Kazakhstan 2.04-106-2012 Design of Thermal Protection of Buildings: State Standards in the Field of Architecture, Urban Planning and Construction. Code of Rules of the Republic of Kazakhstan. – JSC “KazNIISA”, LLP “Astana Stroy-Consulting”, 2013. Approved and Enacted on 1 July 2015. 74 p. [https://online.zakon.kz/Document/?doc\\_id=35957424](https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=35957424) (accessed on 18 July 2024).

93. Zhangabay, N., Bakhbergen, S., Aldiyarov, Zh., Tursunkululy, T., Kolesnikov, A. Analysis of thermal efficiency of external fencing made of innovative ceramic blocks. *Construction Materials and Products.* 2024, 7 (3), 1. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-3-1>

94. <https://elcut.ru> (accessed on 10 July 2024)

95. Code of Rules of the Republic of Kazakhstan 2.04-01-2017 Building Climatology: State Standards in the Field of Architecture, Urban Planning and Construction. Code of Rules of the Republic of Kazakhstan. – JSC “KazNIISA”, LLP “Astana Stroy-Consulting”, 2017. Approved and Enacted on 20 December 2017. 43 p. Available online: [https://online.zakon.kz/m/document/?doc\\_id=37599018](https://online.zakon.kz/m/document/?doc_id=37599018) (accessed on 18 July 2024)

96. <https://www.kazhydromet.kz/ru/> (accessed on 18 July 2024)

97. Сахин В.В., Герлиман Е.М., Брыков Н.А. Теплопередача в примерах и задачах. – Балт. гос. техн. ун-т. – Санкт-Петербург, 2019. 165 с. <http://www.library.voennmeh.ru/cnau/8yCJlPwJVElpmHv.pdf> (accessed on 10 July 2024)

98. Исаченко В.П., Осипов В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.:Энергоиздат, 1981. 416 с. <https://djvu.online/file/BXpZJMYm45EsC> (accessed on 10 July 2024)

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б



## ПРИЛОЖЕНИЕВ



ЖШС «Фимараттар мен құрылыштардың қауіпсіздігін техникалық бақылау»

Аттестат аккредитации № KZ.T.10.E0936 от 28.04.2022 г  
КР, Караганды қ-сы, көше Карбышева үй 5/6, кенсе 11,  
E-mail: [techcontrol21@mail.ru](mailto:techcontrol21@mail.ru)

ТОО «Технический контроль безопасности зданий и сооружений»

Аттестат аккредитации № KZ.T.10.E0936 от 28.04.2022 г  
РК, г. Караганда, ул. Карбышева 5/6 н.п.11,  
E-mail: [techcontrol21@mail.ru](mailto:techcontrol21@mail.ru)

Ф 4.И-ИЛ-10

лист 1

всего листов 2

### Протокол испытаний №590

от «13» августа 2024 г.

**Наименование продукции:** Тяжелый бетон

**Заявитель, договор (заявка), адрес:** Физ.л. Самойлова Т.Ю.

**Страна (предприятие) изготавитель, адрес:** -

**Акт отбора образцов:** образцы изготовлены заказчиком

**Дата проведения испытаний:** 03-30.06.2024 г.

**Место проведения испытаний:** Испытательная лаборатория, г. Караганда, ул. Карбышева 5/6

**Регистрационный номер образцов:** 590/24

**Количество образцов:** 12

**Перечень испытательного оборудования:**

-весы электронные CAS SW-10-сертиф о поверке №BL-02-24-5120080;

-линейка измерительная металлическая-сертиф каллибровки.-№6-01-2404313;

-пресс гидравлический ПГМ-1000МГ4- сертиф каллибровки.-№6-01-240049,

-камера тепла и холода КТХ-12 сертификат об аттестации № BL-1-10-2400527

-шкаф сушильный ШСП 0,25-100. сертификат об аттестации № BL-1-10-2400526

-измеритель теплопроводности ИТП-МГ4-первичная заводская поверка от 02.10.2023 г.

**Обозначение НД на продукцию:** ГОСТ 26633-2015

**Вид испытаний:** контрольные испытания

**Условия проведения испытаний:** температура +23 °C, относительная влажность 55%

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Наименование показателей, единицы измерений	Норма по НД	Фактически полученный результат	НД на метод испытаний	Примечание
1	2	3	4	5
Прочности при сжатии, МПа	B30(38,59)	Rcp=38,6	ГОСТ 10180-2012	
Морозостойкость, (третий ускоренный метод)	F150 F <sub>2</sub> 10/150 X'' <sub>min</sub> ≥0,9 X' <sub>min</sub>	Нижняя граница доверительного интервала прочности контрольных образцов (с учетом коэффициента 0,9) X' <sub>min</sub> =34,4 -основных образцов после 10/150 циклов X'' <sub>min</sub> =36,7	ГОСТ 10060-2012	Соотношение соблюдено: 36,7≥34,4
Теплопроводность мВт/м°С	1,74	1,74	ГОСТ 7076-99	
Паронепроницаемость мг/м <sup>2</sup> *ч*Па	0,03	0,03	ГОСТ 25898-2012	
Водопоглощение, Wm%	4-8	6	ГОСТ 12730.3-2020	

Испытания провел: Инженер  
(должность)

Заведующий лабораторией  
(должность)



Ломакина Е.А.  
(ФИО)

Ломакина Е.А.  
(ФИО)

Протокол распространяется только на образцы, подвергнутые испытаниям.  
Частичная распечатка и копирование протокола без разрешения ИЛ ТОО «ТКБЗнС» запрещен

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### **Содержание**

1 Общие данные и сбор нагрузок	115
2 Мозаика назначенных жесткостей	124
2.1 Жесткости	125
3 Мозаика нагрузок	131
4 Перемещение панелей	132
5 Мозаика усилий	133
5.1 РСН макс	133
5.2 РСН мин	138
6 Результаты армирования	141
7 Выводы и рекомендации	143

## 1 Общие данные и сбор нагрузок

Для расчета были выбраны 2 типа панелей:

1. Навесные для промышленных зданий с размерами 5990x1195мм
2. Панели стеновые наружные для жилых зданий с размерами 2750x2880мм.

Ниже в таблице 1 представлен сбор нагрузок на панели.

Расчетная схема была построена и рассчитана в ПК Лира-САПР 2024.

Нормативные документы, использованные для расчёта:

- СП РК EN 1990:2002+A1:2005/2011 Основы проектирования несущих конструкций;
- СП РК EN 1991-1-1:2002/2011 Еврокод 1. Воздействия на несущие конструкции. Часть 1-1. Общие воздействия. Собственный вес, постоянные и временные нагрузки на здания;
- НП к СП РК EN 1991-1-1:2002/2011 Воздействия на несущие конструкции. Часть 1-1. Собственный вес, постоянные и временные нагрузки на здания;
- НТП РК 01-01-3.1 (4.1)-2017 Нагрузки и воздействия на здания. Часть 1-3. Снеговые нагрузки. Часть 1-4. Ветровые воздействия;
- СП РК EN 1992-1-1:2004/2011 Еврокод 2: Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1: Общие правила и правила для зданий.

Таблица 1 – Сбор нагрузок

№	Наименование	P, кг/м <sup>3</sup>	h, м	Нормативное значение, кг/м <sup>2</sup>	Коэффициент безопасности	Расчетное значение, кг/м <sup>2</sup>

1	2	3	4	5	6	7
Постоянные						
1	Наружный слой - тяжелый бетон, C25/30	2500	0,0 8	200	1,35	270
2	Средний теплоизоляционный слой - высокопоризованны й полистиролбетон, B1,5 - D450	450	0,3 1	139,5	1,35	188,33
3	Внутренний слой - тяжелый бетон, C25/30	2500	0,0 7	175	1,35	236,25
Временные						
4	Ветер II район			39	1,5	58,5

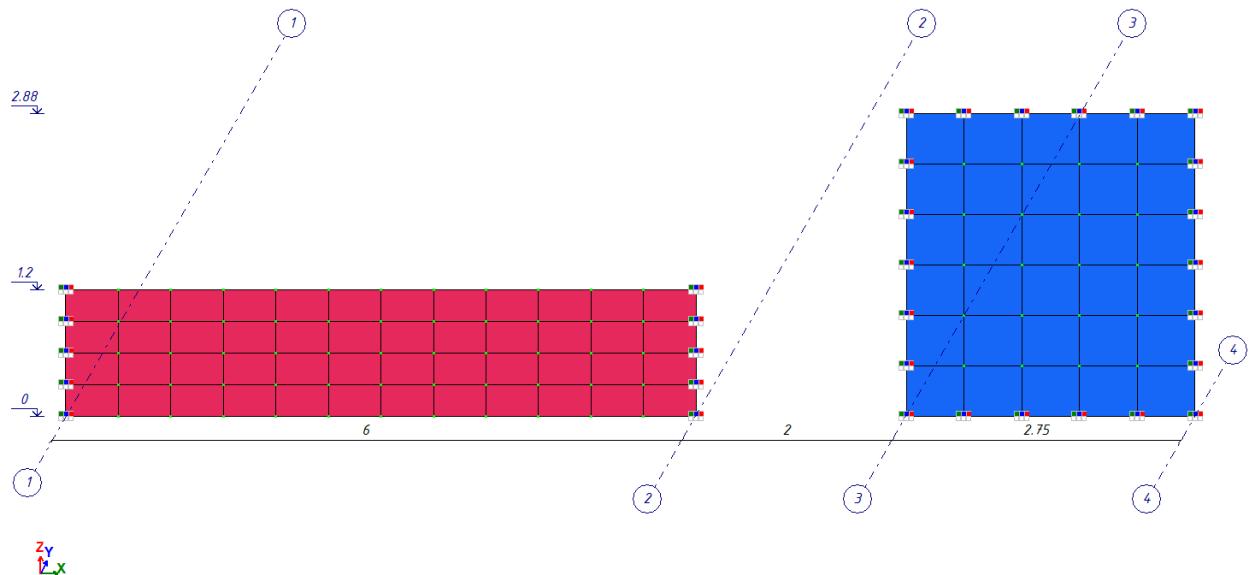


Рис. 1.1 Общий вид расчетной схемы

## В В Е Д Е Н И Е

Расчет выполнен программным комплексом "ЛИРА-САПР".

В основу расчета положен метод конечных элементов в перемещениях. В качестве основных неизвестных приняты следующие перемещения узлов:

- Х линейное по оси X
- Y линейное по оси Y
- Z линейное по оси Z
- UX угловое вокруг оси X
- UY угловое вокруг оси Y
- UZ угловое вокруг оси Z

Нормы для расчета железобетонных конструкций:

СП РК EN 1992-1-1:2004/2011

Нормы для расчета стальных конструкций:

СП РК EN 1993-1-1:2005/2011

Нормы для расчета армокаменных конструкций и простенков:

СНиП II-22-81

Нормы для вычисления расчетных сочетаний нагрузок (РСН):

СП РК EN 1990:2002+A1:2005/2011

Нормы для расчета параметров грунта:

СП РК 5.01-102-2013

Типы используемых конечных элементов указаны в документе 1.

В этом документе, кроме номеров узлов, относящихся к соответствующему элементу, указываются также номера типов жесткостей.

В расчетную схему включены следующие типы элементов:

Тип 41. Универсальный прямоугольный КЭ оболочки.

Координаты узлов и нагрузки, приведенные в развернутых документах 4,6,7, описаны в правой декартовой системе координат.

Расчет выполнен на следующие загружения:

загружение 1 - статическое (Загружение 1 - Собственный вес)

загружение 2 - статическое (Загружение 2 - Ветер)

## ЧТЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СЧЕТА

Результаты счета разбиты на следующие разделы:

Раздел 1. Протокол работы процессора.

Раздел 2. Исходные данные.

Раздел 3. Диагностические сообщения.

Раздел 5. Перемещения узлов.

Раздел 6. Усилия (напряжения) в элементах.

Раздел 7. Реакции в узлах.

Раздел 8. Расчетные сочетания усилий (РСУ).

Раздел 9. Периоды колебаний.

Раздел 10. Формы колебаний.

Раздел 17. Распределение масс.

Раздел 11. Узловые инерционные силы от динамических воздействий.

В разделе 5 в табличной форме выпечатываются перемещения узлов рассчитываемой задачи. Размерность перемещений указана в шапке таблицы.

В первой графе находится номер загружения и индексация перемещений.

В остальных графах - номера узлов в порядке возрастания и величины перемещений, им соответствующие.

Линейные перемещения считаются положительными, если они направлены вдоль осей координат. Положительные угловые перемещения соответствуют вращению против часовой стрелки, если смотреть с конца соответствующей оси.

Перемещения имеют следующую индексацию:

X линейное по оси X

Y линейное по оси Y

Z линейное по оси Z

UX угловое вокруг оси X

UY угловое вокруг оси Y

UZ угловое вокруг оси Z

В разделе 6 в табличной форме выпечатываются усилия в элементах рассчитываемой задачи. Размерность усилий указана в шапке таблицы.

В первой графе указывается тип КЭ из библиотеки конечных элементов, номер загружения и индексация усилий.

В последующих графах указываются:

в первой строке шапки - номер элемента и номер сечения в этом элементе, для которого печатаются усилия;  
во второй строке - номера первых двух узлов.

В разделе 8 в табличной форме выдаются расчетные сочетания усилий (РСУ) в элементах для каждого сечения и дополнительная информация о сочетаниях усилий.

Вычисляются следующие группы РСУ:

Группа А1 – включает только те загружения, которые обладают длительностью действия; в эту группу включаются постоянные, длительные и кратковременные загружения; виды загружений – 0, 1, 2.

Группа В1 – включает все заданные загружения независимо от длительности действия кроме сейсмического и прочих особых.

Группа С1 – включает группу В1 плюс сейсмическое загружение.

Группа D1 – включает группу В1 плюс особое (не сейсмическое) загружение.

Группа А2 – включает только постоянные и длительные загружения; виды загружений – 0, 1.

Группа В2 – включает постоянные, длительные и кратковременные загружения (кроме мгновенного); виды загружений – 0, 1, 2.

Группа С2 – включает все заданные загружения независимо от длительности действия кроме сейсмического и прочих особых.

Группа D2 – включает группу С2 плюс сейсмическое загружение.

Вычисленные сочетания образуют 4 таблицы результатов:

Таблица 1 – РСУ расчетные, вычисленные по расчетным значениям усилий.

Таблица 2 – РСУ расчетные длительные, полученные при помощи умножения расчетных усилий на соответствующие коэффициенты длительности.

Таблица 3 – РСУ нормативные, полученные при помощи деления расчетных

усилий на

соответствующие коэффициенты надежности по нагрузке.

Таблица 4 – РСУ нормативные длительные, полученные при помощи умножения

нормативных усилий на соответствующие коэффициенты длительности.

Заголовки таблиц РСУ содержат следующие индексы:

ЭЛМ – номер элемента в схеме;

НС – номер расчетного сечения в элементе (все КЭ кроме стержня имеют одно расчетное сечение);

КРТ – номер критерия, по которому составлено данное сочетание усилий, в соответствии с типом КЭ;

СТ – номер столбца коэффициентов сочетаний из таблицы исходных данных РСУ;

КС – признак наличия в сочетаниях кранового (К) и/или сейсмического (С) загружения;

Г – индекс внутренней группы – А1, В1, С1, Д1, А2, В2, С2, Д2.

Далее следуют идентификаторы усилий/напряжений в соответствии с типом КЭ,

а затем список из номеров загружений, которые составили текущее сочетание.

Знакопеременное загружение, вошедшее в РСУ с противоположным знаком помечается знаком '-'.

Таблицы результатов по унифицированным РСУ формируются для каждого

варианта конструирования с указанием номера варианта.

Заголовки таблиц унифицированных РСУ содержат следующие индексы:

ПЭ – признак принадлежности элемента;

ЭЛМ – порядковый номер элемента в схеме или в суперэлементе;

НС – номер расчетного сечения в элементе (все КЭ кроме стержня имеют одно расчетное сечение);

КРТ – номер критерия в соответствии с типом КЭ;

СТ – номер столбца коэффициентов сочетаний из таблицы исходных данных РСУ;

КС – признак наличия в сочетаниях кранового (К) и/или сейсмического (С)

загружения;  
Г – индекс внутренней группы – A1, B1, C1, D1, A2, B2, C2, D2.

В разделе 9 для каждого динамического (или после модального анализа) загружения распечатываются значения периодов собственных колебаний.

В разделе 10 для каждого динамического (или модального) загружения распечатываются значения относительных перемещений узлов, соответствующих формам собственных колебаний.

В разделе 11 для каждого динамического загружения распечатываются значения составляющих динамической нагрузки после разложения ее по формам собственных колебаний.

В разделе 17 для каждого динамического загружения распечатываются значения масс, собранных в узлы. Размерность масс указана в шапке таблицы.

В первой графе находится номер загружения и индексация масс. В остальных графах - номера узлов в порядке возрастания и соответствующие величины.

## ИНДЕКСАЦИЯ И ПРАВИЛА ЗНАКОВ УСИЛИЙ В КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Тип 41. Универсальный прямоугольный КЭ оболочки.  
Конечный элемент воспринимает следующие виды усилий, напряжений и реакций:

NX нормальное напряжение вдоль оси X1;  
положительный знак соответствует растяжению.  
NY нормальное напряжение вдоль оси Y1;  
положительный знак соответствует растяжению.  
NZ нормальное напряжение вдоль оси Z1 (для случая плоской деформации); положительный знак соответствует растяжению.  
TXY сдвигающее напряжение,

параллельное оси X1 и лежащее в плоскости, параллельной X10Z1; за положительное принято направление, совпадающее с направлением оси X1, если NY совпадает по направлению с осью Y1.

MX момент, действующий

на сечение, ортогональное оси X1; положительный знак соответствует растяжению нижнего волокна ( относительно оси Z1 ).

MY момент, действующий

на сечение, ортогональное оси Y1; положительный знак соответствует растяжению нижнего волокна ( относительно оси Z1 ).

MXY крутящий момент;

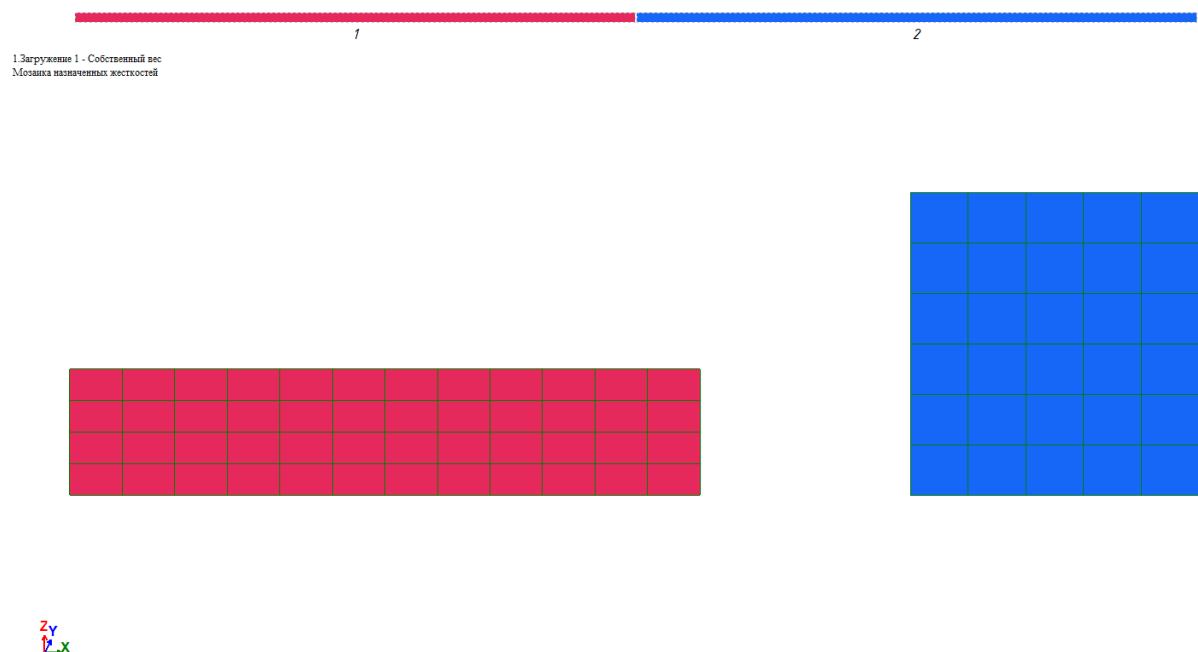
положительный знак соответствует кривизне диагонали 1-4, направленной выпуклостью вниз ( относительно оси Z1 ).

QX перерезывающая сила в сечении, ортогональном оси X1; положительный знак соответствует совпадению направления силы с направлением оси Z1 на той части элемента, в которой отсутствует узел 1.

QY перерезывающая сила в сечении, ортогональном оси Y1; положительный знак соответствует совпадению направления силы с направлением оси Z1 на той части элемента, в которой отсутствует узел 1.

RZ реактивный отпор грунта (при расчете оболочек на упругом основании); положительное усилие действует по направлению оси Z1 (грунт растянут).

## 2 Мозаика назначенных жесткостей



*Рис. 2.1 Мозаика назначенных жесткостей*

## 2.1 Жесткости

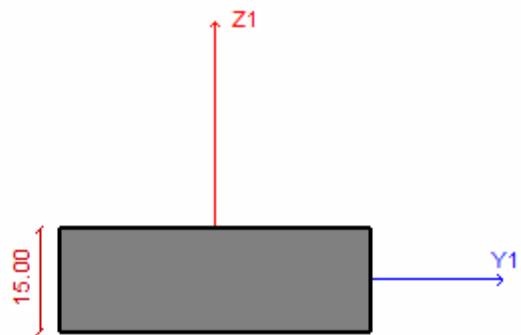


Рис. 2.2 Жесткость 1 «Пластина Н 15»

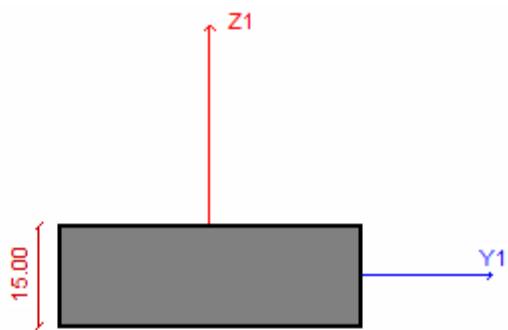


Рис. 2.3 Жесткость 2 «Пластина Н 15»

## Таблица 2.1 Жесткостные характеристики

Цвет	Номер	Имя	Комментарий	$E(E1), \text{т/м}^2$	$RO, \text{т/м}^3$	$V12(V)$	$E2, \text{т/м}^2$	$V21$	$G12(G), \text{т/м}^2$	$H, \text{см}$
------	-------	-----	-------------	-----------------------	--------------------	----------	--------------------	-------	------------------------	----------------

**Таблица 2.1 Жесткостные характеристики. Пластины**

Цвeт	Номеp	Имя	Комментариий	E(E1), т/м2	RO, т/м3	V12(V)	E2, т/м2	V21	G12(G), т/м2	H, см
	1	Пластина Н 15	Навесные	3100000.000	2.500	0.200	0.000	0.000	0.000	15
	2	Пластина Н 15	Стеновые	3100000.000	2.500	0.200	0.000	0.000	0.000	15

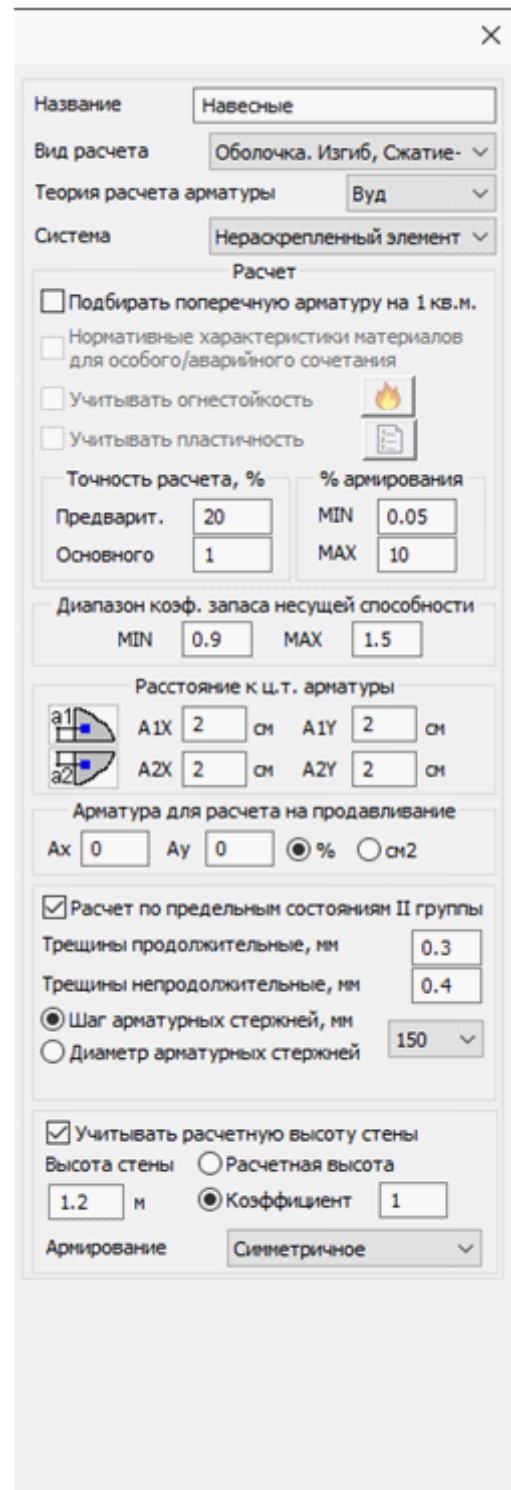


Рис. 2.4 Параметры конструкции навесных панелей

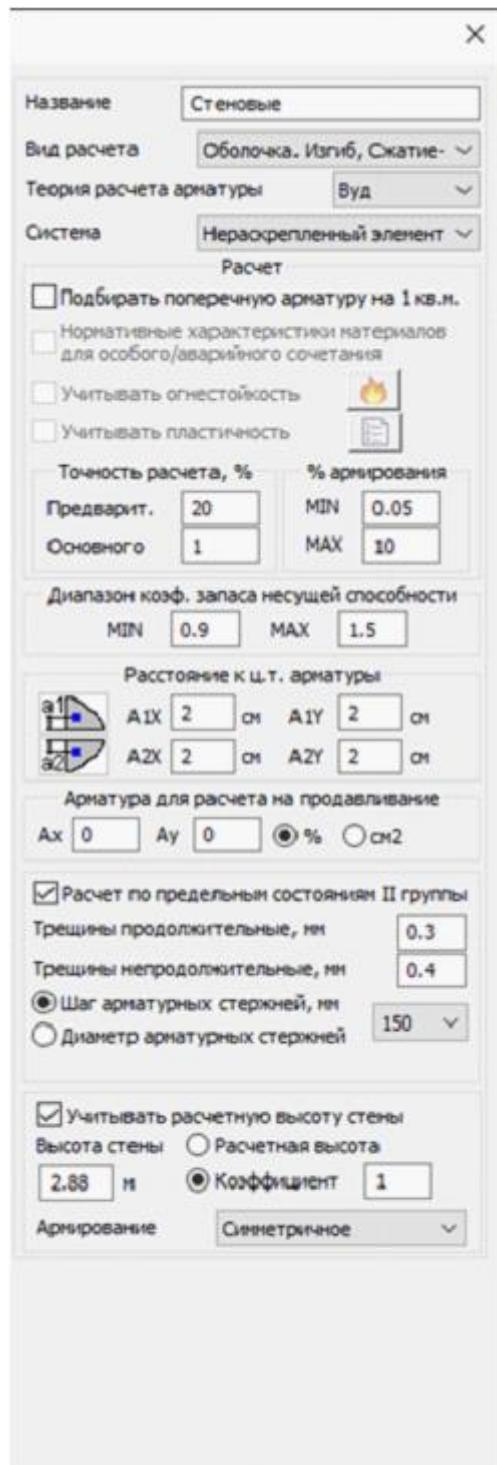


Рис. 2.5 Параметры конструкции стеновых панелей

СП РК EN 1992-1-1:2004/2011

Название |

Класс бетона C25/30

Вид бетона тяжелый

Марка легкого бетона по средней плотности 1000

Диаграмма билинейная зависимость напряжения

Относительная влажность воздуха, % 80

Коэффициенты

$\alpha_{ct}$	1	$\eta$	1	$k_1$	1	$k_2$	0.45
---------------	---	--------	---	-------	---	-------	------

Коэффициент ползучести  $\phi_{(\infty, t_n)}$  2

Основ	Авар	Сейсм	II ПС	
$\alpha_{cc}$	0.85	0.85	1	1
$\gamma_c$	1.5	1.2	1.3	1

Случайные эксцентрикитеты (стержень)

По высоте сечения EY 0 см

По ширине сечения EZ 0 см

Учитывать в расчете точный размер сечения

Учитывать эффекты 1-го рода  
(Несовершенства геометрии конструкции)

Эффекты 2-го рода Жесткость

Вычислять коэффициент  $\alpha_{cw}$

	C25/30 (МПа)
E_cm	31000.00
f_ck	25.00
f_ck_cube	30.00
f_cm	33.00
f_ctm	2.60
f_ctk_005	1.80
f_ctk_095	3.30
Eps_c1 (*1000)	2.10
-	0.50

Рис. 2.6 Параметры бетона панелей

СП РК ЕН 1992-1-1:2004/2011

Название:

Арматура		
Продольная Поперечная		
Класс	A	A
Вид	Стержни	Стержни
$f_yk$ МПа	500	240
$k=f_{rk}/f_{yk}$	1.05	1.05
$\varepsilon_{uk}$ , %	2.5	2.5
$\gamma_s$ Основ	1.15	1.15
$\gamma_s$ Авар	1	1
$\gamma_s$ Сейсм	1	1
$\gamma_s$ II ПС	1	1

Вязаный каркас  32

Коэффициенты  $k_3$  0.8  $k_4$  1

Расчет поперечной арматуры

$\theta^\circ$	Основ	Авар	Сейсм
Рас	45	Уго	45
Уго	45	Уго	45

$\cot\theta$   Ограничить длиной КоЭ

МПа	Продольная	Поперечная
$f_yk$	500.00	240.00
Класс	A	A
D (мм)	6-40	6-40
$f_yd$	434.78	208.70
$f_{tk}$	525.00	252.00
$f_{ywd}$	347.83	166.96
$E_s$	200000.00	200000.00
$k=f_{tk}/f_{vk}$	1.05	1.05

Рис. 2.7 Параметры арматуры панелей

### 3 Мозаика нагрузок

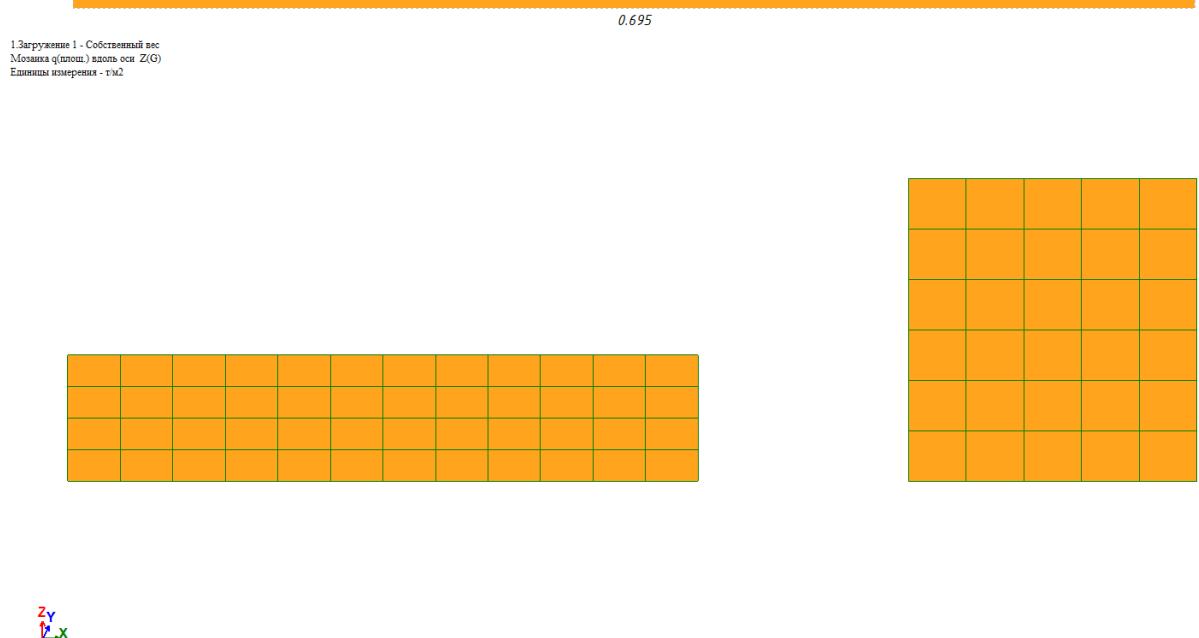


Рис. 3.1 Загружение 1 - Собственный вес

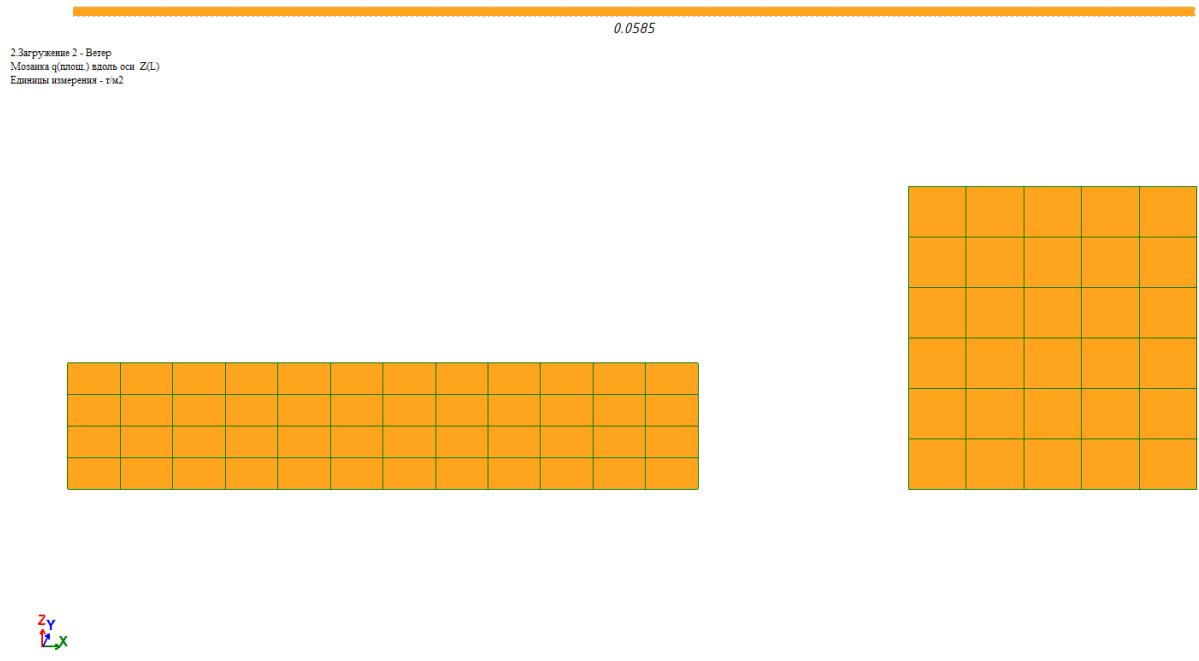


Рис. 3.2 Загружение 2 - Ветер

## 4 Перемещение панелей

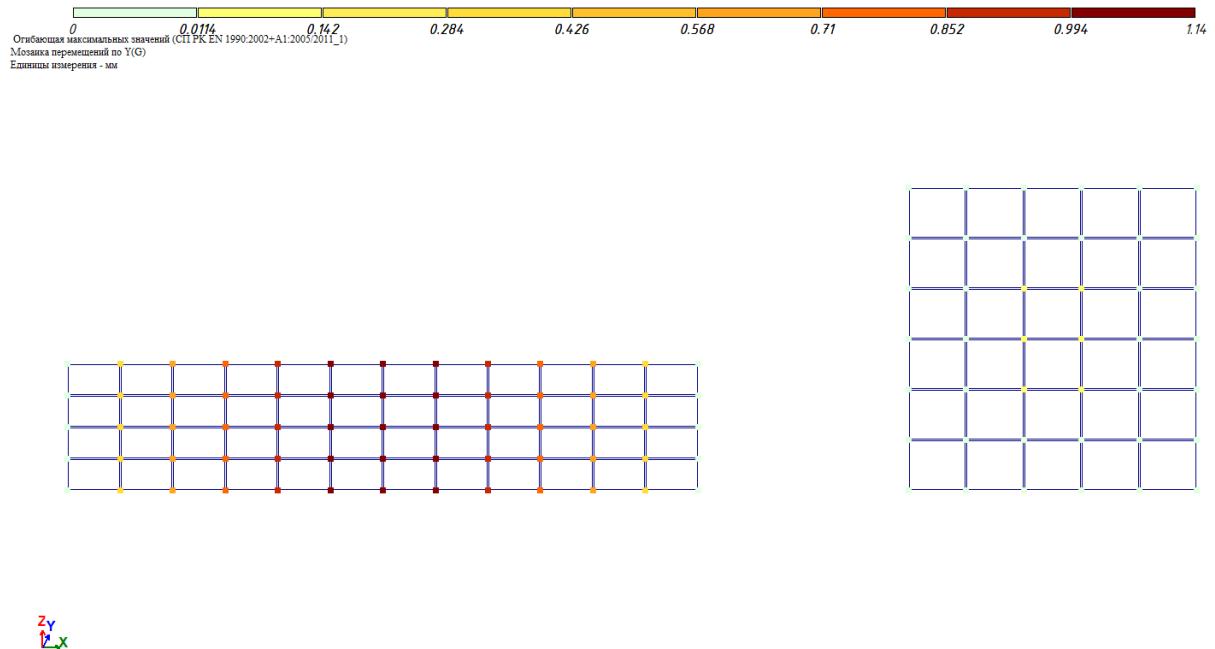


Рис. 4.1 Мозаика перемещений по Y(G)

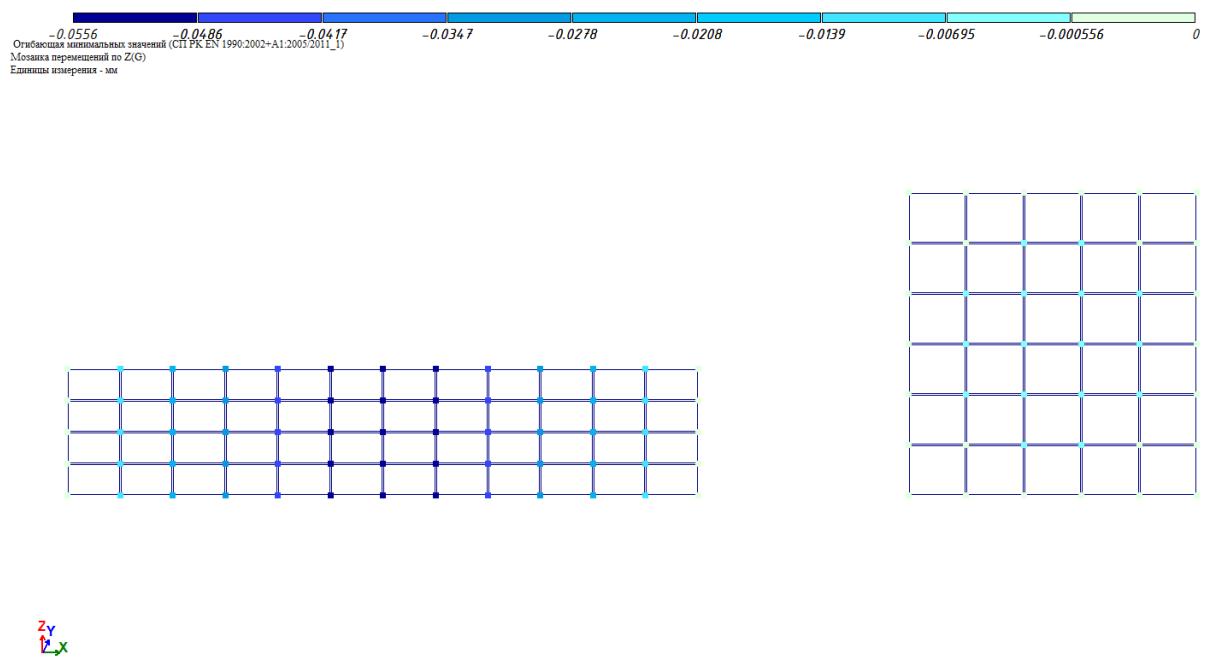


Рис. 4.2 Мозаика перемещений по Z(G)

## 5 Мозаика усилий

### 5.1 РСН макс

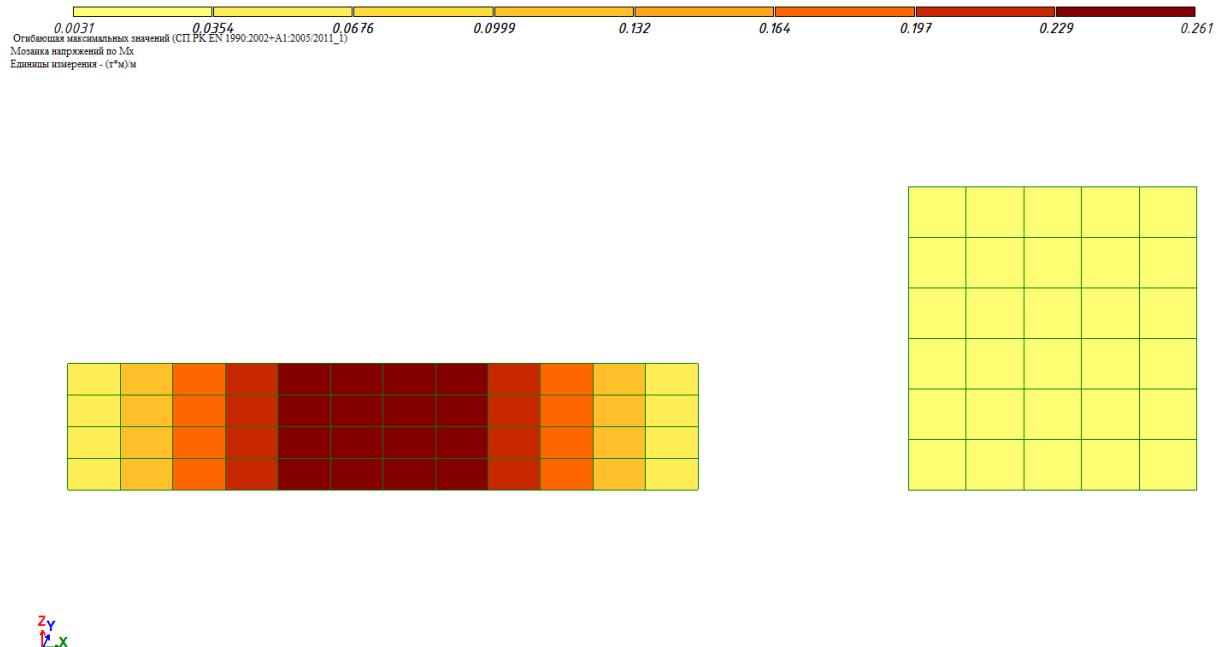


Рис. 5.1 Мозаика напряжений по Mx

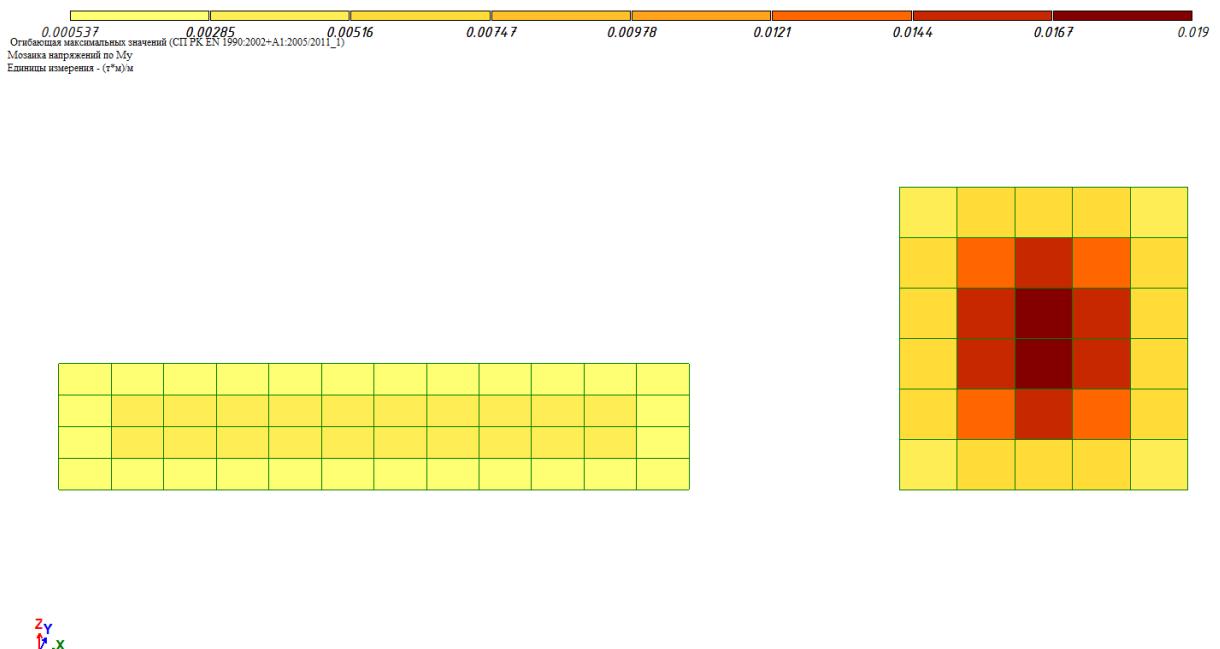


Рис. 5.2 Мозаика напряжений по  $M_y$



Рис. 5.3 Мозаика напряжений по  $M_{xy}$

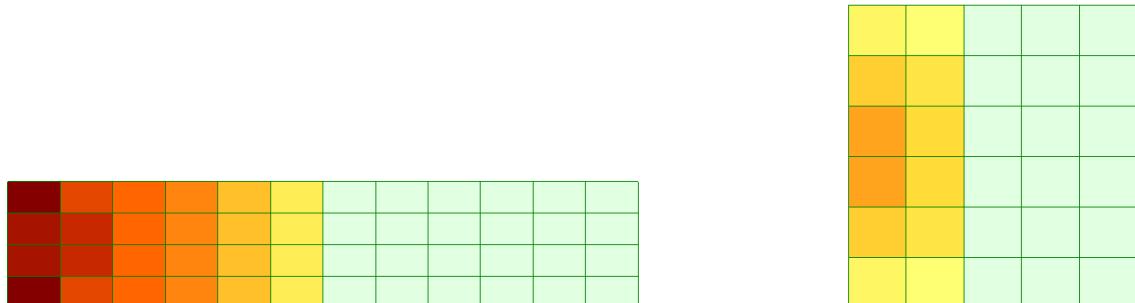
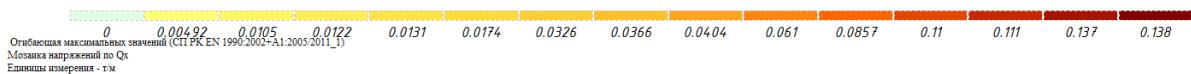


Рис. 5.4 Мозаика напряжений по Qx

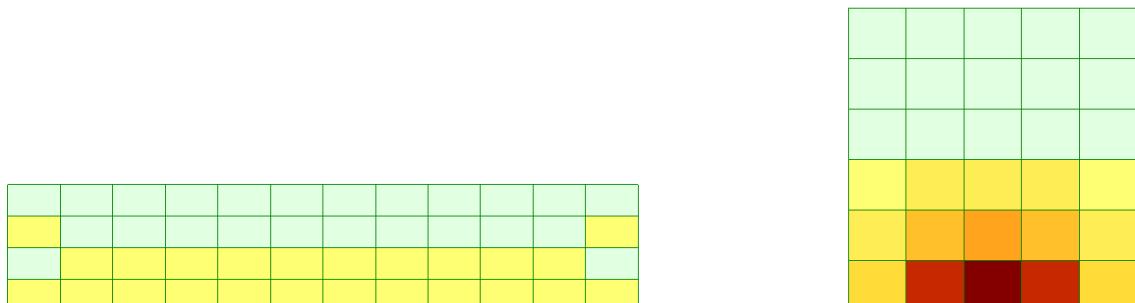
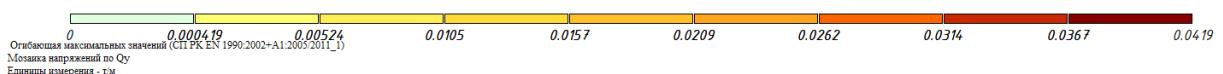
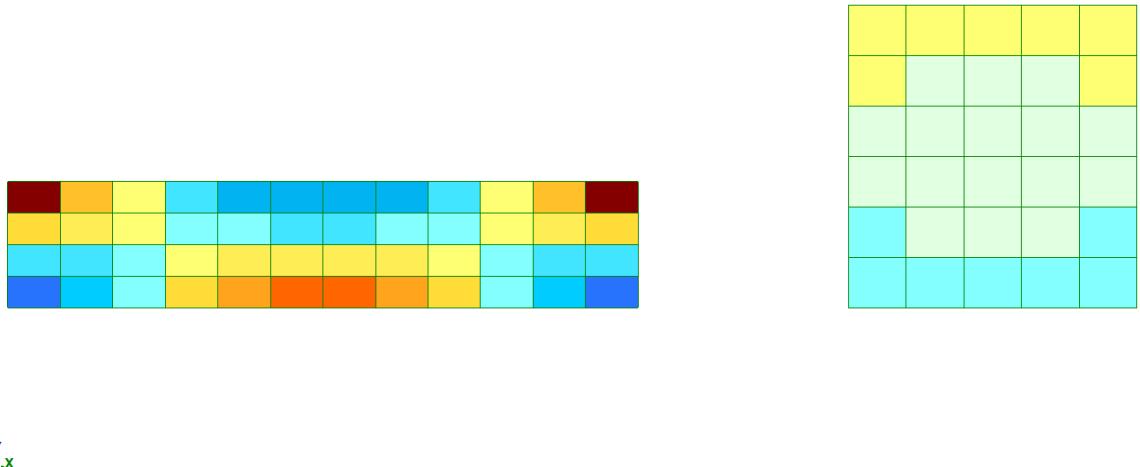
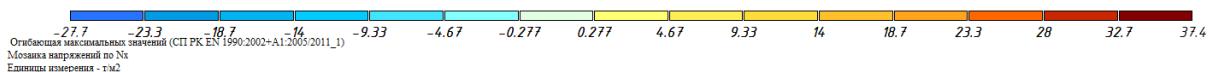
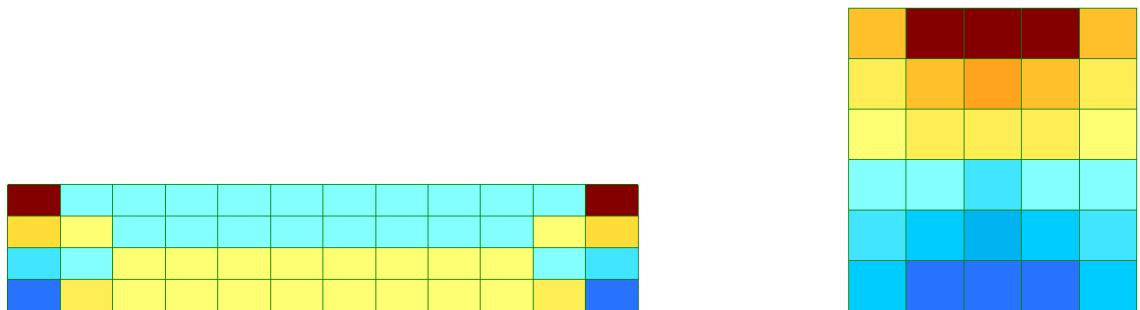
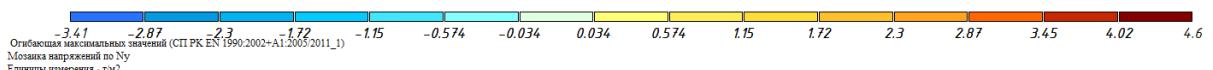


Рис. 5.5 Мозаика напряжений по Qy



*z  
y  
x*

Рис. 5.6 Мозаика напряжений по Nx



*z  
y  
x*

Рис. 5.7 Мозаика напряжений по Ny

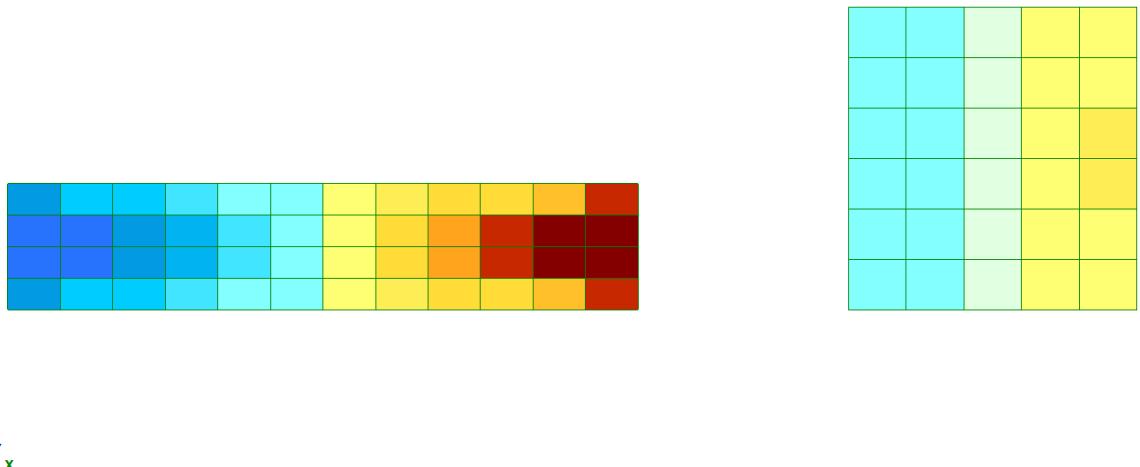
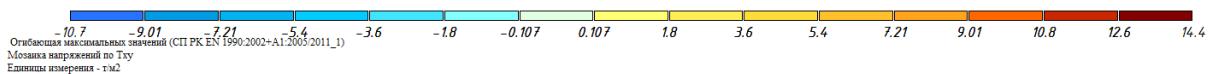


Рис. 5.8 Мозаика напряжений по Тху

## 5.2 РСН мин

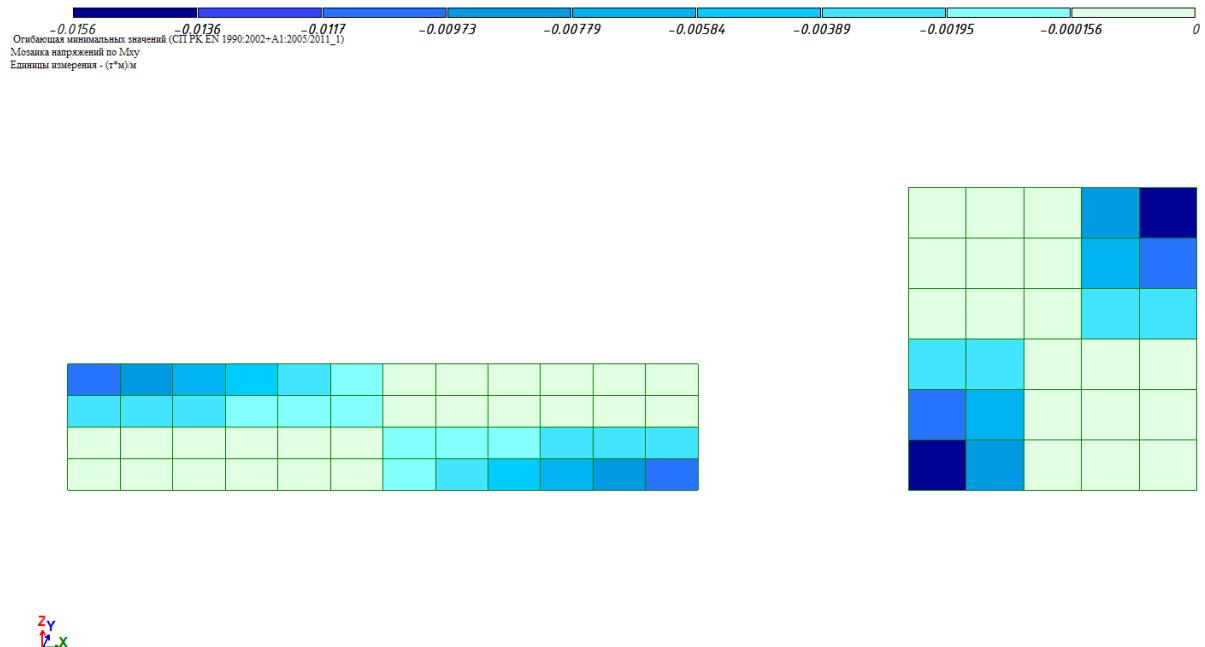


Рис. 5.9 Мозаика напряжений по  $M_{xy}$

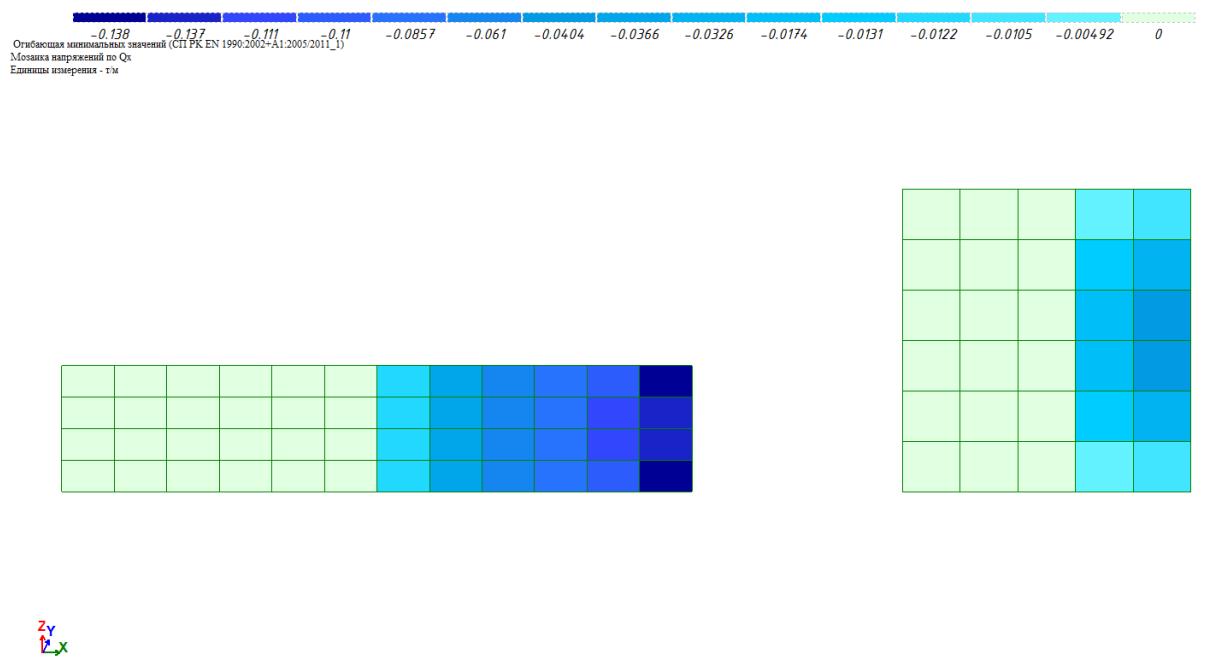


Рис. 5.10 Мозаика напряжений по  $Q_x$



Рис. 5.11 Мозаика напряжений по  $Q_y$

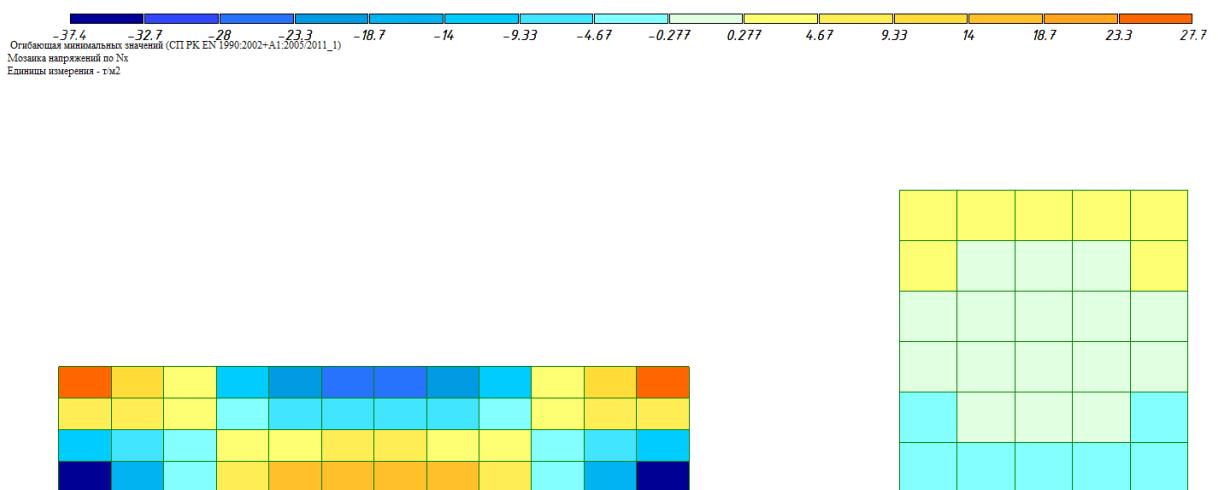


Рис. 5.12 Мозаика напряжений по  $N_x$

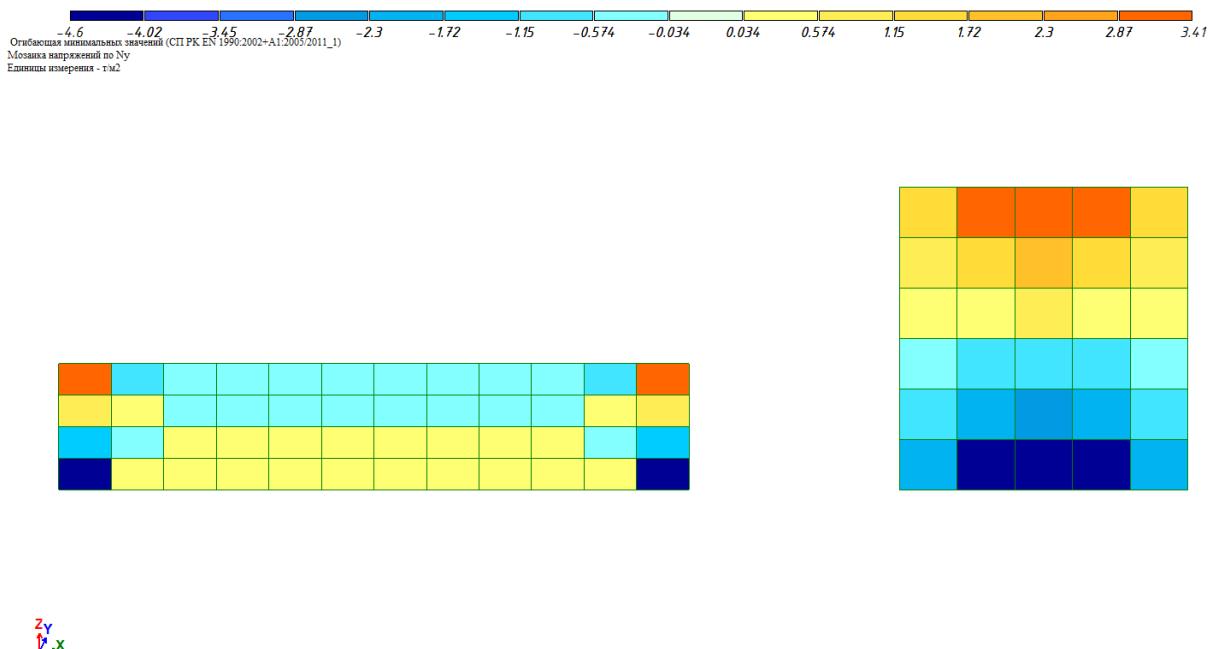


Рис. 5.13 Мозаика напряжений по Ny

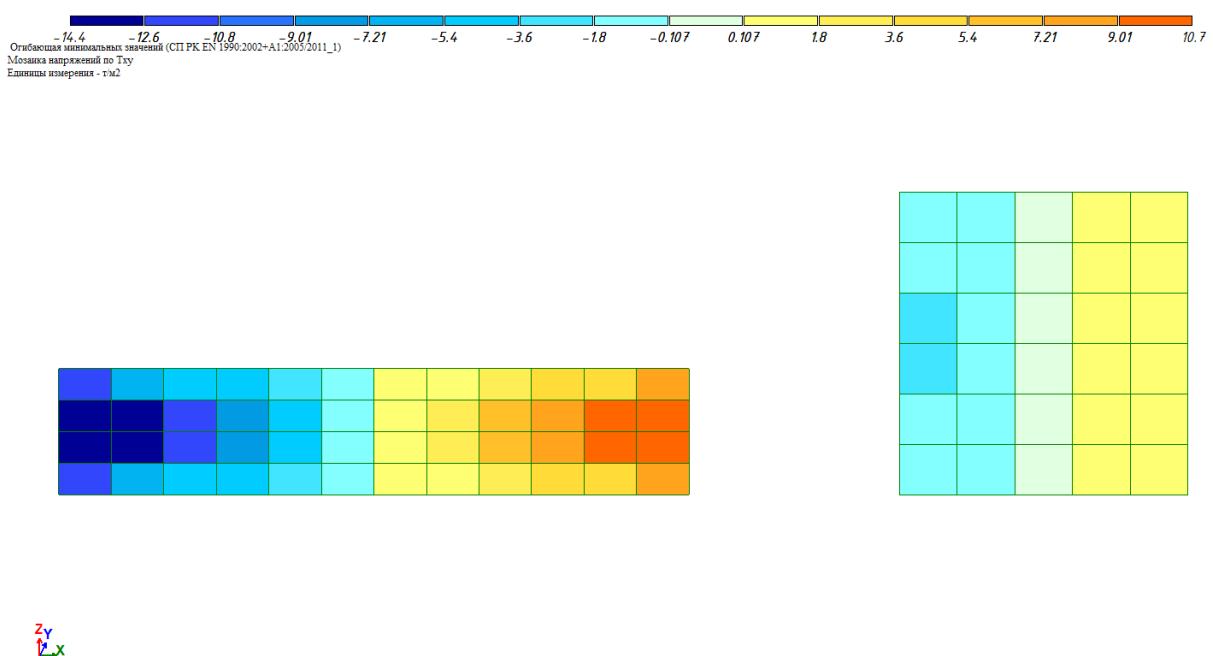
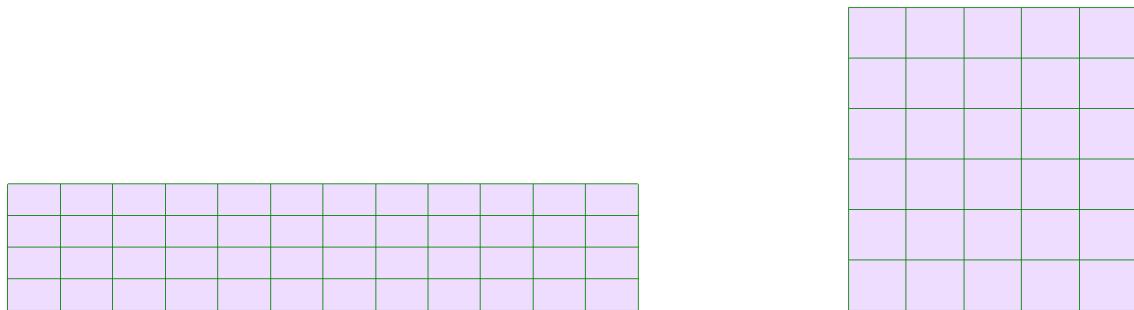
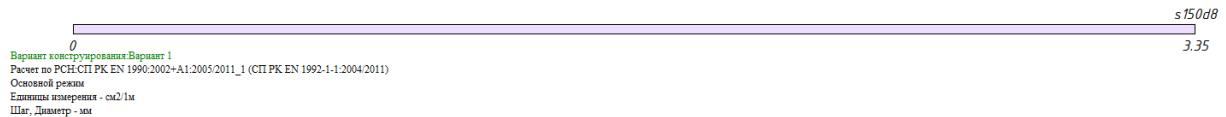


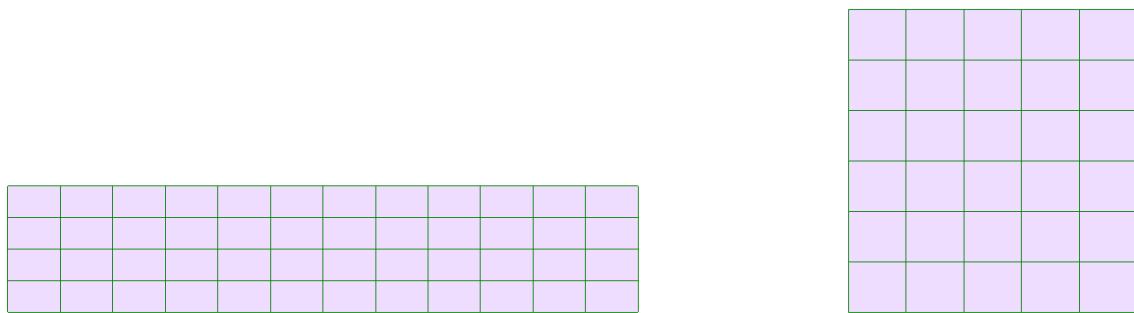
Рис. 5.14 Мозаика напряжений по Txу

## 6 Результаты армирования



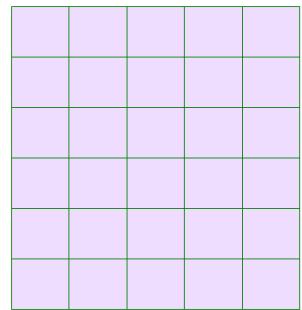
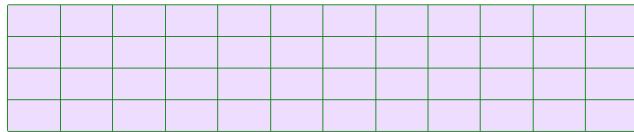
Режим основной. Площадь полной арматуры на 1м по оси X у верхней грани; максимум в элементе 38

*Рис. 6.1 Режим основной. Площадь полной арматуры на 1м по оси X у верхней грани*



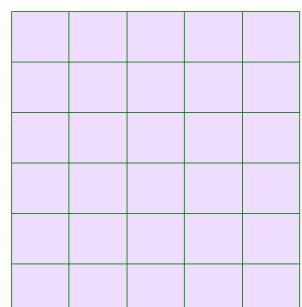
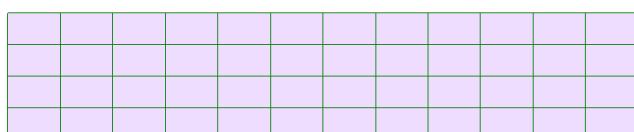
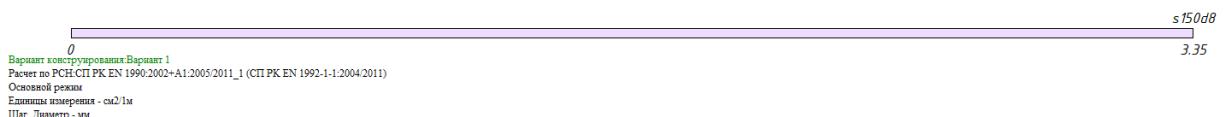
Режим основной. Площадь полной арматуры на 1м по оси Y у верхней грани; максимум в элементе 1

*Рис. 6.2 Режим основной. Площадь полной арматуры на 1м по оси Y у верхней грани*



Режим основной. Площадь полной арматуры на 1м по оси X у нижней грани (балки-стенки - посередине); максимум в элементе 51

**Рис. 6.3 Режим основной. Площадь полной арматуры на 1м по оси X у нижней грани (балки-стенки - посередине)**



Режим основной. Площадь полной арматуры на 1м по оси Y у нижней грани (балки-стенки - посередине); максимум в элементе 1

**Рис. 6.4 Режим основной. Площадь полной арматуры на 1м по оси Y у нижней грани (балки-стенки - посередине)**

## 7 Выводы и рекомендации

1. Максимальный прогиб панелей от действия ветровой нагрузки составляет 1,4мм (рисунок 4.1), что не превышает предельных значений  $6000/200=30$ мм. Прочность по 2-му предельному состоянию обеспечена.
2. В разделе 5 представлены мозаики усилий по расчетным сочетаниям нагружений, для дополнительного анализа.
3. В разделе 6 представлены результаты подбора армирования. **Согласно анализу результатов, для обеспечения прочности панелей, требуемое армирование слоёв из тяжелого бетона сеткой диаметром 8мм класса А500 с шагом 150мм.**

# ПРИЛОЖЕНИЕ

Форма ДП 15-05



Испытательный центр  
Товарищество с ограниченной ответственностью «ТЕКС»  
Юридический адрес: Республика Казахстан, 050050, город Алматы, улица Маметовой, 67/1 п.п.1  
Фактический адрес: Республика Казахстан, 050017, город Алматы, микрорайон Кемел,  
ул. Серпин, 2В  
Тел/факс 8 (727) 313-23-30, E-mail: ops@tekscert.kz  
Аттестат акредитации № KZ.T.02.0650 от 08 апреля 2020 г.

## ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

№ СМ/300625/2 от «30» июня 2025 г.

1	Место проведения испытания (адрес)	г. Алматы, микр-н Кемел, ул. Серпин, 2В
2	Объект испытаний (тип, модификация, модель, марка, артикул)	Сборные железобетонные и бетонные изделия: Блоки из полистиролбетона, класса В1,5
3	Дата поступления образцов	26 июня 2025 г.
4	Акт отбора и идентификации образцов/ Заявка на проведение испытаний по заявляемым показателям	от 26 июня 2025 г.
5	Количество поступивших образцов	14 шт.
6	Наименование, адрес и контактные данные заказчика испытаний	ЧЛ Самойлова Татьяна Юрьевна, РК, Карагандинская область, г. Сарань
7	Наименование изготовителя, страна	ЧЛ Самойлова Татьяна Юрьевна, РК
8	Дата изготовления продукции	2025 г.
9	Срок годности/службы	—
10	Дата начала испытаний	26 июня 2025 г.
11	Дата окончания испытаний	30 июня 2025 г.
12	Обозначение ИД, на соответствие требованиям которых проводятся испытания	ТР утв. ир. МИИР РК № 435 «О безопасности зданий и сооружений, строительных материалов и изделий» от 09.06.2023 г.; ГОСТ 30108-94 «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов»; ТР утв. ПМЧС РК № 405 «Общие требования к пожарной безопасности» от 17.08.2021 г.
13	Условия проведения испытания	температура 21-23 °С, влажность 58-64 %

стр. 1 из 2

ТОО «ТЕКС»

Д

## Результаты испытаний:

№ п/п	Наименование показателей, единицы измерения	НД на методы испытаний, пункты НД	НД, пункты НД, нормы по НД	Фактические результаты
1	2	3	4	5
<b>Лаборатория испытаний строительных материалов и мебели (ЛИСМИМ)</b>				
1	<b>Пожарная безопасность</b>  Горючесть: - температура дымовых газов, °C  - степень повреждения по длине, %  - степень повреждения по массе, %  - продолжительность самостоятельного горения, с	ГОСТ 30244-94 пп.7.5	<u>ТР № 435 утв. пр. МИИР РК от 09.06.2023 г.</u> <u>ТР № 405 Прил. 1 Глава 2 п.18</u> Г1 (слабогорючие) – не более 135 Г2 (умеренногорючие) – не более 235 Г3 (нормальногорючие) – не более 450 Г4 (сильногорючие) – более 450  Г1 (слабогорючие) – не более 65 Г2 (умеренногорючие) – не более 85 Г3 (нормальногорючие) – более 85 Г4 (сильногорючие) – более 85  Г1 (слабогорючие) – не более 20 Г2 (умеренногорючие) – не более 50 Г3 (нормальногорючие) – не более 50 Г4 (сильногорючие) – более 50  Г1 (слабогорючие) – 0 Г2 (умеренногорючие) – не более 30 Г3 (нормальногорючие) – не более 300 Г4 (сильногорючие) – более 300	75  25,09  2,68  0
2	Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, Бк/кг	ГОСТ 30108-94 пп.4.2	<u>ГОСТ 30108-94 приложение А</u>  не более 370	62,3

**Мнение и интерпретация:** На основании проведённых испытаний установлено, что полистирол-бетонные блоки класса B1,5 относятся к группе горючести Г1, характеризующейся как слабогорючие материалы.

УТВЕРДИЛ начальник ИП

начальник ИЦ

Жаксылыкова Л.У.

ФИО

ПРОВЕРИЛ

заведующий ЛИСМиМ

Анарбеков К.К.

ФИС

## ИСПОЛНИТЕЛЬ

### специалист ЛХАИ

Иманбекова Н.С.

940

### Конец протокола испытаний

Перепечатка или размножение протокола без письменного разрешения ИЦ ТОО «ТЕКС» не допускается.  
Протокол распространяется только на образец (ы), подвергнутый (е) испытаниям.

стр. 2 из 2

## TOO “TEKC”

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Утверждаю

Директор

ТОО «ККК Бетон»

Кику А.И.

2025 г.



### АКТ

#### внедрения (использования) результатов научно-исследовательской работы «Разработка технологии производства высокопоризованного полистиролбетона для теплоэффективных наружных стеновых панелей»

Настоящий акт составлен о том, что в период с 13.01.25 по 20.01.225 г., в г. Сарань на заводе по производству ЖБИ с элементами крупно-панельного домостроения ТОО «ККК Бетон», на участке по изготовлению стеновых панелей по технологии разработанной докторантом Самойловой Т.Ю. была выпущена опытная партия трехслойных стеновых панелей с внутренним теплоизолирующим слоем из высокопоризованного полистиролбетона средней плотностью В1,5.

Мы, ниже подписавшиеся -

от НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»:

- научный консультант: к.т.н., доцент кафедры СМиТ – Рахимова Г.М.,
- докторант кафедры СМиТ – Самойлова Т.Ю.,

От ТОО «ККК Бетон»:

- директор Кику А.И.,
- начальник службы качества Мирзахметов Д.А.,

составили настоящий акт о нижеследующем.

По согласованию сторон, на основании результатов научных исследований, проведенных в НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» при выполнении диссертационной работы на тему «Разработка технологии производства высокопоризованного полистиролбетона для теплоэффективных наружных стеновых панелей» были проведены опытно-промышленные испытания стеновых панелей предложенного состава.

Для изготовления стеновых панелей применялись следующие компоненты:

1. Портландцемент ЦЕМ I 42,5Б, с удельной эффективной активностью естественных радионуклидов для сырьевых материалов:  $A_{\text{эфф}}(\text{цемент})=57$  Бк/кг, тонкостью помола – 5,6% с АО "Central Asia Cement";
2. Доменный шлак в качестве композиционно вяжущего к цементу, предварительно перемолотый до тонкости помола цемента;
3. Для тяжелого бетона применяется щебень фракции 5-20 с Керегетасского карьера и песок с  $M_k=3,3$  с Шаханского карьера;
4. Вода затворения;
5. Воздухововлекающая добавка Master Air 200 и суперпластификатор с водоредуцирующими свойствами MasterRheobuild 270.

Изготовление опытной партии стеновых панелей осуществлялось по следующей технологии:

1. На форму с опалубкой устанавливается арматурная сетка, после чего подается смесь тяжелого бетона.
2. После укладки смесь уплотняется в течение 30 с.
3. Затем паллета отъезжает в камеру предварительного твердения до начала схватывания бетонной смеси на 10 мин, а на ее место поступает новая паллета.
4. По истечении 10 мин на только что схватившуюся смесь тяжелого бетона укладывается смесь легкого высокопоризованного полистиролбетона.
5. После укладки двух слоев бетона, паллета снова отправляется в камеру предварительного твердения для схватывания легкого бетона на 10 мин.
6. На схватившуюся смесь легкого бетона устанавливается каркас арматуры и укладывается второй слой тяжелого бетона аналогично с первым слоем.
7. Второй слой тяжелого бетона уплотняется с помощью погружного вибратора.
8. Готовая стеновая панель отправляется в камеру прогрева на 12 часов, где проходит все стадии изотермического прогрева.

Опытные образцы легкого бетона подвергались испытаниям в аккредитованной лаборатории и показали следующие значения:

Таблица 1 – Физико технические свойства высокопоризованного теплоизоляционного полистиролбетона

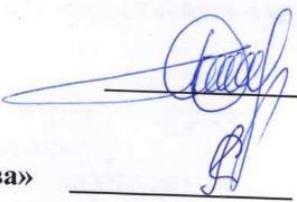
Наименование показателей, единицы измерений	Норма по НД	Фактически полученный результат*	НД на метод испытаний
1	2	3	4
Прочность при сжатии, МПа	В1,5	$R_{cp} = 1,51$	ГОСТ 10180-2012
Прочность при растяжении при изгибе, МПа	0,65	$R_{tb} = 0,65$	ГОСТ 10180-2012
Прочность на осевое растяжение, МПа	0,34	$R_t = 0,34$	ГОСТ 10180-2012
Морозостойкость цикл	150 не	F150 12	ГОСТ 31359-2007
Потеря прочности, %	более 15	3	Приложение Б
Потеря массы, %	не более 5		
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	D400	$P_{cp} = 401$	ГОСТ 12730.1-2020
Теплопроводность мВт/м°С	0,12	0,12	ГОСТ 7076-99
Паронепроницаемость мг/м <sup>2</sup> ·ч·Па	0,085	0,085	ГОСТ 25898-2012
Водопоглощение, Wm%	4-8	5	ГОСТ 12730.3-2020

Анализ полученных результатов показывает, что качество полученного легкого бетона соответствует нормативной документации.

Заключение:

Трехслойные стеновые панели с теплоизоляционным слоем высокопоризованного полистиролбетона на композиционном вяжущем соответствуют требованиям нормативной документации, а также их производство является экономически выгодным в сравнении с существующими панелями. Проведенные испытания обусловливают его применение в ограждающих конструкциях.

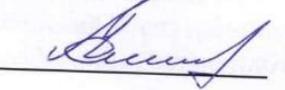
Директор ТОО «ККК Бетон»

  
Кику А.И.

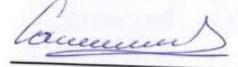
Научный консультант НАО  
«КарТУ им. Абылкаса Сагинова»

  
Рахимова Г.М.

Начальник службы качества  
ТОО «ККК Бетон»

  
Мирзахметов Д.А.

Докторант НАО  
«КарТУ им. Абылкаса Сагинова»

  
Самойлова Т.Ю.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

И-СМ №2.9-3-2023/В



РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН  
КАРАГАНДИНСКИЙ ФИЛИАЛ  
АО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР ЭКСПЕРТИЗЫ И СЕРТИФИКАЦИИ»  
ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР

Юридический адрес: 100009, г. Караганда, ул. Анижерская, 22/2

Местонахождение: г. Караганда, район Элихан Бекейхан,  
учетный квартал 066, строение 373

Телефон +7 (7212) 94-00-70 (вн. 6204), факс +7 (7212) 44-17-23  
Аттестат аккредитации № KZ.T.10.0212 от 29.03.2024 г.

Всего страниц 2  
Страница 1

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 343/1-25  
от «24» июня 2025 г.

Наименование образца:	Бетоны В25
Заказчик, адрес:	ТОО «ККК Бетон», Карагандинская обл., г. Сарань, учетный квартал 046, строение 368
Страна (предприятие) изготовитель продукции:	РК, ТОО «ККК Бетон»
Акт отбора образцов:	—
Дата поступления образцов:	20.06.2025 г.
Дата проведения испытаний:	24.06.2025 г.
Место проведения испытаний:	сектор испытаний продукции промышленного назначения, кабинет № 25
Количество образцов:	5 образцов по 0,5 кг. каждого наименования
Объем партии:	—
Обозначение НД на продукцию:	ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия».
Виды испытаний:	сертификационные
Условия проведения испытаний:	температура 25 °C, влажность 70 %
Испытательное оборудование:	Установка спектрометрическая СКС – 99 «Спутник», зав. номер №382, свидетельство о проверке №ВА-17-25-2857699 от 05.05.2025 г.

Частичная перепечатка протокола без разрешения испытательного центра запрещена.  
Протокол распространяется только на образцы, подвергнутые испытаниям.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

## Бетоны В25

Таблица 1

Наименование показателей	НД на метод испытаний	Норма показателя по НД	Фактически полученные результаты	Примечание
1	2	3	4	5
Допустимый уровень удельной эффективной активности, Бс/кг	ГОСТ 30108-94	до 370	ср. 100,32	

\* область применения для I класса – все виды строительства.

Ведущий специалист

И.о. начальника ИЦ



Боранкул Е. Б.

Егорова А. С.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3



KZ.T.10.E0936  
TESTING



ЖШС «Фимараттар мен құрылыштардың қауіпсіздігін  
техникалық бақылау»  
Аттестат акредитации № KZ.T.10.E0936 от 28.04.2022 г  
КР, Караганды қ-сы, кеше Карбышева үй 5/6, кенсе 11,  
E-mail: [techcontrol21@mail.ru](mailto:techcontrol21@mail.ru)  
ТОО «Технический контроль безопасности  
зданий и сооружений»  
Аттестат акредитации № KZ.T.10.E0936 от 28.04.2022 г  
РК, г. Караганда, ул. Карбышева 5/6 н.п.11,  
E-mail: [techcontrol21@mail.ru](mailto:techcontrol21@mail.ru)

Ф 4.И-ИЛ-10

лист 1  
всего листов 2

### Протокол испытаний №589

от «13» августа 2024 г.

**Наименование продукции:** Теплоизоляционный полистирол

**Заявитель, договор (заявка), адрес:** Физ.л. Самойлова Т.Ю.

**Страна (предприятие) изготовитель, адрес:** -

**Акт отбора образцов:** образцы изготовлены заказчиком

**Дата проведения испытаний:** 03-30.06.2024 г.

**Место проведения испытаний:** Испытательная лаборатория, г. Караганда, ул. Карбышева 5/6

**Регистрационный номер образцов:** 589/24

**Количество образцов:** 24

**Перечень испытательного оборудования:**

-весы электронные CAS SW-10-сертиф о поверке №BL-02-24-5120080;

-линейка измерительная металлическая-сертиф калибровки.-№6-01-2404313;

-пресс гидравлический ПГМ-1000МГ4- сертиф калибровки.-№6-01-240049,

-камера тепла и холода КТХ-12 сертификат об аттестации № BL-1-10-2400527

-шкаф сушильный ШСП 0,25-100. сертификат об аттестации № BL-1-10-2400526

-измеритель теплопроводности ИТП-МГ4-первичная заводская поверка от 02.10.2023 г.

**Обозначение НД на продукцию:** ГОСТ 33929-2016

**Вид испытаний:** контрольные испытания

**Условия проведения испытаний:** температура +23 °C, относительная влажность 55%

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Наименование показателей, единицы измерений	Норма по НД	Фактически полученный результат	НД на метод испытаний	Примечание
1	2	3	4	5
Прочности при сжатии, МПа	В1,5	R <sub>cp</sub> =1,51	ГОСТ 10180-2012	
Прочность на растяжении при изгибе, МПа	0,65	R <sub>ib</sub> =0,65	ГОСТ 10180-2012	
Прочность на осевое растяжение, МПа	0,34	R <sub>i</sub> =0,34	ГОСТ 10180-2012	
Морозостойкость цикл	150	F150	ГОСТ 31359-2007	
Потеря прочности, %	не более 15	12	Приложение .Б	
Потеря массы, %	не более 5	3		
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	D400	R <sub>cp</sub> =401	ГОСТ 12730.1-2020	
Теплопроводность мВт/м°С	0,12	0,12	ГОСТ 7076-99	
Паронепроницаемость мг/м <sup>2</sup> *ч*Па	0,085	0,085	ГОСТ 25898-2012	
Водопоглощение, Wm%	4-8	5	ГОСТ 12730.3-2020	

Испытания провел: Инженер  
(должность)

Заведующий лабораторией  
(должность)

Ломакина Е.А.  
(ФИО)

Ломакина Е.А.  
(ФИО)



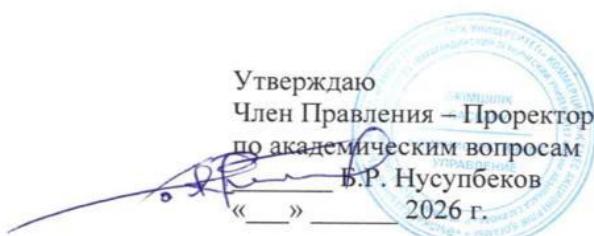
Протокол распространяется только на образцы, подвергнутые испытаниям.  
Частичная распечатка и копирование протокола без разрешения ИЛ ТОО «ТКБЗиС» запрещен

# ПРИЛОЖЕНИЕ И

## Акт внедрения в учебный процесс

НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»

Утверждаю  
Член Правления – Проректор  
по академическим вопросам  
Б.Р. Нусупбеков  
«\_\_\_» 2026 г.



г. Караганда

### АКТ

внедрения в учебный процесс разделов диссертационной работы  
Самойловой Татьяны Юрьевны  
«Разработка технологии производства высокопоризованного  
полистиролбетона для теплоэффективных наружных стеновых  
панелей»,  
представленной на соискание степени PhD по образовательной  
программе  
8D07302 – «Производство строительных материалов, изделий и  
конструкций»

Рассмотрев на учебно-методическом совете архитектурно-строительного факультета диссертационную работу Самойловой Татьяны Юрьевны, комиссия предложила внедрить в учебный процесс следующие разделы диссертации:

**1. Исследование сырьевых материалов и разработка оптимального состава для производства высокопоризованного полистиролбетона.**

Раздел внедряется в учебный процесс для магистрантов образовательной программы 7M07303 - «Производство строительных материалов, изделий и конструкций» в рамках дисциплины «Современные материалы на основе местного сырья», связанной с технологией строительных материалов и материаловедением. Содержание раздела направлено на формирование у магистрантов практических навыков подбора состава сырьевых компонентов, способами утилизации промышленных отходов и их влияние на свойства строительных материалов.

Внедрение данного раздела обеспечивает практико-ориентированное обучение, формирует у обучающихся инженерное мышление, умение анализировать свойства материалов и принимать обоснованные решения при проектировании составов бетонов с использованием местных сырьевых ресурсов Казахстана. Внедрение главы помогает развить у обучающихся навыки технико-экономического анализа и выбора сырьевых компонентов с учётом их происхождения, состава и транспортной доступности. Раздел рекомендуется использовать при выполнении

диссертационных работ, а также отчетов по научно-исследовательской работе магистрантов.

## **2. Методы исследования высокопоризованного полистиролбетона.**

Раздел «Методы исследования высокопоризованного полистиролбетона» внедряется для закрепления у обучающихся знаний о методиках оценки свойств строительных материалов. В учебном процессе данный раздел применяется для изучения свойств бетонных смесей (подвижность, водопотребность, пористость) и бетона (прочность, морозостойкость, теплопроводность, горючесть). В процессе изучения данного раздела обучающиеся знакомятся с методами электронно-микроскопических и рентгеноструктурных исследований, а также с основами интерпретации получаемых данных. Освоение методик способствует развитию у магистрантов аналитического мышления, способности сопоставлять структурные характеристики материала с его физико-механическими свойствами, а также применять полученные знания при выполнении исследовательской работы. Практическая значимость заключается в том, что обучающиеся осваивают полный цикл работы с материалом от оптимизации состава до анализа эксплуатационных характеристик. Это способствует формированию инженерных компетенций и готовности к решению реальных производственных задач.

Внедрение указанных разделов в учебный процесс способствует повышению уровня подготовки обучающихся по образовательной программе 7М07303 - «Производство строительных материалов, изделий и конструкций». Материалы диссертации усиливают практическую направленность образовательного процесса, расширяют спектр учебно-методических ресурсов и обеспечивают обучающихся актуальными знаниями в области инновационных технологий строительных материалов. Кроме того, результаты исследований целесообразно применять при выполнении курсовых работ, дипломных проектов, магистерских диссертаций и проектов строительных специальностей, что обеспечит преемственность между научной и учебной деятельностью, а также повысит научно-методический потенциал университета.

Настоящий акт не является основанием для предъявления финансовых претензий к НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова».

Председатель учебно-методического совета,  
декан архитектурно-строительного факультета



Токанов Д.Т.

Зав. кафедрой «Строительные материалы  
и технологии»



Иманов Е.К.

Председатель комитета по обеспечению качества  
архитектурно-строительного факультета



Дадиева М.К.

Научный консультант  
к.т.н., асс. проф.



Рахимова Г.М.