

ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»
ОАО «Уральский научно-исследовательский институт
архитектуры и строительства»

На правах рукописи

УДК 624.01: 691.327

БЕЛЯКОВ Владимир Александрович

ПРОЧНОСТНЫЕ, ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ
СВОЙСТВА ПОЛИСТИРОЛБЕТОНА ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ И ИЗДЕЛИЙ

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор А.С. Носков

Екатеринбург 2010

Содержание

Введение.....	9
1 Состояние вопроса и задачи исследования.....	17
2 Характеристики материалов и методики исследования. Подбор составов полистиролбетона.....	25
2.1 Материалы и технология для изготовления экспериментальных образцов.....	29
2.2 Изготовление экспериментальных образцов и исследование характеристик полистиролбетонной смеси, составы исследованных бетонов.....	38
2.3 Методы постановки экспериментальных исследований характеристик полистиролбетона.....	44
Выводы	48
3 Исследование прочностных характеристик конструкционного полистиролбетона.....	49
3.1 Методика проведения испытаний.....	49
3.2. Прочность на сжатие.....	53
3.2.1 Кубиковая прочность на сжатие.....	56
3.2.2 Осевое сжатие (призменная прочность).....	62
3.2.3 Прочность на местное сжатие.....	69
3.3 Исследование прочности на растяжение.....	73
3.3.1 Прочность на осевое растяжение	73
3.3.2 Прочность на растяжение при изгибе	76
Выводы.....	80
4 Исследование деформационных характеристик конструкционного полистиролбетона.....	81
4.1 Методика проведения испытаний.....	81
4.2 Начальный модуль упругости.....	89
4.3 Условная предельная деформативность	95
4.4 Коэффициент Пуассона.....	99
4.5 Деформации усадки.....	100
4.6 Прочность при длительном приложении нагрузки	103
4.6.1 Деформации ползучести.....	103

4.7 Коэффициент линейной температурной деформации.....	108
Выводы.....	112
5 Исследование эксплуатационных характеристик конструкционного полистиролбетона.....	113
5.1 Методика проведения испытаний.....	113
5.2 Морозостойкость	116
5.3 Теплопроводность.....	122
5.4 Паропроницаемость.....	129
Выводы.....	131
6 Исследование работы полистиролбетона в изгибаемых элементах.....	134
6.1 Методика проведения испытаний.....	134
6.2 Результаты испытаний балок.....	137
Выводы.....	145
7 Предложения по совершенствованию инженерной методики расчета изделий из полистиролбетона.....	146
7.1 Изделия из полистиролбетона, предложения к их расчету и рациональная область их применения.....	146
7.2 Обоснование и расчет экономической эффективности внедрения в производство изделий из конструкционного полистиролбетона.....	150
Выводы.....	158
Основные выводы.....	159
Список использованных источников.....	162
Приложение 1 Предложения к проектированию составов конструкционного полистиролбетона, примеры расчета.....	174
Приложение 2 Результаты статистической обработки экспериментальных данных	184
Приложение 3 Материалы о внедрении.....	190

Нормативные ссылки

В диссертации использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ВТУ 01-72 Стиропорбетон. Изготовление и применение в строительстве жилых, промышленных, гражданских и сельскохозяйственных зданий и сооружений / МИСИ, ЦНИЭПСельстрой, 1971. – 21 с.

ГОСТ Р 51263-99 Полистиролбетон. Технические условия / Госстрой России – М.: ГУП ЦПП, 1999. – 20 с.

ГОСТ 10178-85 Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия. – М.: Госстрой СССР: Изд-во Стандартов, 1989. – 12 с.

ГОСТ 10180-90 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам // Бетон и железобетонные изделия. - М.: Госстрой СССР: Изд-во Стандартов, 1990. - С. 78-101.

ГОСТ 10069.0-95 «Методы определения морозостойкости. Общие требования» – М.: НИИЖБ, 1994. – 5 с.

ГОСТ 27005-86* Бетоны легкие и ячеистые. Правила контроля средней плотности – М.: НИИЖБ, 1994. – 5 с.

ГОСТ 27006-86 Бетоны. Правила подбора состава. – М.: НИИЖБ, Изд-во Стандартов, 1993. – 5 с.

ГОСТ 10181-2000 Смеси бетонные. Методы испытаний – М.: НИИЖБ, ГУП ЦПП, 2001. – 15 с.

ГОСТ 12730.2-78 Бетоны. Методы определения влажности. – М.: НИИЖБ, 1994. – 3 с.

ГОСТ 12730.3-78 Бетоны. Методы определения водопоглощения. – М.: НИИЖБ, 1994. – 3 с.

ГОСТ 310.4-81 (СТ СЭВ 3920-82) Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии – М.: НИИЖБ, 1992. – 12 с.

ГОСТ 12730.5-78 Бетоны. Методы определения водонепроницаемости. – М.: НИИЖБ, 1994. – 12 с.

ГОСТ 25137-82 Материалы нерудные строительные, щебень и песок плотные из отходов промышленности, заполнители для бетона пористые. – М.: НИ-

ИЖБ, 1988. – 10 с.

ГОСТ 29167-91 Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: 1992. – 17с.

ГОСТ 24452-80 Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона / НИИЖБ Госстроя СССР, НИИСК Госстроя СССР. – М.: 1980.- 18 с.

ГОСТ 24544-81* Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести / НИИЖБ Госстроя СССР, НИИСК Госстроя СССР. – М.: 1987.- 23 с.

ГОСТ 5578-94 Щебень и песок из шлаков черной и цветной металлургии для бетонов. Технические условия. – М.: НИИЖБ, 1996. – 4 с.

ГОСТ 25898-83 Материалы и изделия строительные. Методы определения сопротивления паропрооницанию – М.: Госстрой СССР, 1988. – 7 с.

ГОСТ 7076-99 Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме – М.: НИИСФ, 2000. – 9 с.

ГОСТ 9758-86* Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний – М.: Госстрой СССР, 1988. – 35 с.

ГОСТ 8829-94 Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости. – М.: НИИЖБ, 1998. – 13 с.

СНиП 2.03.01-84* Бетонные и железобетонные конструкции / Госстрой России – М.: ГУП ЦПП, 2001. – 76 с.

СНиП 3.03.01–87 Несущие и ограждающие конструкции / Госстрой СССР – М.: Стройиздат, 1988. – 75 с.

СНиП II-3-79* (Изменение № 3). Строительная теплотехника / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1998. – 32 с.

СНиП 23-01-99* Строительная климатология / Госстрой России. - М., ГУП ЦПП, 2003. – 127 с.

СНБ 2-04-01-97 Строительная теплотехника / Министерство архитектуры и строительства республики Беларусь – Минск: Минстройархитектуры республики Беларусь, 1998. - 39 с.

СН 509-78 Инструкция по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений – М.: Стройиздат, 1979. – 65 с.

СП 52-101-2003 Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры/ ЦНИИпромзданий Госстроя РФ, ГУП НИИЖБ. – М.: ЦИТП Госстроя РФ, 2004. - 54 с.

Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжёлых и лёгких бетонов без предварительного натяжения арматуры (к СП 52-101-2003). / ЦНИИпромзданий, ГУП НИИЖБ. – М.: ЦИТП Госстроя РФ, 2005. - 217 с.

Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов / ЦНИИСК им. Кучеренко, НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. - 72 с.

ТИ 011.0-3-00284807-95 Комплекс мероприятий по обеспечению экологической безопасности применения полистиролбетонных изделий и конструкций в жилищном строительстве ВНИИжелезобетон.

ТУ 65УССР152-81 Полистиролбетон. – Киев, - 1981. – 15 с.

ТУ 67-983-85 Кровельный монолитный теплоизоляционный полистиролбетон. – М., НИИЖБ, 1985. – 12 с.

ТУ 69 РСФСР 44-75. Панели и блоки из стиропорбетона (полистиролбетона) для наружных стен зданий. – М., ЦНИИПСельстрой, 1978. – 20 с.

ТУ 69-329-85 Однослойные стеновые панели из полистиролбетона. – М., НИИЖБ, 1985. – 20 с.

ТУ 480-2-140-92 Панели стеновые трехслойные из полистиролбетона. – М., НИИЖБ, 1992. – 25 с.

ТУ 5835-001-72671668-2004 Блоки полистиролбетонные / ООО Полистиролбетон – Челябинск, 2004. – 12 с.

ТУ 5745-00155951219-2005 Блоки стеновые полистиролбетонные / ООО «Югтрансбетон», ГУП ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко - Краснодар, 2005. – 16 с.

ТУ 5767–001–73062575–2005 Блоки сплошные полистиролбетонные / ООО «СтройУниверсал» - М., 2005. – 15 с.

ТУ 5745-001-20875427-00 Смеси полистиролбетонные / ОАО институт «УралНИИАС» – Екатеринбург, 2000. – 9 с.

ТУ 5767-002-20875427-00 Блоки полистиролбетонные / ОАО институт «УралНИИАС» – Екатеринбург, 2000. – 10 с.

ТУ 5828-003-25057366-06 Перемычки из полистиролбетона / ОАО институт «УралНИИАС» – Екатеринбург, 2006. – 17 с.

ТУ 5745-026-44577806-2006 Смеси полистиролбетонные / ОАО институт «УралНИИАС», ОАО «ГМК Норильский никель» – Екатеринбург, 2006. – 10 с.

ТУ 5745-027-44577806-2006 Блоки теплоизоляционные полистиролбетонные/ ОАО институт «УралНИИАС», ЗФ ОАО «ГМК Норильский никель» – Екатеринбург, 2006. – 11 с.

ТУ 5870-002-14153664-04 с изм. № 1 Реламикс Т-2 / ОАО Полипласт – М., 2004. – 4 с.

Перечень условных обозначений и сокращений

ПДК – предельно допустимая концентрация;

ПСБ – полистиролбетон;

В/Ц – водоцементное отношение.

ОК – осадка конуса;

P_p – показатель раствороотделения;

ТВО – тепловлажностная обработка;

П – подвижность полистиролбетонной смеси;

γ – плотность материала;

λ – коэффициент теплопроводности;

$V_{п}$ – межзерновая пустотность заполнителя;

$W_{сорб}$ – сорбционная влажность;

МИСИ – Московский инженерно-строительный институт;

МГСУ – Московский государственный строительный университет;

ВЗИСИ - Всесоюзный заочный инженерно-строительный институт;

ГУП НИИЖБ – Государственное унитарное предприятие Научно-исследовательский институт железобетона при Госстрое России;

ОАО «ВНИИЖБ» – Всесоюзный научно-исследовательский институт железобетона;

НИИСФ – Научно-исследовательский институт строительной физики;

ГОУ ВПО УГТУ-УПИ им. Б.Н. Ельцина – Государственное учреждение высшего профессионального образования Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина;

ЦНИИСК им. Кучеренко – Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций имени Кучеренко;

ОАО институт «УралНИИАС» - Уральский научно-исследовательский институт архитектуры и строительства;

ВНИИНСМ – Всесоюзный научно-исследовательский институт строительных материалов;

СтройЦНИИЛ – Строительная Центральная научно-исследовательская лаборатория;

МНИИТЭП - Московский научно-исследовательский и проектный институт типового и экспериментального проектирования.

ЛенЗНИЭП – Ленинградский Зональный научно-исследовательский институт Экспериментального Проектирования.

ЦНИИЭПсельстрой – Центральный научно-исследовательский институт

Экспериментального Проектирования сельского строительства.

Введение

В настоящее время особенную актуальность приобрела необходимость поиска новых подходов к решению проблем по теплозащите зданий и сооружений в соответствии с современными требованиями действующей нормативной документации в строительстве. В связи с этим возникла потребность в применении новых конструкционно-теплоизоляционных строительных материалов и изделий, отвечающих требованиям данных норм, технологичных в производстве и отвечающих условиям экономической целесообразности. Данным требованиям сегодня в полной мере может соответствовать строительный материал, использующийся в России и странах СНГ под названием полистиролбетон. В других странах данный легкий бетон известен под следующими названиями: стиропорбетон или EPS beton в Германии и странах Восточной Европы, изолтего в Италии, полис-бето во Франции. Неуклонный рост интереса к нему на рынках строительных материалов не только в России, но и за рубежом обуславливается высокой эффективностью применения изделий из полистиролбетона и пенополистиролбетона (диппбетона).

Полистиролбетоном называют бетон, в котором заполнителем являются гранулы вспененного полистирола. По своим свойствам полистиролбетон относится к легким бетонам, однако имеет ряд существенных отличий. К его достоинствам относят возможность варьирования в широких пределах его плотности, в результате чего полистиролбетон может быть как теплоизоляционным, так и конструкционным материалом. Конструкционно-теплоизоляционный полистиролбетон – материал марок по плотности от D700 до D1000 и прочностью на сжатие от класса B3,5 до B7,5. Конструкционный полистиролбетон – материал марок по плотности от D1000 до D1600 и прочностью на сжатие от класса B7,5 до B15.

Легкий бетон с заполнителем из гранул пенополистирола получил большое распространение в ряде европейских стран. Еще в 1952 г. западногерманская фирма «BASF» запатентовала способ производства стиропорбетона (бетон с заполнителем из гранул полистирольного пенопласта).

За рубежом полистиролбетон применяется с конца 60-х годов. Прочность на

сжатие бетона типа «Unisol» со средней плотностью 800 кг/м^3 [$\lambda_0 = 0,28 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$] и 1200 кг/м^3 [$\lambda_0 = 0,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$] при расходе цемента в бетоне 300 и 350 кг/м^3 составляет соответственно $1,5$ и 5 МПа .

В настоящее время полистиролбетон низкой плотности применяется в странах Западной Европы в качестве морозостойкого основания для железных дорог, для изготовления стеновых панелей, утепления кровель, теплого основания для полов животноводческих зданий. В Германии этот материал, названный «радипором», успешно заменяет в строительстве зданий минераловатные плиты и прочие менее эффективные утеплители.

Швейцарская компания «RASTRA®» с 1972 года выпускает теплоизоляционные плиты для малоэтажного строительства из полистиролбетона средней плотностью $300\text{-}500 \text{ кг/м}^3$. Легкий бетон с заполнителем из пенополистирола в Нидерландах используется в фундаментных плитах в качестве утеплителя. В Болгарии успешно применяются трехслойные железобетонные стеновые конструкции со средним слоем из полистиролбетона и гибкими связями между наружными и внутренним слоем.

В СССР в качестве ограждающих конструкций полистиролбетон, именуемый ранее стиропорбетоном, был впервые применен в 1970 г. при изготовлении неармированных стеновых блоков в г. Анадыре. Через четыре года бетон на заполнителе из гранул пенополистирола был использован для изготовления несущих однослойных стеновых панелей для сельского строительства на Чукотке [24], в управлениях Анадырьсельстроя и Магадансельстроя при участии ЦНИИЭПсельстроя [50]. После исследований, проведенных в МИСИ вместе с институтом «ЦНИИЭПсельстрой», трестом «Арктикстрой» был применен в строительстве полистиролбетон плотностью $300\text{-}600 \text{ кг/м}^3$.

В опытном порядке полистиролбетон применялся ЛенЗНИЭП в качестве утеплителя на армоцементных покрытиях [33]. В начале и в середине 70-х были введены технические условия на изготовление стеновых панелей и блоков из стиропорбетона для сельскохозяйственных зданий. Указанные ТУ были отменены только в 1994 году.

Впоследствии, исследования по использованию теплоизоляционного поли-

стиролбетона для изготовления объемных блоков для жилых зданий на Севере были проведены Гипроспецгазом [9]. Предложенная технология приготовления полистиролбетонной смеси опробована на Краснодарском домостроительном комбинате.

Строительство индивидуального и малоэтажного жилья необходимо вести в промышленных масштабах, снижая его стоимость до доступного уровня, заявил Президент России Д.А. Медведев. В рамках реализации национального проекта «Доступное и комфортное жилье» четырех и пятиэтажные дома из полистиролбетона с плотностью 1200-1500 кг/м³, класса по прочности В7,5-В15 удовлетворяют предъявляемым требованиям по надежности и энергоэффективности.

Представляется целесообразным изготавливать из полистиролбетона, например, надоконные перемычки, плиты чердачного перекрытия. Он является перспективным и для изготовления крупноразмерных стеновых панелей.

Известно, что данный вид бетона обладает особым набором прочностных и деформационных свойств. По зависимости между плотностью и модулем упругости полистиролбетон близок к легким бетонам, по отношению кубиковой прочности к призмной похож на мелкозернистый или крупнопористый керамзитобетон, по предельным деформациям сжатия он приближается к тяжелым бетонам, а по макроструктуре полистиролбетон чем-то схож с ячеистыми бетонами. Кроме того, известно, что в образцах из ячеистого бетона, как и в полистиролбетонных, разрушение от нагрузки происходит не по зернам заполнителя, а по оболочкам пузырьков (ячеек). Трещиностойкость полистиролбетона намного лучше, чем у ячеистого бетона [16, 17, 26, 37, 52, 64].

Полистиролбетон в отличие от ячеистого бетона с течением времени не подвержен процессу карбонизации под действием углекислого газа из атмосферы. Водопоглощение полистиролбетона ниже, чем у ячеистого бетона при одинаковой плотности в 2,5–3 раза, а по сравнению с водопоглощением традиционных легких бетонов на пористых заполнителях – ниже в 1,5-2 раза [33, 104].

В современной строительной науке до настоящего времени считалось, что полистиролбетон можно рассматривать как ячеистый, но с большими размерами пор, заполненными полистиролом, с меньшей проницаемостью и с демпфирую-

щим эффектом. На самом деле в этом материале реализована двуимодальная пористость – крупные поры формируют шарики полистирола, а мелкие – излишки не вступившей в реакцию с цементом и испаряющейся в дальнейшем воды и, часто микропена от часто применяемых добавок - пенообразователей.

Характерной особенностью полистиролбетона в сравнении с другими легкими бетонами на пористых заполнителях является огромное (в 20-30 раз) различие между плотностью гранул заполнителя и цементной матрицы.

Использование полистиролбетона в изделиях, выполняющих функцию несущих, требует изучения целого ряда вопросов. В первую очередь необходимо изучить свойства полистиролбетона, как конструкционного материала в целом.

В настоящее время в строительстве практически используется только полистиролбетон низкой плотности (150-600 кг/м³), как теплоизоляционный материал [2, 19-22, 36, 43, 58,59], хотя уже для стеновых камней учитывается и возможность восприятия нагрузки от собственного веса [9, 28, 48, 52, 53, 60, 61, 66, 78, 98].

Как конструкционный материал, полистиролбетон в диапазоне плотностей от 700 до 1450 кг/м³ практически не исследовался. В принципе полистиролбетон может воспринимать нагрузки от конструктивных элементов, он может использоваться в любых строительных изделиях, в том числе армированных, являющихся одновременно теплоизоляционными и несущими. Применение конструкционного полистиролбетона в строительстве востребовано и представляется перспективным.

Настоящая работа посвящена изучению работы полистиролбетона при различных случаях загрузки, выявлению картины деформирования и разрушения материала и, на базе этого, описания его свойств, определяющих возможность прогнозирования его поведения под действием нагрузки. Свойства изделий из полистиролбетона зависят от состава материала и способа его изготовления. Для того чтобы говорить о свойствах материала, необходимо определиться с его составом и технологией изготовления. При подборе состава полистиролбетона особое внимание уделено использованию местных сырьевых материалов, в частно-

сти техногенных отходов, утилизация которых способствует оздоровлению окружающей среды.

Разработка и внедрение составов конструкционного полистиролбетона на основе техногенных заполнителей в производство несущих железобетонных изделий имеет важное экологическое значение. Предложен один из вариантов решения проблемы утилизации отходов черной металлургии (шлаков), связанный с применением новых строительных технологий [6].

Существенное увеличение объема производства изделий из полистиролбетона требует более глубокого и широкого изучения свойств этого «нового» строительного материала. Это позволит уточнить рациональные области использования эффективных полистиролбетонных конструкций, повысить их качество и долговечность.

Конструкционный полистиролбетон в диапазоне плотностей 1200-1450 кг/м³ и класса В7,5 –В15 востребован для проектирования конструкций в районах России с сейсмическими зонами 8-9 баллов (например Улан-Удэ), так как удовлетворяет требованиям СНиП II-7-81 "Сеймика" (раздел: здания с несущими стенами из кирпича или каменной кладки) п. 3.38. Для кладки несущих и самонесущих стен или заполнения каркаса следует применять следующие изделия и материалы: б) бетонные камни, сплошные и пустотелые блоки (в том числе из легкого бетона плотностью не менее 1200 кг/м³) марки 50 и выше.

На основании углубленного изучения материалов исследований полистиролбетона, выполнявшихся различными авторами на протяжении более чем 40 лет, установлено, что для этого более пластичного и имеющего повышенное соотношение прочностей на растяжение и сжатие материала необходима разработка теоретических положений своего, особого механизма разрушения или теории прочности в зависимости от его состава и структуры.

Целью работы является разработка рациональных составов, выбор технологии изготовления изделий и изучение прочностных, деформационных и теплоизоляционных характеристик полистиролбетона, как материала для несущих строительных конструкций и изделий, под кратковременным и длительным воздействием нагрузки.

Научная новизна работы состоит в том, что получены:

1. Конструкционно-теплоизоляционный и конструкционный полистиролбетон на основе техногенных заполнителей Уральского региона с необходимыми свойствами и выбрана рациональная технология изготовления несущих конструкций из данного вида легкого бетона;
2. Закономерности изменения прочностных, деформативных и эксплуатационных свойств конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного полистиролбетона в диапазоне плотностей от 800 кг/м^3 до 1450 кг/м^3 , не рассматриваемых действующим ГОСТ Р 51263-99;
3. Уточняющие коэффициенты к существующей методике расчета конструкций из ячеистого бетона применительно к расчету и проектированию новых эффективных полистиролбетонных изделий.

Практическая ценность работы заключается в том, что на основе результатов выполненных экспериментальных исследований пополнены имеющиеся немногочисленные данные ранее проводимых в ОАО институт «УралНИИАС» исследований в этой области. Разработаны предложения по совершенствованию инженерной методики расчета и проектирования изделий из полистиролбетона.

Данная исследовательская работа является составной частью научного направления, развиваемого в Уральском научно-исследовательском институте архитектуры и строительства, совместно со Строительным факультетом ГОУ ВПО УГТУ-УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина.

В настоящее время, на основе экспериментальных данных по подбору рациональных составов и исследованию прочностных и деформационных характеристик конструкционного полистиролбетона, полученных в данной исследовательской работе, разработаны следующие изделия:

По разработанным чертежам, изготовлены опытные серии армированных перемычек и крупные простеночные блоки по серии 81 для ОАО «Северский трубный завод». Проведены исследования работы полистиролбетонных изделий под нагрузкой в условиях изгиба и внецентренного сжатия.

Практическое значение и внедрение результатов работы. Практическая реализация работы обеспечена разработкой:

- Территориальных градостроительных норм Свердловской области «Бетонные и железобетонные конструкции из полистиролбетона».

- новых редакций ТУ 5745-001-20875427-02 «Смеси полистиролбетонные», ТУ 5767-002-20875427-02 «Блоки полистиролбетонные» и Рекомендаций по применению полистиролбетона в строительстве для ООО «Корпорация «Маяк»;

- ТУ 5828-003-25057366-06 «Перемычки из полистиролбетона» для ООО «Корпорация «Маяк».

Результаты подбора составов конструкционного полистиролбетона были использованы при разработке трехслойной стеновой панели по заказу ОАО «завод ЖБИ Бетфор», для строительства жилых зданий в г. Пелым Свердловской области.

Изделия из полистиролбетона, разработанные на основании результатов исследований, использованы при проектировании и строительстве двухсекционного жилого дома с подземным паркингом в переулке Базовом в г. Екатеринбурге.

Ожидаемый годовой экономический эффект от использования рекомендаций автора при применении изделий из полистиролбетона в строительстве жилого одноподъездного девятиэтажного дома из монолитного железобетона для завода ЖБИ с выпуском изделий 10000 м^3 в год составит не менее 14,94 млн. руб.

Апробация работы:

Отдельные разделы диссертации докладывались на следующих научных конференциях: II Международной научно-практической конференции «Экология: образование, наука, промышленность и здоровье», Международной научно-практической конференции «Проблемы и достижения строительного материаловедения» (БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород 2004, 2005); VI Международной конференции «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения» (СПбГПУ, Санкт-Петербург 2005 г.); Всероссийской конференции «Химия твердого тела и функциональные материалы» (СО РАН-УрО РАН Екатеринбург 2004); Всероссийских конференциях молодых ученых, аспирантов и студентов «Наука. Технологии. Инновации» (НГТУ, Новосибирск 2003-2004 г.); на VII и VIII отчетных научных конференциях молодых ученых (ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ имени первого Президента России

Б.Н. Ельцина», Екатеринбург 2004-2005), Международной научно-практической конференции «Проблемы и возможности современной науки» (ТСТУ, Тамбов 2009).

Технические разработки автора отмечены дипломом II степени Всероссийской конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Наука. Технологии. Инновации» - НТИ-2003 в секции «Актуальные проблемы современного материаловедения».

Публикации. Основные результаты исследований и основные положения (главы) диссертационной работы опубликованы в 8 печатных работах, в том числе, и в ведущем рецензируемом научном издании, входящем в перечень ВАК: журнал «Жилищное строительство» (Москва, 2008) и рукописных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, основных выводов, списка использованных источников из 115 наименований, 3 приложений на 22 страницах и содержит 196 страниц, включая 47 таблиц и 29 рисунков.

Работа выполнена на Строительном факультете ГОУ ВПО УГТУ-УПИ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина и в лаборатории отдела Несущих железобетонных конструкций Уральского научно-исследовательского института архитектуры и строительства в период с 2002 по 2008 годы.

1 Состояние вопроса и задачи исследования

Исследования различных свойств полистиролбетона ведутся более 40 лет. Результаты исследований советских и российских ученых приведены в научных работах и публикациях А.М. Вайсбурда [11], И.У. Гейданса [14, 50], В.А. Рахманова и В.Г. Довжика [16-17, 75], А.А. Евдокимова и О.С. Дайнеко [19-22], Е.А. Король [36, 37], Т.И. Милых [45], В.А. Никишкина [51, 52, 77-80], Н.Ф. Почапского и Г.Г. Зуйкова [72], В.И. Мелихова, Козловского А.И. и В.Н. Россовского [46, 47, 76], Р.В. Сакаева и В.В. Щербаченко [29, 74, 92-94], Ф.Л. Капустина [34], Ю.В. Чиненкова и В.Н. Ярмаковского [91, 96, 97], Н.Е. Яхонтовой и Г.К. Авдеева [98], О.В. Журбы [25, 26] и др.

Результаты исследований европейских ученых представлены в научных статьях В. Бэтжа, В. Ниёмэйера [101], Ш. Эйка [102], М. Гвужда [103], К. Кохлинга [104, 105], В. Суссмана и Г. Баумана [110, 111] и Р. Траутветтера [112], а также в более поздних научных работах М. Муравлева и Д. Драгики [99, 100], И. Лизки [106], А. Систерцика [115] и др. В Японии изучением теплофизических свойств бетонов на полистирольных заполнителях для применения их в конструкциях сейсмостойких зданий и производственных зданий с агрессивными средами занимались ученые К. Окада и И. Охама [109].

В СССР исследования бетона с применением полистирольного заполнителя впервые были начаты в 1966 г. в НИИЖБе. На составе, где в качестве мелкого заполнителя служил кварцевый песок, был получен полистиролбетон плотностью 800 кг/м^3 и прочностью 4,5 МПа. Исследование поведения данного материала во взаимодействии с керамзитобетоном проводилось в начале 80-х годов к.т.н. А.А. Евдокимовым совместно с Л.Н. Брусковой (ЦНИИСК им. Кучеренко).

А.А. Евдокимовым совместно с О.С. Дайнеко была доказана возможность изготовления однослойных стеновых панелей из полистиролбетона размером $3\text{х}6\text{х}0,2$ м для зданий сельскохозяйственного назначения. В конце 80-х годов в НИИЖБе изучением свойств полистиролбетона занимались канд. техн. наук Т. И. Милых [45] и В.И. Мелихов [46, 47].

В 1968 г. во ВНИИНСМе совместно с МНИИТЭПом проводились исследования свойств теплоизоляционного полистиролбетона с низкой плотностью и прочностью на заполнителе из кварцевого песка с целью использования в качестве среднего слоя стеновых панелей жилых зданий и для замоноличивания межпанельных стыков. Позже, совместно с лабораторией опытного завода «Прокат-деталь», была доказана возможность изготовления однослойных стеновых панелей размерами 2,5х6х0,22 м.

С начала 1970-х годов в Краснодарском политехническом институте исследовался стиропорпенобетон плотностью 600-700 кг/м³ для наружных стен сельских малоэтажных зданий [61]. В конце 90-х годов в результате исследований был получен конструкционный керамзитополстиролбетон плотностью 1220 кг/м³, рекомендованный для конструктивных элементов зданий [1]. Доля гранул пенополистирола составляла 20 % в общем объеме заполнителя.

Трестом Укроргтехсельстрой Минсельстроя УССР совместно с НИИСП Госстроя УССР в 1978 г. был получен полистиролбетон плотностью от 350 до 800 кг/м³ на основе дробленых отходов пенопласта Горловского химкомбината с применением 0,2 % воздухововлекающей добавки ЦНИИПС-1. Предел прочности при сжатии полистиролбетона плотности 800 кг/м³ составил 5 МПа, а теплопроводность $\lambda = 0,232$ Вт/(м · К) [41].

В.Р. Клем [33] подбирал составы полистиролбетона на кварцевом песке в диапазоне плотностей 500-1440 кг/м³ и получил довольно низкие значения прочности ПСБ от 16 кг/см² до 35 кг/см². Данный факт можно объяснить принятой Клемом в своих исследованиях предпосылкой, при минимальном расходе вяжущего обеспечить необходимые теплофизические свойства полистиролбетона. Например, расход цемента на 1 м³ полистиролбетонной смеси для плотности 1200 кг/м³ составлял 250 кг/м³, что меньше в 2,5 раза расхода цемента, принятого при подборе составов в данной диссертационной работе.

Во ВНИИЖБе с конца 80-х годов и по настоящее время исследования свойств теплоизоляционного полистиролбетона проводятся под руководством проф. В.А. Рахманова и В. Г. Довжика [16, 17].

В лаборатории научной части Уралпромстройиниипроекта (ныне ОАО институт «УралНИИАС») с середины 80-х годов прошлого века под руководством А. Я. Эппа проводились исследования полистиролбетона Р.В. Сакаевым и В.В. Щербаченко [74, 92-94]. Основными направлениями данных работ было использование гранул вспененного полистирола взамен воздухововлекающих добавок в конструкционно-теплоизоляционном керамзитобетоне, использование полистиролбетона на зольном заполнителе для замоноличивания вертикальных межпанельных стыков в зданиях 97, 137 серий, а также как теплоизоляционного слоя в трехслойных панелях промышленных зданий. Проводились исследования физико-механических свойств полистиролбетонных смесей и отработка технологических параметров. Получено эмпирическое уравнение прочности полистиролбетона для цементно-зольных растворов различного состава [74]:

$$R_{\delta} = R_{раств} \cdot \varphi_p^{2,64}, \quad (1.1)$$

где $R_{раств}$ – кубиковая прочность раствора; φ - количество раствора, м³/м³.

Немецкие исследователи В. Бэтж и В. Ниёмэйер утверждают, что по своим эксплуатационным характеристикам данный материал не уступает другим видам легких бетонов и может быть использован в качестве морозостойкого основания под дорожное покрытие [101]. Ш. Эйк исследовал составы полистиролбетона в диапазоне плотностей от 120 до 980 кг/м³. Данные о прочности на сжатие, растяжение при изгибе, водопоглощению и теплопроводности 10 исследованных составов приводятся в статье «Стиропор-бетон», опубликованной в журнале “Цемент – Известь – Гипс.” за № 6 1959 год [102].

Позже, в 1970 году чешский ученый М. Гвезд [103] опубликовал результаты своих исследований в статье «Полистирольный бетон» журнала «Pozemni stavby», в которой говорится об исследованиях полистиролбетона для применения в стеновых панелях. Исследовался полистиролбетон в диапазоне плотностей от 400 до 1200 кг/м³, прочностью на сжатие от 1 до 8 МПа и прочностью на растяжение от 0,2 до 1,5 МПа.

К. Кохлинг в 1970 году в своих исследованиях получил полистиролбетон наивысшей плотностью 1150 кг/м³ с прочностью на сжатие равной 130 кг/см².

Прочность на сжатие полистиролбетона соответствующая марке М100 (классу В 7,5) была получена на плотности материала 1100 кг/м^3 [104, 105].

По данным В. Суссмана [109, 110] в 1975 году при средней плотности полистиролбетона равной 1000 кг/м^3 была получена прочность на сжатие равная 70 кг/см^2 .

В Германии в 1978 году было выдано первое разрешение на производство теплоизолирующей грунтовой штукатурки «Rhodipor[®] Dämmputz В» состоящей из извести, цемента, гранул вспененного полистирола и специальных добавок, способствующих оптимальной переработке. Данный материал, предлагаемый компанией Rhodius Chemie-Systeme GmbH, представляет собой не что иное, как теплоизоляционный полистиролбетон с плотностью 235 кг/м^3 и прочностью на сжатие $0,5 \text{ Н/мм}^2$. Коэффициент теплопроводности - от $0,063$ до $0,07 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

В 1991 году на основании проведенных исследований югославские ученые М. Муравлев и Дж. Драгика предложили использование полистиролбетона (EPS beton), армированного полипропиленовыми волокнами, как материала для монтажных элементов [99, 100]. Для ПСБ в диапазоне плотностей $1122-1452 \text{ кг/м}^3$ ими были получены значения прочности от $7,73$ до $14,62 \text{ МПа}$. За счет дополнительного армирования полипропиленовыми волокнами было достигнуто увеличение прочности на растяжение при изгибе и снижение трещинообразования.

В 1998 году австрийский ученый Йоханн Литзка изложил результаты исследований конструкций из полистиролбетона для дорожного строительства [105]. Установлено, что полистиролбетон может использоваться в качестве утепляющего среднего слоя в дорожном полотне.

В том же 1998 году в Восточной Европе (в частности в Польше и Чехии) вступили в действие строительные нормы PN 63 01-01-98 и PN 63 02-01-98 относящиеся к теплоизоляционному полистиролбетону и изделиям из него. В республике Словения в 2003 году магистр А. Систерцик представил исследования полистиролбетона, как теплоизоляционного материала перспективного для утепления фасадов стен зданий [114].

Накопленные экспериментальные данные по физико-механическим свойствам полистиролбетона и полученный опыт эксплуатации различных конструкций из него в России позволил ввести в действие с 01.09.1999 г. государственный стандарт «Полистиролбетон. Технические условия.» (ГОСТ Р 51263-99), разработанный под руководством к.т.н., проф. В.А. Рахманова (ВНИИЖБ). Настоящий стандарт устанавливает требования к полистиролбетону и полистиролбетонным смесям класса по прочности на сжатие до В2,5 и марки по плотности до D600.

На территории республики Беларусь теплоизоляционный полистиролбетон был включен в нормативные документы с 1993 года. Институтом строительства и архитектуры Госстроя Белоруссии был разработан способ изготовления теплоизоляционных полистиролбетонных плит. В настоящий момент в республике Беларусь действует аналог СНиП П-3-79* нормативный документ СНБ 2.04.01-97 «Строительная теплотехника», в котором содержатся характеристики для трех марок полистиролбетона по плотности D300, D500 и D600.

Е.Г. Овчаренко [58, 59], генеральный директор АО «Теплопроект» при Госстрое РФ, сообщает о том, что в «Теплопроекте» проведены научные исследования и получены положительные результаты по композиционному материалу – пенополистиролбетону, получившему условное название диппбетон. Он представляет собой композицию, состоящую из пенобетона, образующего непрерывный каркас, и гранул пенополистирола, заполняющих заданный объем в каркасе. Плотность диппбетона может изменяться от 300 до 900 кг/м³. Прочность при сжатии при этом изменяется соответственно от 1,0 до 5,0 МПа. Коэффициент теплопроводности - от 0,065 до 0,15 Вт/(м·К). В зависимости от содержания гранул пенополистирола диппбетон может быть отнесен к негорючим или слабо горючим материалам.

В 1979 году А.А. Евдокимовым совместно с Л.Н. Брусковой, на установке А.А. Гвоздева проводилось исследование прочности сцепления теплоизоляционного полистиролбетона с конструкционным керамзитобетоном под воздействием среза. В начале 80-х годов были начаты исследования свойств теплоизоляционного симпролит полистиролбетона в Научно-исследовательском институте строительной физики (НИИСФ) г. Москва. Данные исследования широко проводятся

и по настоящее время, их результаты реализованы в использующихся в строительстве стеновых блоках плотностью от 150 кг/м^3 до 600 кг/м^3 .

Позже, в 1999 году изменение прочности на отрыв теплоизоляционного полистиролбетона от ячеистого бетона под действием циклического замораживания и оттаивания изучал И.Л. Тонков [88].

В 2000 году В.Г. Парфенов [65] впервые подобрал составы конструктивного стиропорбетона плотностью $800\text{-}1200 \text{ кг/м}^3$ на местном заполнителе из строительного песка, однако физико-механические и эксплуатационные свойства материала были изучены в очень малом объеме, ввиду иной более широкой постановки цели исследования.

Современное состояние в области исследований свойств полистиролбетона, как теплоизоляционно-конструкционного строительного материала показано в монографии Е.А. Король (МИСИ) [37]. Автор отмечает, что при исследованиях технологических особенностей изготовления полистиролбетонов с выявлением оптимальных составов при контролируемых значениях средней плотности и прочности очень редко определялись призмная прочность, прочность на растяжение и модуль упругости.

На основании проведенного обзора и анализа литературных источников, посвященных теме исследования и применения бетонов на полистирольных заполнителях в строительстве, можно сделать следующие выводы:

- Большая часть ранее проведенных исследований посвящена теплоизоляционным характеристикам полистиролбетона в диапазоне плотностей от 200 до 600 кг/м^3 и применению данного материала в качестве утеплителя. Исследования полистиролбетона в диапазоне плотностей от 800 до 1500 кг/м^3 в качестве материала для несущих строительных конструкций и изделий почти не проводились;

- Несмотря на достаточно большой период времени, в течение которого ведутся исследования полистиролбетона, какой-либо расчетной методики, учитывающей фактические свойства данного материала, отличной от методик расчета и проектирования конструкций из легких бетонов на пористых заполнителях и ячеистых бетонов, обобщающей полученные различными исследователями результаты, для него не было создано;

- При анализе литературных источников результатов экспериментальных испытаний деформационных характеристик полистиролбетона средней плотностью более 1000 кг/м^3 , таких как трещиностойкость и модуль упругости, имеющих для применения этого материала большое значение вследствие его свойств, автором не обнаружено.

Анализ приведенных в литературном обзоре работ, в разной степени затрагивающих вопрос о прочности и деформативности теплоизоляционно-конструкционного полистиролбетона сравнительно с хорошо изученными характеристиками обычных тяжелых и легких бетонов позволяет сделать следующие выводы:

- экспериментальные данные о зависимости прочности и деформативности полистиролбетона от его состава и прилагаемой нагрузки в некоторой степени противоречивы, так как исследователи пользовались в своих опытах различными методиками;

- не достаточно широко исследованы прочностные, деформационные и эксплуатационные характеристики конструкционного полистиролбетона плотностью в пределах от 800 до 1500 кг/м^3 ;

- базирующегося на всех ранее проведенных исследованиях четкого математического механизма для определения теплотехнических характеристик полистиролбетона, в наибольшей мере зависящих от состава материала, не построено.

В связи с выше изложенным, **целью** диссертационной работы является разработка рациональных составов, выбор технологии изготовления и изучение прочностных, деформационных и эксплуатационных характеристик полистиролбетона, как конструкционного и теплоизоляционного материала, в том числе и под длительным воздействием нагрузки.

Прочностные и деформационные характеристики полистиролбетона, такие как прочность на сжатие, на растяжение, модуль упругости, коэффициент Пуассона, усадка, ползучесть и температурные деформации являются основными величинами, необходимыми для расчета несущей способности и проектирования конструкций из него. В свою очередь исследование прочностных и деформаци-

онных характеристик полистиролбетона возможно только вместе с исследованием его эксплуатационных характеристик.

Задачи диссертационной работы вытекают из сформулированной цели и заключаются в том, чтобы:

1. Разработать рациональные составы полистиролбетона в диапазоне плотностей от 800 до 1450 кг/м³ для изготовления несущих строительных конструкций и выбрать технологию изготовления полистиролбетонных изделий с использованием местных материалов и химических добавок.

2. Изучить прочностные, деформационные и эксплуатационные характеристики полистиролбетона, построить аналитические зависимости данных характеристик полистиролбетонов от их составов и технологии изготовления.

3. Экспериментально подтвердить возможность применения полистиролбетона в диапазоне плотностей от 800 до 1450 кг/м³ в несущих конструкциях и изделиях стеновых блоков и перемычек.

4. На основе полученных результатов испытаний прочностных, деформационных и эксплуатационных характеристик полистиролбетона разработать предложения по совершенствованию методики расчета и проектирования несущих конструкций и изделий из полистиролбетона.

2 Характеристики материалов и методики исследования. Подбор составов полистиролбетона.

Предварительные исследования, ранее проведенные в научной части УралПромстройНИИпроекта, результаты испытаний советских и зарубежных исследователей прошлых лет, накопленный опыт технологических особенностей изготовления материала и испытания конструкций в ОАО институт «УралНИИАС» показали, что применение полистиролбетона (ПСБ) в качестве материала для несущих бетонных и железобетонных конструкций и изделий возможно наравне с керамзитобетоном, ячеистым бетоном и крупнопористым шлаковым бетоном.

Анализ и обобщение экспериментальных данных позволили выбрать для исследования прочностных, деформационных и эксплуатационных характеристик рациональные составы конструкционных полистиролбетонов, приведенные в таблицах П1.1 и П1.2 Приложения 1. Расход материалов в данных таблицах приведен для 1 м³ полистиролбетона плотностей 800-1500 кг/м³.

Составы полистиролбетона подбирали с учетом требований ГОСТ 27006-86, на основе методики НИИЖб, а необходимое количество составляющих уточнялось расчетно-экспериментальным методом. Учитывались результаты ранее проведенных исследований по подбору составов теплоизоляционного полистиролбетона В.Р. Клема [33], Парфенова [65] и И. Л. Тонкова [88].

Исходная предпосылка о применении для заполнения межзерновой пустотности цементной матрицы повышенной прочности и плотности была заложена в основу при проектировании составов полистиролбетона.

Т. И. Милых [45] отмечает, что применение воздухововлекающей добавки значительно понижает коэффициент теплопроводности полистиролбетона (на 20 %) за счет меньшего диаметра образующихся воздушных пор цементного теста-камня по сравнению с размером пор, в которых находятся гранулы полистирола. С другой стороны, дополнительная пористость цементной матрицы в результате применения воздухововлекающей добавки снижает прочностные показатели полистиролбетона на 10-15 %.

Исходя из данных ранее проведенных исследований, так как основной характеристикой конструкционного полистиролбетона плотностей 1000-1500 кг/м³ была принята прочность, при подборе составов нами использовалась пластифицирующая добавка, позволяющая получить менее поризованную структуру цементно-песчаной или цементно-шлаковой матрицы.

С целью получения рациональных составов полистиролбетона использовались различные методы, принятые в технологии легких бетонов, включая методы математического планирования экспериментов. В качестве факторов варьирования, выбраны основные структурно-технологические характеристики материала – плотность и прочность. С этой целью реализован трехфакторный рототабельный план второго порядка, данные экспериментов обработаны на ЭВМ.

Прочностные и деформационные характеристики полистиролбетона зависят от его состава и технологии изготовления. Исследование зависимости характеристик полистиролбетона от этих факторов является большим самостоятельным исследованием, выполнение которого в данной работе не планировалось. Было принято решение исследовать только два вида полистиролбетона:

- 1) для стеновых блоков и наружных слоев трехслойных панелей;
- 2) для перемычек.

В процессе выполнения диссертационной работы представляло интерес получение 2-х различных по свойствам видов оптимальных составов:

- 1) полистиролбетона марок по плотности D 800-1000 с коэффициентом теплопроводности 0,2-0,27 Вт/м·К, при относительно высокой прочности (класса на сжатие В3,5 - В5) для обеспечения теплозащитных свойств ограждающих стеновых конструкций;
- 2) полистиролбетона марок по плотности D 1000-1500 повышенной прочности класса на сжатие В5 – В12,5) для несущих армированных конструкций, с коэффициентом теплопроводности 0,27-0,34 Вт/м·К.

Полистиролбетон на цементно-песчаном или цементно-шлаковом вяжущем представляет собой сложную систему, содержащую гидрофобные и гидрофильные частицы и полярную жидкость (воду), которая не смачивает гидрофобную поверхность пенополистирола. Поэтому одним из условий формирования более

прочных контактов в данной системе является создание промежуточных слоев из тонких пленок, обеспечивающих хорошую сцепляемость одновременно с пенополистиролом и цементом с помощью химической добавки. Прочность полистиролбетона может рассматриваться как прочность цементной матрицы с включением в ее объем шарообразных гранул полимера (пенополистирола) различного размера, плотности и прочности.

С увеличением содержания пенополистирола в составе полистиролбетона, увеличивается роль его влияния на свойства композита. При использовании полистирольных гранул с низкими характеристиками получение требуемой прочности полистиролбетона достигается увеличением плотности пенополистирола и увеличением прочности цементной матрицы за счет повышения расхода цемента.

Во избежание увеличения расхода цемента, и, следовательно, плотности полистиролбетона, прочность его цементной матрицы можно повысить (особенно в ранние сроки твердения) путем введения добавок-ускорителей твердения, а также посредством применения активации вяжущего.

Как отмечалось нами в работе [29] и с учетом исследований НИИЖБ [45] установлено, что для достижения наиболее высокой прочности конструкционно-теплоизоляционных и конструкционных полистиролбетонов необходимо использовать высокоактивные цементы или технологические приемы, повышающие активность вяжущего, в частности методы механо-химии.

Обработка гранул полистирола известковым молоком с целью повышения их прочности была принята на основании ранее проведенных Р.В. Сакаевым и В.В. Щербаченко в ОАО институт «УралНИИАС» испытаний [74]. Согласно результатам подбора составов, в составах полистиролбетона на зольном заполнителе при предварительной обработке гранул известковым молоком было установлено повышение прочности образцов на 15 % относительно контрольных составов.

Введение известкового молока в состав бетонной смеси имеет свои положительные и отрицательные стороны. Положительными являются значительное повышение прочности полистиролбетона в результате обработки гранул и химической реакции с тонкой фракцией шлакового заполнителя.

Отрицательной, в нашем случае, является повышение водоцементного отношения в полистиролбетонной смеси и большая пористость материала, а также некоторое снижение пластифицирующего эффекта от использования химической добавки.

Помимо этого, увеличению прочности полистиролбетона заданной плотности способствует повышение насыпной плотности пенополистирольного заполнителя, которое связано с уменьшением его межзерновой пустотности, размеров зерен, а также с увеличением плотности (деформативности) самих полистирольных зерен.

Известно, что при температуре нагрева более $+ 80^{\circ}\text{C}$ начинается деструкция гранул полистирола находящихся в поверхностных слоях образцов полистиролбетона с выделением газообразного стирола, являющегося токсичным химическим соединением. Большая часть стирола при этом, по данным исследований НИИСФ [3], остается блокированной в замкнутых порах-ячейках и, впоследствии, полностью поглощается бетоном, окружающим ячейку растворной матрицы. Процесс выделения стирола внутри ячеек с гранулами идет и при более низких положительных температурах в диапазоне от $+40$ до $+80^{\circ}\text{C}$, но в таких незначительных объемах сравнительно с ПДК, которые практически не влияют на экологическое состояние окружающей среды при длительном сроке эксплуатации конструкции. На практике пенополистирольный заполнитель в составе бетона выдерживает все температуры, которые имеют место в типовом строительстве. Таким образом, растворная матрица, окружающая гранулы, способствует большей экологичности материала несущих полистиролбетонных конструкций.

По данным исследований [76] конструкционно-теплоизоляционный полистиролбетон удовлетворяет санитарно-гигиеническим требованиям по величине ПДК свободного стирола и относится к группе трудногорючих материалов с малой дымообразующей способностью [81, 89], что имеет немаловажное значение при использовании его в стеновых конструкциях.

2.1 Материалы и технология для изготовления экспериментальных образцов

Для подбора составов конструкционного полистиролбетона в ходе основного эксперимента применяли следующие материалы: портландцемент, кварцевый песок и доменные гранулированные шлаки и феррохромный шлак, вспененный полистирол, несколько видов химических добавок, известковое молоко и вода.

2.1.1 Гранулированный пенополистирол

В ходе предварительных экспериментов нами были проведены испытания прочности на сжатие полистиролбетонных образцов, изготовленных с использованием основной фракции гранул пенополистирольного заполнителя в 2,5-5,0 мм, смеси фракций 2,5-5,0 мм и 5,0-10 мм, смеси фракций 5,0-10,0 мм и 10,0-15 мм. Содержание пенополистирольного заполнителя на $1,0 \text{ м}^3$ смеси было принято одинаковым и составляло $0,9 \text{ м}^3$.

Наилучшие прочностные показатели были получены при использовании основной фракции гранул пенополистирольного заполнителя в 2,5-5,0 мм. Использование крупных фракций пенополистирольного заполнителя делает полистиролбетон менее прочным частично за счет малой прочности самого заполнителя, частично из-за ослабления соответственно крупными условными отверстиями сечения растворной матрицы. По данным, приведенным в [107], для большей части легких бетонов при снижении максимальной крупности заполнителя на 9-10 мм можно ожидать роста прочности приблизительно на 10%.

Исходя из прочностных показателей материала, нами был выбран для использования вспененный полистирольный гравий, имеющий по гранулометрическому составу (по объему) сравнительно малую основную фракцию в 2,5-5,0 мм. Так как фракция основного заполнителя в виде гранул полистирола была выбрана постоянной, при подборе необходимых составов ПСБ определение плотности упаковки было выполнено по упрощенной схеме, на основании готовых формул, полученных в работах Тонкова [88], а также польских исследователей А. Виенковски и Ф. Стека [114, 115].

Свойства вспененного полистирола при подборе составов учитывали по работе [63]. Материал изготавливался методом теплового удара по специальной технологии из полистирольного бисера марки ПСВ-76С производства завода АО «Салаватнефтеоргсинтез» по ТУ 38.602-22-57-96. Малый размер зерен способствовал более низкой концентрации напряжений в ячейках, занятых зернами. Насыпная плотность гравия составляла 12 -18 кг/м³.

Пустотность полистирола выбранной фракции составила $V_{п} = 40 \%$.

Пористость гранул носит закрытый характер и составляет 50-70 %.

Прочность при сжатии при 20 % деформации в стандартном цилиндре в соответствии с ГОСТ 9758-86* составила 0,065 МПа.

Теплопроводность пенополистирола в сухом состоянии в засыпке находилась в пределах 0,034-0,04 Вт/(м·К), водопоглощение при погружении в воду на 7 дней не превышало 1,5 % от объема. Сорбционная влажность пенополистирола составляла 3-6% в массе.

При определении гранулометрического состава вспененного полистирола путем отсева через сита стандартного размера с ячейками диаметром 5 и 2,5 мм, насыпной объем пенополистирола был разделен на две фракции.

На 1,0 м³ полистирольного заполнителя приходится:

Гранул диаметром 2,5-5 мм – 70% при насыпной плотности 21 кг/м³;

- диаметром 0,5-2,5 мм – 25% при насыпной плотности 20 кг/м³.

- диаметром менее 0,5 мм – 5% при насыпной плотности 25 кг/м³.

Базовой в данном случае соотношения фракций является фракция «переходной зоны» и относительный коэффициент пустотности полистиролбетонной смеси примет вид функции:

$$P = X_k p_k + X_m p_m + f(\psi); \quad (1.3)$$

Вид данной функции показан на рисунке 2.1 ниже:

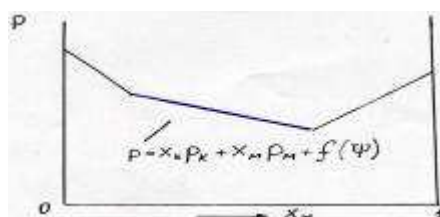


Рисунок 2.1 – Зависимость коэффициента пустотности от фракции и ПСБ смеси

2.1.1 Вяжущее вещество

В качестве вяжущего использовался портландцемент ПЦ 400-Д0 (без минеральных добавок) ОАО «Сухоложский цемент» (г. Сухой лог Свердловской обл.), свойства соответствуют ГОСТ 10178-85. Количество химически связываемой воды составляет 17% от массы цемента (по данным производителя). Активность цемента определяли в испытательной лаборатории ОАО институт «УралНИИАС» дополнительно на образцах-балочках размером 40x40x160 мм по методике принятой в ГОСТ 310.4 – 81.

Технические характеристики, химический и минералогический состав цемента, приняты согласно паспорту качества, предоставленному предприятием - производителем и приведены в Приложении 1.

2.1.3 Заполнители

На стадии постановочного эксперимента, при подборе составов, в качестве заполнителей для конструкционного полистиролбетона использовали техногенные отходы металлургических предприятий Уральского региона.

Были опробованы доменные гранулированные шлаки ОАО «Металлургического завода им. А.К. Серова» и ОАО «Нижнетагильского Металлургического Комбината», феррохромный самораспадающийся шлак Серовского завода ферросплавов (ТУ 14-11-325-97), а также молотый мартеновский шлак ЗАО «Нижне-Сергинского Метизно-металлургического завода».

Химический состав шлаков Металлургического завода им. А.К. Серова, ОАО «Нижнетагильского Металлургического Комбината» и ОАО «Серовского завода ферросплавов» был принят согласно лабораторным исследованиям проб заполнителей, проведенным Аналитическим испытательным центром «Уральской центральной лаборатории» и данным заводских лабораторий. Химический состав молотого мартеновского шлака ЗАО «НСММЗ» принимался согласно данным письма № 21 Технического управления ЗАО «НСММЗ» к ОАО институт «УралНИИАС» от 18.06.2003 г.

Характеристики техногенных заполнителей приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Характеристики техногенных заполнителей

Вид заполнителя	Насыпная плотность, кг/м ³	Истинная плотность, кг/м ³	Прочность при сдавливании в цилиндре, МПа
Доменный гранулированный шлак ОАО «Металл-й завод им. А.К. Серова»	1050	2410	23
Доменный гранулированный шлак ОАО «НТМК»	1540	2790	18
Феррохромный самораспадающийся шлак «СФЗ»	1060	2910	20
Мартеновский молотый шлак ЗАО «НСММЗ»	1400	3470	18

Наиболее целесообразным заполнителем, в результате сравнения совокупности прочностных показателей и относительных плотностей подобранных составов, был выбран доменный гранулированный шлак ОАО «Металлургического завода им. А.К. Серова» мелкого фракционного состава 0-5 мм [5, 6, 29, 54, 57].

С точки зрения химии твердого тела отличительной чертой доменных гранулированных шлаков от других техногенных отходов является стеклообразное состояние данного вида шлаков. Этот вид шлака представляет собой мелкие частицы с крупностью песка. С точки зрения строительного материаловедения его можно использовать в качестве заполнителей для легких бетонов, в том числе и полистиролбетонов. Кроме того, в шлаке присутствует около 10 % пылеобразной фракции. Для заполнителя это является вредной примесью, но именно в доменном гранулированном шлаке ОАО «Металлургического завода им. А.К. Серова» эта фракция может выступать в качестве активной добавки к цементу, существенно повышающей прочность растворной матрицы полистиролбетона. При введении тонкомолотого наполнителя с насыпной плотностью меньше, чем у портландцемента, в замене портландцемента от 5 до 30% по массе происходит заполнения объема пустот. Поэтому при меньших расходах цемента прочность бетона выше, чем в композициях без наполнителя.

Модуль основности доменного граншлака ОАО «Металлургический завод им. А.К. Серова» больше 1,0, поэтому он относится к группе основных шлаков.

Результаты предварительных экспериментов по подбору заполнителей обобщены в отчете о научно-исследовательской работе автора «Исследование свойств полистиролбетона, как строительного материала на основе техногенных отходов металлургических предприятий и ТЭС Уральского региона» [29].

Помимо составов с заполнителями из шлаков был подобран контрольный состав полистиролбетона без инертных заполнителей и составы с заполнителем из дробленого кварцевого песка ЗАО «карьер Гора Хрустальная» наибольшей фракцией до 0-5 мм по ТУ 571726-002-45588031-01. Гранулометрический анализ заполнителя по данным производителя: Диаметр эквивалентный ($d_{экв}$) - 2,25 мм; 80%-ный калибр материала (d_{80}) - 3,26 мм; 10%-ный калибр материала (d_{10}) - 2,14 мм; Коэффициент неоднородности (K_n) - 1,52. Гранулометрический состав приведен в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Гранулометрический состав кварцевого песка ЗАО «карьер Гора Хрустальная»

№ п/п	Калибр сита, мм	Остаток на сите		Прошло через сито		Pi/di
		г	%	г	%	
1	6,0	0	0,0%	100,3	100,0%	0,000
2	5,0	3	3,0%	97,3	97,0%	0,006
3	3,0	33,4	33,3%	63,9	63,7%	0,111
4	2,5	31	30,9%	32,9	32,8%	0,124
5	2,0	24,8	24,7%	8,1	8,1%	0,124
6	1,0	8	8,0%	0,1	0,1%	0,080
7	0,0	0,1	0,1%	0	0,0%	

Гранулометрический состав заполнителей, принятый на основании результатов пробных замесов в процессе постановочного эксперимента, строго выдерживался в замесах в продолжение всего основного эксперимента.

Соотношение максимальных размеров гранул основного заполнителя и фракций инертного заполнителя удовлетворяет нормативным значениям таблиц справочника, рекомендуемым СЕВ и FIP для легких бетонов [107].

Кварцевый песок ЗАО «Карьер Гора Хрустальная» удовлетворяет требованиям ГОСТ 8736-93. Гранулированный доменный шлак ОАО «Металлургического завода им. А.К. Серова» квалифицируется по ГОСТ 25137-82 «Материалы не-

рудные строительные, щебень и песок плотные из отходов промышленности, заполнители для бетона пористые». Истинная плотность инертных заполнителей, необходимая для проектирования составов конструкционного полистиролбетона, определяли по ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний» с помощью прибора Ле Шателье [29].

Химический состав доменного гранулированного шлака определялся в Аналитическом испытательном центре ОАО «Уральская центральная лаборатория». Протокол испытаний и Гигиеническое заключение на шлак приводятся в Приложении 1 к данной работе. Гидравлическая активность доменного гранулированного шлака принята по данным лаборатории ОАО «Металлургического завода им. А.К. Серова». Были также проведены радиологические исследования используемых заполнителей. Результаты лабораторных испытаний приведены в протоколах Центра ЦГСЭН (Приложение 1).

Характеристики доменного гранулированного шлака также были приняты согласно Паспорту № 0002-III ГД «Технологического процесса переработки месторождения. Объект учета: Установка по грануляции шлака.», составленному организациями ГНЦ РФ ОАО «Уральский институт металлов» и ОАО «Металлургического завода им. А.К. Серова». Гигиеническое заключение на доменный шлак приведено в Приложении 1.

При введении в состав полистиролбетона заполнителя в виде песка или шлака экономится вяжущее, однако при этом снижаются прочностные свойства. Расход заполнителя в данной работе был принят в пределах 280-470 кг/м³ на основании экспериментальных данных, полученных автором в работе [29].

2.1.4 Химические добавки

На предварительном этапе эксперимента нами были опробованы такие химические добавки используемые в производстве полистиролбетона, как: «КФ- адгезив», триэтаноламин, ПВА, С-3, «Реламикс Т-2», СДО.

Изначально нами экспериментальным путем определялась оптимальная дозировка данных добавок в полистиролбетонной смеси, а затем исследовалась кинетика набора прочности образцов на оптимальных составах.

При выборе учитывалась совокупность показателей рыночной стоимости как самих добавок, так и предлагаемого полистиролбетона, простота применения и полученный эффект комплексного улучшения свойств полистиролбетонной смеси и материала.

Наибольший прирост прочности на 28 % в возрасте 28 суток в сравнении с остальными добавками был получен при использовании химической добавки «Реламикс Т-2» производства Первоуральского завода ОАО «Полипласт-УралСиб».

Оптимальная дозировка данной добавки составила 0,6 % от массы цемента для плотностей материала от 800 до 1000 кг/м³ и 1,0 % от массы цемента для плотностей от 1100 до 1500 кг/м³.

При применении химической добавки «Реламикс Т-2» в количестве 0,6-1,0 % от массы цемента было достигнуто некоторое снижение степени поризации конструкционного полистиролбетона и уменьшение водо/твердого отношения при заданной подвижности смеси большее на 15%, чем у других сравниваемых химических добавок.

Эффективность применяемой добавки для полистиролбетона оценивалась также по понижению величины краевого угла смачивания (повышению гидрофильности поверхности цементного камня).

Измерение величины краевого угла смачивания производилось методом «лежащей капли» (оптическим для твердых тел). Угол смачивания рассчитывался по формуле:

$$\operatorname{Tg} \theta = 4dh/d^2 - 4h^2, \quad (2.1.1)$$

В таблицах 2.2. и 2.3. приведены результаты экспериментальных исследований по определению краевого угла смачивания. Результаты, представленные в таблицах это среднее значение из 10 опытов одного эксперимента. Угол смачивания определялся по ГОСТ 7934,2-74 «Масла часовые. Метод краевого угла смачивания».

Эксперимент показал, что полистирол не обладает гидрофобной поверхностью, и при этом угол смачивания составил меньше 90° на чистой воде, но он больше угла смачивания поверхностей обработанных химическими добавками. Следует отметить, что все исследованные добавки повышают гидрофильность поверхности полистирола.

Таблица 2.2. - Влияния вида добавки на угол смачивания на гладкой поверхности

Вид добавки	Вода	Триэтанолламин	С-3	ПВА	СДО	КФ-адгезив	Реламикс Т-2
Угол смачивания	86	48	46	37	45	45	32

Таблица 2.3. - Влияния вида добавки на угол смачивания на шероховатой поверхности

Вид добавки	Вода	Триэтанолламин	С-3	ПВА	СДО	КФ-адгезив	Реламикс Т-2
Угол смачивания	86	48	46	37	44	44	32

Использование химической добавки из группы смесей натриевых солей полиметиленафталинсульфокислот обусловлено исследованиями авторов [39], установивших наилучшую способность адгезии цемента к гранулам полистирола при использовании добавок модификаций С-3. Согласно исследованиям О.В. Журбы [25, 26], хорошая окатываемость цементным слоем поверхности полистирольных гранул, в данном случае, связана с высокой дисперсностью частиц, обеспечивающих большую площадь истинных контактов.

Применение химической добавки «Реламикс Т-2» в составе полистиролбетонной смеси позволяет при заливке конструкции увеличить сопротивление движению полистирольных гранул вверх (они пытаются всплыть и расслоить смесь).

Достигается эффект равномерного распределения гранул по объему, как при использовании воздухововлекающих добавок СДО и KF-адгезив.

Таким образом, повышение слитности структуры конструкционного полистиролбетона в составах различной плотности и улучшение формовочных свойств смеси достигалось с помощью предварительной обработки полистирольных гранул известковым молоком и применением химической добавки - пластификатора «Реламикс-2». Данная химическая добавка изготавливается по ТУ 5870-002-14153664-04 с изм. № 1 «Реламикс Т-2» соответствует требованиям ГОСТ 24211-91 «Добавки для бетонов. Общие технические условия».

По эффективности химическая добавка «Реламикс Т-2» соответствует требованиям к пластифицирующим добавкам, предъявляемым ГОСТом 30459-96 «Добавки для бетонов. Методы определения эффективности».

Зависимость прочности на сжатие образцов конструкционного полистиролбетона, изготовленных с применением различных химических добавок показан на рисунке 2.1.1.

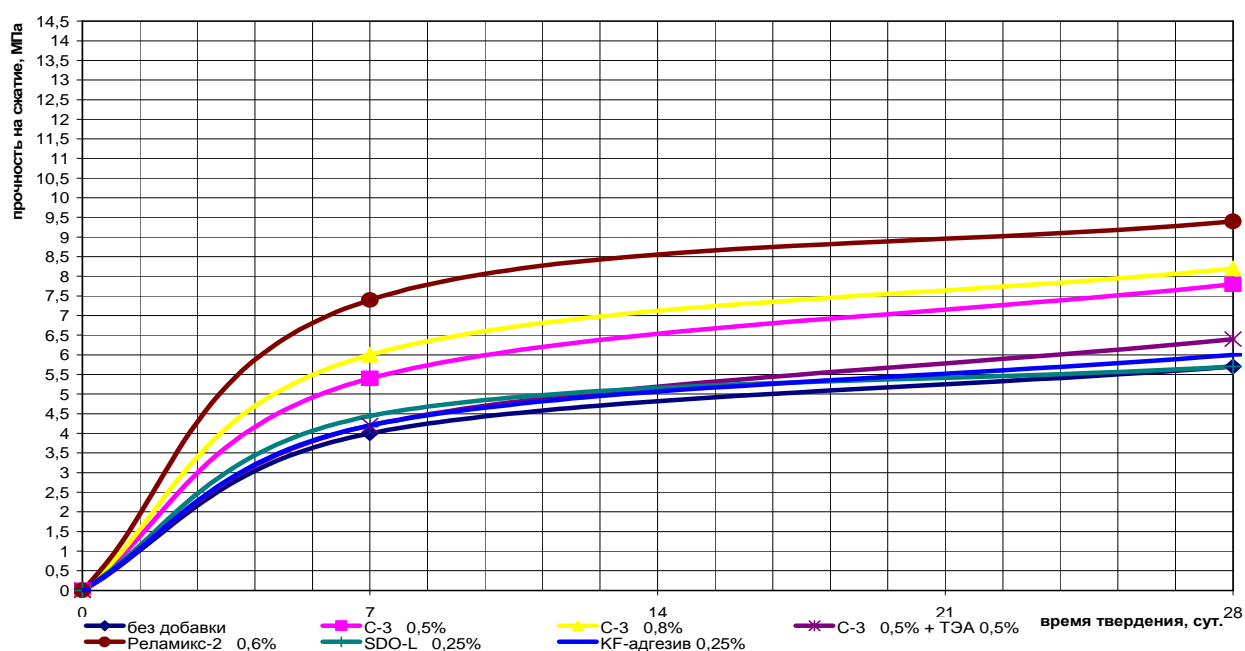


Рисунок 2.1.1 – Зависимость прочности на сжатие образцов конструкционного полистиролбетона плотностью 1000 кг/м^3 , изготовленных с применением различных хим. добавок от времени твердения

Исходя из критерия полученной наибольшей кубиковой прочности на сжатие при одинаковых плотностях полистиролбетонных образцов для применения в

ходе основного эксперимента нами была выбрана химическая добавка «Реламикс Т-2» [29].

2.1.5 Вода

Для изготовления полистиролбетонной смеси и поливки полистиролбетона применяли воду с водородным показателем $pH \geq 4$ содержащую минеральные соли не более 5000 мг/л, в том числе не более 2700 мг/л сульфатов (в пересчете на SO_4) и удовлетворяющую требованиям ГОСТ 23732-79.

Минимальный расход воды при осадке конуса 0 см и жесткости 30 с составил 158 л на 1 м³ полистиролбетонной смеси. При увеличении количества воды затворения в составе материалов свыше В/Ц=0,35 возникает риск нарушения равномерности распределения гранул полистиролбетона в ПСБ смеси и ее дальнейшего расслоения. Гранулы полистиролбетона в процессе замеса всплывают на поверхность. Уменьшение количества воды в составе ПСБ смеси достигалось с помощью применения пластифицирующих добавок.

2.2 Изготовление экспериментальных образцов и исследование характеристик полистиролбетонной смеси, составы исследованных бетонов

Количественное содержание вяжущего в полистиролбетонной смеси, а именно цемента ПЦ400-Д0, было принято в пределах 500-700 кг/м³. Водоцементное отношение для всех составов полистиролбетонных смесей в исследуемом диапазоне плотностей не было постоянным, и изменялось от 0,27 до 0,37.

На основании анализа результатов проведенных нами исследований был разработан симплекс-решетчатый план и выведена математическая модель изменения плотности полистиролбетона при различном сочетании исходных компонентов (количество цемента с хим. добавкой «Реламикс» обозначено x_1 , песка – x_2 , полистирола – x_3).

Математическая модель для средней плотности, кг/м³, в кодированных значениях:

$$\rho_{cp} = 1900 \cdot x_1 + 1720 \cdot x_2 + 150 \cdot x_3 - 60x_1 \cdot x_2 - 2020x_1 \cdot x_3 - 690x_2 \cdot x_3 - 6960x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

Результаты экспериментов представлены графически для изменения предела средней плотности на рисунке 2.1:

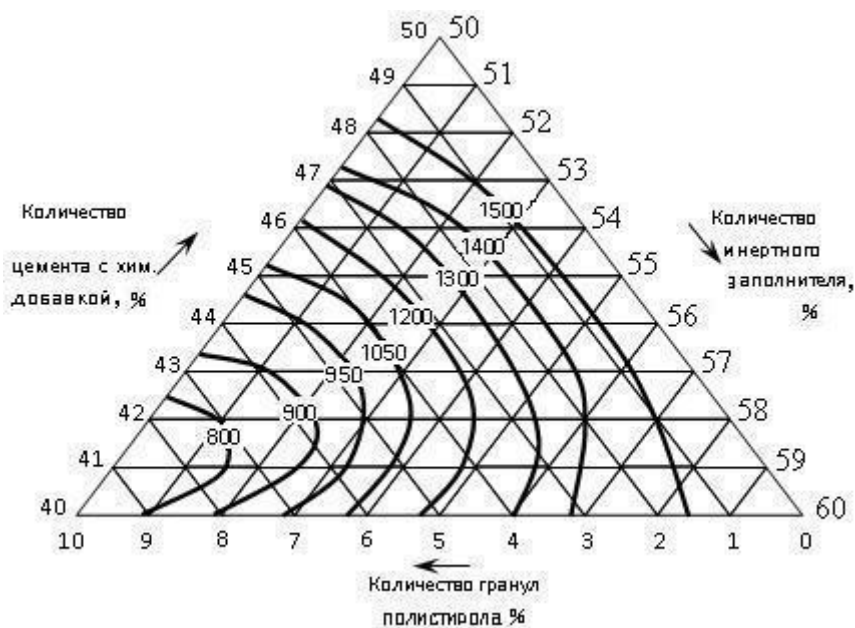


Рисунок 2.1 - Изолинии средней плотности полистиролбетона, кг/м³

Критерий Фишера для представленной математической модели составляет 0,95. Коэффициент корреляции с фактическими данными $r=0,998$.

Образцы полистиролбетона изготавливались на следующих рациональных составах, приведенных в таблицах 2.2.1, 2.2.2 и 2.2.3.

Таблица 2.2.1 - Составы конструкционного полистиролбетона на кварцевом песке ЗАО «Карьер Гора хрустальная»

№ п/п	Наименование материалов	Единицы измерений	Расход для полистиролбетона плотностью, кг/м ³						
			800	900	1000	1100	1250	1350	1450
1	Портландцемент М400 ДО	кг	450	518	640	700	740	780	820
2	Вода	л	158	182	230	245	267	285	300
3	Гранулы пенополистирола	м ³	0,95	0,95	0,9	0,8	0,8	0,75	0,72
4	Заполнитель	кг	280	330	350	370	390	420	450
5	Химическая добавка	% от т цемент-та	0,6	0,6	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0

Таблица 2.2.2 - Составы конструкционного полистиролбетона на доменном гранулированном шлаке ОАО «Металлургического завода им А.К. Серова»

№ п/п	Наименование материалов	Единицы измерений	Расход для полистиролбетона плотностью, кг/м ³						
			800	900	1000	1100	1250	1350	1450
1	Портландцемент М400 Д0	кг	450	518	694	600	650	795	800
2	Вода	л	158	182	220	245	245	245	280
3	Гранулы пенополистирола	м ³	0,95	0,95	0,9	0,8	0,8	0,75	0,72
4	Заполнитель	кг	280	330	230	330	350	440	470
5	Химическая добавка	% от т цем.-та	0,6	0,6	0,6	0,8	1,0	1,0	1,0

Таблица 2.2.3 - Составы конструкционного полистиролбетона на доменном гранулированном шлаке ОАО «НТМК»

№ п/п	Наименование материалов	Единицы измерений	Расход для полистиролбетона плотностью, кг/м ³					
			950	1000	1100	1250	1350	1450
1	Портландцемент М400 Д0	кг	580	625	680	720	790	800
2	Вода	л	240	240	245	250	245	280
3	Гранулы пенополистирола	м ³	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6	0,6
4	Заполнитель	кг	195	230	330	245	430	460
5	Химическая добавка	% от т цем.-та	0,6	0,6	0,8	0,6	0,6	0,8

Образцы для испытаний в ходе основного эксперимента изготавливались одновременно с конструкциями стеновых перемычек и блоков в переносных металлических формах с откидными бортами в соответствии с требованиями ГОСТ 22685-77. Для обоснования рациональной области применения конструкционного полистиролбетона были исследованы технологические свойства полистиролбетонной смеси: плотность и удобоукладываемость. Перемешивание полистиролбетонной смеси производилось в бетономешалке с горизонтальным валом.

Подвижность полистиролбетонной смеси определили по ГОСТ 10181.1-2000 «Смеси бетонные. Методы испытаний». Подвижность смеси характеризуется величиной осадки конуса (ОК) измеряемой в см. Этот показатель и показатель прочности на сжатие образца в возрасте 28 суток были основными критериями оценки эффекта при выборе пластифицирующей добавки. Полистиролбетонная смесь без добавок не обладает подвижностью, т.е. ОК=0. Применение пластифицирующей добавки увеличивает подвижность смеси и ОК составляет 11-15 см. Смесь относится к категории умеренно подвижных.

Плотность смеси определяли по ГОСТ 10181.2-2000. Плотность смеси характеризуется соотношением массы уплотненной смеси к ее объему.

Для испытания одной пробы плотность определяли трижды.

$$\rho = (m - m_1)/V, \quad (2.2.1)$$

где m – масса мерного сосуда с полистиролбетонной смесью, г.;

m_1 - масса мерного сосуда без смеси, равная 475 г;

V - объем мерного сосуда, равный 1,17 л.

$$\rho_1 = (1935-475)/1,17 = 1247,9 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_2 = (1939-475)/1,17 = 1251,3 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_3 = (1943-475)/1,17 = 1254,7 \text{ кг/м}^3; \quad \rho_{\text{ср}} = 1251 \text{ кг/м}^3.$$

Расслаиваемость полистиролбетонной смеси характеризуется величиной раствороотделения и определяется по ГОСТ 10181.4-2000.

Показатель раствороотделения полистиролбетонной смеси Π_p в % определяли по формуле:

$$\Pi_p = \frac{m_{\text{рв}} - m_{\text{рн}}}{m_{\text{рв}} + m_{\text{рн}}} \cdot 100\% \quad (2.2.2)$$

где $m_{\text{рв}}$, $m_{\text{рн}}$ - масса растворной составляющей смеси, находившейся в верхней и нижней частях формы, г;

Средние величины из пяти испытаний составляют: $(m_{рв}-m_{рн})_{\text{верхн}} = 19,54$ и $(m_{рв}-m_{рн})_{\text{нижн}} = 20,43$.

Из формулы 2.2.2 получаем $P_p = 2,2 \%$, что находится в пределах нормы.

Важной технологической характеристикой полистиролбетонной смеси является ее удобоукладываемость. В ходе предварительного эксперимента было установлено, что полистиролбетонная смесь пластичностью до 1,0 см по конусу СтройЦНИИЛа обладает достаточной удобоукладываемостью, чтобы при вибрации на лабораторном столе под пригрузом 50 кг/см^2 в течение 30 с. она бы плотно заполнила бы форму.

Исследовались образцы с двумя режимами твердения:

- При естественном режиме твердения образцы подвергались распалубке в возрасте 7 суток. До подготовки к испытаниям, образцы хранились в лабораторном помещении со среднегодовым температурно-влажностным режимом $t = 20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ и $W = 75 \pm 10^{\circ}\text{C}$, завернутыми в полиэтиленовую пленку в присутствии влажных опилок. Это способствовало быстрому их набору прочности.

- При тепловлажностном режиме твердения образцы находились в следующих условиях, выбранных наиболее рациональными в соответствии с рекомендациями лаборатории НИИЖБ [32, 46, 47]:

- предварительная выдержка – 1,0 -1,5 ч.;
- подъем температуры до $+75^{\circ}\text{C}$ – 3-3,5 ч.;
- термосное остывание – 19-20 ч.

Так же был опробован режим ТВО предлагаемый для конструкций из полистиролбетона ВНИИСТРОМ им. Будникова:

- предварительная выдержка – 3,0 ч.;
- подъем температуры до $+70^{\circ}\text{C}$ – 2,5 ч.;
- изотермическая выдержка при $+70^{\circ}\text{C}$ – 10 ч.;
- термосное остывание – 1,5 ч.

Экспериментально установлено, что данная технология более удобна для изготовления теплоизоляционного полистиролбетона в диапазоне низких плотностей с большим объемным содержанием основного заполнителя – пенополистирола и меньшим размером растворной составляющей между гранулами.

Были опробованы варианты ТВО для изготовления строительных изделий из полистиролбетона, разработанные и предложенные ВЗИСИ, МГСУ и УралпромстройНИИпроектом и выбран наиболее рациональный вариант НИИЖба (с дополнениями) с учетом достижения наилучшей прочности изделия при необходимой теплопроводности и наименьших экономических затратах.

От выбора оптимального режима термообработки в определенной мере зависят физико-механические показатели полистиролбетона. При быстром повышении температуры (в течение 20-25 минут) в образцах полистиролбетона возникают деформации. Предварительная выдержка образцов необходима для предупреждения ухудшения качества образцов во время нагревания. В течение часа смесь частично схватывается и набирает некоторую прочность, чтобы не разрушиться под действием давления, развиваемого подвспенивающимися гранулами полистирола, разрыхляющими внутреннюю структуру образцов.

Экспериментально было установлено, что соотношение между вяжущим и заполнителем не влияет на равномерность распределения гранул полистирола в объеме полистиролбетона.

Для обеспечения более однородной структуры полистиролбетона, для исключения рыхлых образований, образцы всех серий подвергали вибрационному воздействию в течение 20-30 с. с пригрузом 20 г/см^2 .

Предлагается использование следующих технологических приемов:

1 Использование основного заполнителя – гранул пенополистирола с фракцией 2,5-5,0 мм;

2 Активация вяжущих способностей заполнителя из доменного гранулированного шлака введением в состав бетонной смеси известкового молока при обработке гранул пенополистирола;

3 Термическая обработка образцов полистиролбетона током переменной частоты при напряжении 36-42 В со следующим режимом ТВО:

- предварительная выдержка – 0,5-1,5 ч;
- подъем температуры до $+75 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – 3-3,5 ч;
- термосное остывание – 19-20 ч.

2.3 Методы постановки экспериментальных исследований характеристик полистиролбетона

Для рациональной организации исследовательской работы применялись методы математического планирования эксперимента. При проведении экспериментов с многофакторными системами одной из главных задач является определение влияния каждого фактора на конечное значение системы [70].

Математический метод планирования эксперимента позволяет при минимальных расходах исходного сырья и времени получить математическую модель в виде полинома, выражающего зависимость изменения исследуемого свойства от изменения факторов.

Статистическая обработка экспериментальных данных, приведенная в Приложении 2, проводилась на двух стадиях диссертационной работы:

- при проведении постановочных экспериментов;
- на стадии выполнения основных экспериментов.

Экстремальной задачей постановочного эксперимента при подборе составов полистиролбетона являлось отыскание факторов, обеспечивающих получение оптимального значения параметра прочности на сжатие при наименьшей плотности. Критерий оптимизации полистиролбетона зависел от следующих варьируемых технологических факторов бетонной смеси:

- вида и объемного содержания инертного заполнителя;
- объемного содержания основного заполнителя (полистирольных гранул);
- водоцементного отношения;
- содержания вяжущего и химической добавки;

Дополнительным экономическим фактором являлась стоимость использовавшегося вида химической добавки.

Интерполяционной задачей постановочного эксперимента являлось построение функций зависимости прочности на сжатие от плотностей образцов полистиролбетона различных составов:

$$R_{сж1сост} = f(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \dots \gamma_n); R_{сж2сост} = f(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \dots \gamma_n); R_{сж3сост} = f(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \dots \gamma_n); R_{сж4сост} = f(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \dots \gamma_n); R_{сж5сост} = f(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \dots \gamma_n). \quad (2.3.1)$$

При планировании менялись три фактора: количество цемента, инертного заполнителя и воды. Количество полистирола принимали постоянным для смеси с предварительно посчитанной плотностью и составляло от $0,95 \text{ м}^3$ для $\gamma = 800 \text{ кг/м}^3$ до $0,72 \text{ м}^3$ для $\gamma = 1450 \text{ кг/м}^3$. Значения каждого фактора в предполагаемой нулевой точке (центре эксперимента) брали из предварительных опытов.

На стадии основного эксперимента решение задачи планирования эксперимента сводилось к определению регрессионной зависимости и предполагало следующие этапы:

- выбор модели исследуемой зависимости $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_i)$ для заданной области изменения факторов X_1, X_2, \dots, X_i , построение плана эксперимента или матрицы планирования;
- проведение необходимого количества опытов и их повторов в соответствии с планом;
- математическая обработка результатов эксперимента с выявлением регрессионных зависимостей;
- анализ полученных результатов с определением градиентов влияния и, в случае необходимости, составление нового плана.

Планирование эксперимента по исследованию свойств полистиролбетонной композиции реализовано с применением симплекс-решетчатого плана, что позволило получить модель системы в виде неполного кубического полинома для трехкомпонентной системы:

$$Y=b_1X_1+b_2X_2+b_3X_3+b_{12}X_1X_2+b_{13}X_1X_3+b_{23}X_2X_3+b_{123}X_1X_2X_3, \quad (2.3.2)$$

Симплекс метод наиболее успешно применим, когда нужно учитывать несколько критериев оптимизации.

На первом этапе исследования физико-механических свойств полистиролбетона математические модели искали в линейном приближении, но при этом были получены неудовлетворительные результаты. Поэтому был сделан переход от (2.3.2) к модели в виде полинома второго порядка для двухфакторного эксперимента:

$$Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_{11}X_1^2+b_{12}X_1X_2+b_{22}X_2^2, \quad (2.3.3)$$

а также для трехфакторного эксперимента:

$$Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+ b_3X_3+b_{12}X_1X_2+b_{13}X_1X_3+ b_{23}X_2X_3+ b_{11}X_1^2+ b_{22}X_2^2++ b_{33}X_3^2. \quad (2.3.4)$$

Для получения оценок коэффициентов математических моделей применяли ортогональный центральный композиционный план второго порядка, полученный на базе линейного факторного плана типа 2^n (где n – число переменных включенных в эксперимент) добавлением к нему некоторого числа определенным образом расположенных экспериментальных точек, называемых звездными точками. Выбор интервалов варьирования факторов сделан из условия проведения экспериментов.

Для ослабления влияния на результаты экспериментов систематически действующих мешающих факторов реализация матриц планирования эксперимента осуществлена по принципу рандомизации. Обработку экспериментальных данных проводили с помощью пакета прикладных программ STATGRAPHICS, а получение уравнения регрессии выполняли по следующим этапам:

- расчет коэффициентов уравнения регрессии и проверка их значимости с помощью t-статистики Стьюдента;
- проверка гипотезы адекватности полученной полиномиальной зависимости по критерию Фишера;
- графическая интерпретация функции отклика.

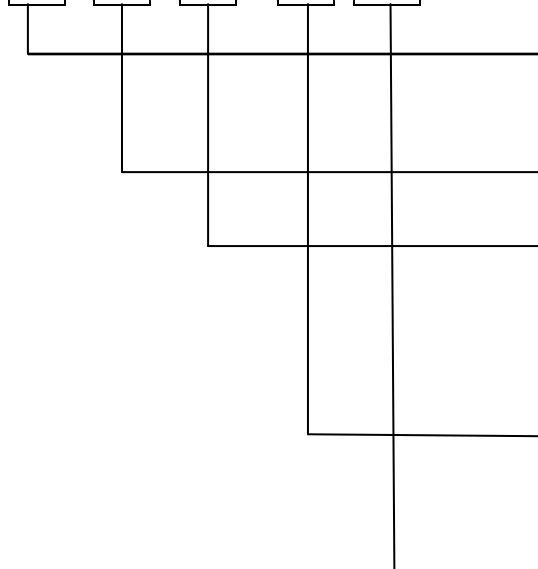
В результате проведенной проверки гипотезы адекватности зависимостей и регрессионного анализа итогов эксперимента было установлено, что:

- все полученные зависимости адекватны, так как вычисленное значение критерия F меньше критического значения;
- все модели при уровне значимости критерия Стьюдента 0,95 адекватны.

Дальнейшая работа заключалась в анализе влияния факторов на полученные результаты с технологической или научной интерпретацией математической модели.

В тексте диссертации использована следующая маркировка образцов:

X . X . X - X . X



- вид образца (П – призмы, Б – балочки, К – кубы, Пл – пластины, Ц – цилиндры);
- вид заполнителя (Ш – шлак, П – песок);
- условный номер, характеризующий геометрические размеры образца относительно принятому в ГОСТ;
- условный номер режима твердения (1 - естеств., 2 – ТВО);
- условный шифр проведенного испытания (см. табл. 2.3.1).

Таблица 2.3.1- Условные шифры для проведенных испытаний

№/№	Вид осуществленного испытания	Условный номер испытания
1	Кубиковая прочность на сжатие	1
2	Призменная прочность на сжатие	2
3	Прочность на осевое растяжение	3
4	Прочность на растяжение при изгибе	4
5	Прочность на местное сжатие	5
6	Усадка	6
7	Ползучесть при нагружении	7
8	Морозостойкость (циклическая)	8
9	Теплопроводность	9
10	Температурные деформации	10
11	Паропроницаемость	11

Выводы

1. Разработаны и предложены технологические приемы для разработки методики проектирования составов полистиролбетона для дальнейшего проведения исследований. Проведено изучение и аргументирован выбор необходимых сырьевых материалов: вяжущего, основного заполнителя, природного и техногенного заполнителя, воды, химической добавки.

2. Определены рациональные составы конструкционного полистиролбетона плотностью 800-1500 кг/м³ на местных природных и техногенных заполнителях (кварцевом песке ЗАО «Карьер Гора Хрустальная» и доменном гранулированном шлаке ОАО «Металлургический завод им. А.К. Серова») для проведения экспериментальных исследований физико-механических и теплоизоляционных свойств конструкционного полистиролбетона.

3. Экспериментально подтверждена эффективность химической добавки «Реламикс-2» вводимой в оптимальном количестве 0,6-1,0 % с целью модифицирования поверхности пенополистирольных гранул и повышения адгезионных контактов в системе цемент - полистирол. При этом повышение прочности полистиролбетона только за счет данного фактора составляет от 20 до 40%.

4. Результаты, полученные при проектировании составов и исследовании технологических свойств полистиролбетонной смеси, были учтены при разработке новой редакции ТУ 5745-001-20875427-02 «Смеси полистиролбетонные» и Рекомендациях по применению полистиролбетона в строительстве (см. Приложение 3).

3 Исследование прочностных характеристик конструкционного полистиролбетона

3.1 Методика проведения испытаний

При испытании прочности полистиролбетона на сжатие использовалась методика, аналогичная приведенной в ГОСТ 10180-90 «Бетоны. Методы определения прочности на сжатие и растяжение». Кубиковую прочность полистиролбетона на сжатие R_m определяли на образцах – кубах размером 150x150x150 мм и 100x100x100 мм. При этом экспериментально был установлен переходный коэффициент K , который оказался равным 0,95 для кубов 100x100x100 мм, как для всех видов легких бетонов, кроме ячеистого.

Величина предела прочности при сжатии (МПа):

$$R_{сж} = \frac{F}{S}, \quad (3.1.1)$$

где F –разрушающая сила, кгс; S – площадь сечения образца, перпендикулярная направлению разрушающей силы, см².

Нами исследовалось по двенадцать серий образцов кубов на заполнителях из доменного гранулированного шлака «ОАО Metallургический завод им. А.К. Серова» и кварцевого песка ЗАО «Карьер Гора Хрустальная».

Призменная прочность полистиролбетона R_b определялась на образцах – призмах с отношением высоты к ширине 1:4, в соответствии с требованиями ГОСТ 24452-80 Бетоны. Методы определения призменной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. Одновременно определялись начальный модуль упругости E_b и начальный коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона μ).

Несмотря на то, что максимальный размер основного заполнителя не превышает 5 мм, для проведения испытаний были выбраны образцы-призмы базовым размером 150x150x600 мм для необходимости изучения картины трещинообразования в полистиролбетонных образцах при разрушении.

Испытания проводились на гидравлическом прессе П-125 максимальной нагрузкой 125 т.

Перед испытанием призм осуществлялось их центрирование по физической оси. Нагружение производилось на гидравлическом прессе ступенями, равными

2,5 % от ожидаемой разрушающей нагрузки (по 500 кгс) со скоростью 6 ± 2 кгс/с.

На каждой ступени осуществлялась выдержка по 3 минуты и записывались отсчеты по приборам в начале и конце выдержки. Для измерения продольных и поперечных деформаций применялись индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм.

При определении прочности конструкционного полистиролбетона на местное сжатие (смятие) испытывались образцы - кубы размером 300х300х300 мм в количестве 9-ти серий по 3 образца каждая (как для ячеистого бетона), со средним значением плотности около 800, 1200 и 1400 кг/м³. Методика испытаний была принята в соответствии с рекомендациями ГОСТ 10180-90 и Пособия по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов. Ранее экспериментальные исследования по определению прочности на местное сжатие легких бетонов на основе керамзита проводились А.Б. Пирадовым [68] и В.И. Довгалюком совместно с Г.Л. Кацем [15].

Местное сжатие в центральной части образцов создавали с помощью металлических штампов в виде квадратов размером 100х100х50 мм, а по углам образцов с помощью металлических штампов в виде кубов размером 50х50х50 мм.

Выбор геометрических размеров штампов был обусловлен ограниченной возможностью установки индикаторов часового типа на поверхности образцов, а также необходимостью сравнения и совместного анализа результатов испытаний с результатами испытаний, проведенных другими авторами.

Нагружение проводилось на гидравлическом прессе ИП-250 ступенями равными 10% от предполагаемой разрушающей нагрузки - по 500 кгс в испытаниях на краевое сжатие и по 1850 кгс в испытаниях на центральное сжатие. Производилась выдержка по 3 минуты для фиксации деформаций быстро натекающей ползучести.

Деформации замерялись с помощью индикаторов типа МИГ ценой деления 0,001 мм, установленных с обеих сторон от штампа на расстоянии в 75 мм и на расстоянии в 50 мм от края поверхности куба. Расположение индикаторов на поверхности образца выбиралось, исходя из условия избегания их попадания в зону площади смятия.

Прочность полистиролбетона на осевое растяжение исследовалась на контрольных образцах – призмах с геометрическими размерами 100x100x400 мм в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-90.

Прочность вычислялась для каждого образца с точностью до 0,01 МПа по формуле:

$$R_t = \beta \frac{F}{A} k_w;$$

где F - разрушающая нагрузка, Н (кгс); A - площадь рабочего сечения образца, мм²; β – масштабный коэффициент; k_w – поправочный коэффициент учитывающий влажность образца в момент испытания (принимался равным 1,0).

Испытания прочности конструкционного полистиролбетона на осевое растяжение на образцах цилиндрах и восьмигранниках с цилиндрической верхней и нижней частями было признано не целесообразным вследствие необходимости соотношения полученных результатов испытаний на образцах-призмах с результатами предыдущих испытаний, проведенных Король Е.А. [36, 37], Евдокимовым А.А. и Дайнеко О.С. [19, 21, 22], Милых Т.И. [45] на образцах-призмах тех же геометрических размеров.

При проведении нами испытаний образцов восьмигранников с призматическими верхней и нижней частями разрушение происходило по наименьшему поперечному сечению в суженной части образца. При этом эффект «чистого» растяжения не достигался, так как полученный предел прочности образца был меньше примерно на 10-15 % чем предварительно рассчитанный. Для учета погрешности результата в данных испытаниях требовалась разработка специальной методики, поэтому этот вариант геометрической формы образцов был отклонен.

Вследствие сложности опытного определения прочности конструкционного ПСБ на чистое растяжение (частые разрушения в зоне передачи нагрузки) было опробовано несколько способов крепления образца в испытательной разрывной машине. Окончательно был выбран следующий вариант:

К торцевым поверхностям призм клеем на основе эпоксидной смолы крепились металлические закладные детали для хватных устройств, посредством которых, на испытываемый образец подавалось растягивающее усилие. Во избежание разрыва полистиролбетона по границе склеивания с металлическим хватом,

с обоих концов образца выполнялась металлическая коробка, обхватывающая призму по всем четырем сторонам.

Данная конструкция позволила достичь эффекта разрушения образца-призмы от растягивающего усилия непосредственно в его центральной части.

Деформации измерялись индикаторами часового типа МИГ с ценой деления 0,001 мм на базе 200 мм, расположенными вдоль всех четырех граней. Растяжение производилось ступенями, равными 10 % от ожидаемой разрушающей нагрузки со скоростью 6 ± 1 кгс/с. На каждой ступени осуществлялась выдержка по 3 минуты для фиксации деформаций быстронатекающей ползучести и записывались отсчеты по индикаторам в начале и конце выдержки.

Испытывалось три серии по 6 образцов полистиролбетона маркировки П.П.1-1.3 по таблице 3.3.1 из полистиролбетона плотностями $\gamma = 1000, 1200$ и 1400 кг/м^3 . В соответствии с требованиями п. 6.2 масштабный коэффициент β принимался равным 0,92 для стороны призмы 100 мм по таблице 5 ГОСТ 10180-90. Изначально предполагалось, что сечение призмы ослаблено на 50% слабым заполнителем – гранулами полистирола и разрушение будет носить когезионный характер (по стенкам цементно-песчаной или цементно-шлаковой матрицы, вокруг гранул).

Прочность полистиролбетона на растяжение при изгибе (модуль разрыва) исследовалась на образцах – балочках, с размером 40x40x160 мм. Половинки балочек, оставшиеся после испытаний на изгиб, испытывались на сжатие.

Предел прочности при испытании на растяжение при изгибе (без учета пластин) вычисляется по формуле:

$$R_{\text{изг}} = \frac{3Pl}{2bh^2},$$

где P – наибольшая нагрузка при испытании образца, l – расстояние между осями опор (пролет равный 0,100 м); b – ширина образца, м; h – высота посередине пролета без учета выравнивающего слоя, м.

При этом определялся упруго-пластичный момент сопротивления по формуле:

$$W_T = \frac{bh^2}{k}$$

Испытания образцов-балочек проводились на испытательной машине МИ-ЦИС-300К (двухопорный изгиб) по методике, аналогичной принятой в ГОСТ 310.4-81 (СТ СЭВ 3920-82) «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии». Скорость нарастания нагрузки составляла 5 кгс/с, соответствовала стандартной скорости испытаний и была постоянной.

Геометрические размеры образцов ПСБ для проведения испытаний были приняты исходя из наибольшего размера основного заполнителя - гранул полистирола равного 5 мм, согласно требованиям п. 2.1.2 таблицы 3 ГОСТ 10180-90 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». В соответствии с требованиями п. 5.8 ГОСТ 24544-81 при проведении испытаний на образцах, отличных от базовых (геометрическими размерами 150x150x600 мм), учитывался переходной коэффициент К, значение которого было установлено экспериментально и оказалось равным в среднем 2,16.

Испытывалось 8 серий с различным количеством образцов ПСБ в каждой (от 6 до 12 штук), с различающимися между собой режимами твердения, а также различными инертными заполнителями: 5 серий – на доменном гранулированном шлаке и 3 серии на кварцевом песке.

Три серии образцов сохранялись до проведения испытания при естественном режиме твердения (при температуре лабораторного помещения равной $+20\pm 2^{\circ}\text{C}$), а остальные 5 серий образцов сохранялись до проведения испытания при твердении в режиме тепло-влажностной обработки при температуре $+ 75^{\circ}\text{C}$ и последующем остывании в течение 4 часов.

3.2 Прочность на сжатие

Прочность полистиролбетона может рассматриваться как прочность цементной матрицы с включением в ее объем шарообразных гранул различного размера, плотности и прочности. Влияние прочности гранул полистирола на прочность полистиролбетона долгое время не учитывалось. Считалось, что типичный представитель современных легких заполнителей - вспученный пенополистирол, являясь по физической природе лёгким заполнителем, из-за своей очень малой

плотности, фактически только формирует макро пустотность. Никакого вклада в улучшение прочностных характеристик он практически не вносит. Для него соотношение (E_3/E_m) модуля упругости заполнителя к модулю упругости цементной матрицы близко к нулю – это гораздо хуже, чем даже у лёгкого бетона на основе камыша. Поэтому на начальном этапе исследований существовала теория, что полистиролбетон можно рассматривать как крупнопористый или ячеистый бетон и гранулы полистирола ведут себя как воздушные поры.

По данным авторов [18] известно, что для крупнопористых бетонов основным фактором, влияющим на прочность является количественное содержание вяжущего, а не водовяжущее отношение, как у бетонов слитной структуры.

Проведенные в ходе работы экспериментальные исследования доказывают, что на прочность полистиролбетона, как и многих других видов легких бетонов, влияет водовяжущее и водотвердое отношения, а также режим изготовления и хранения образцов.

В.Г. Парфенов и В.Д. Шантарин в своих работах [65, 66] также придерживаются мнения, что прочностные свойства полистиролбетона определяются несущей способностью межгранульного материала, т.е. расходом вяжущего, его маркой, В/Ц, плотностью и толщиной межгранульных перегородок. Последние зависят от размера пор (гранул полистирола) и их концентрации в объеме бетона.

С другой стороны, исследования влияния на свойства легкого бетона других видов полимерных заполнителей [15] показали, что модуль упругости, например полиэтиленовой фибры, используемой в качестве основного заполнителя в фибробетоне, также очень низок, тем не менее, ее применение оказывает существенное влияние на рост прочности бетона на осевое растяжение и при изгибе. В данном случае, несомненно, большое влияние на прочностные характеристики оказывает форма и объемное содержание полимерного заполнителя в цементно-песчаной матрице.

Впоследствии, исследованиями Довжика [16, 17] и других авторов [33, 36] было установлено, что гранулы полистирольного заполнителя влияют на прочность и деформативность данного вида легкого бетона.

При визуальном осмотре поверхности испытанных образцов в месте разрушения материала, автором отмечается, что разрушение ПСБ происходит исключительно по контактному слою цементного камня - заполнитель, обнажая поверхность полистирольного зерна и плотной растворной части межзернового пространства.

Это говорит о том, что адгезионное сцепление цементного камня с поверхностью полистирольного зерна незначительное, в данном случае вклад в прочность материала вносит высокая гладкость поверхности контактного слоя цементного камня, образованная в результате обволакивания бетонной смесью гранулы полистирола.

Данная теория, косвенно подтверждается материалами СЕВ и FIP [107], где указывается, что при использовании в легких бетонах плотных заполнителей, частицы которых имеют гладкую поверхность и округлую форму, увеличивается прочность бетона.

Для полистиролбетона соотношение между прочностью бетона и его растворной составляющей зависит от относительного объемного содержания зерен крупного заполнителя (ϕ), характеристик пенополистирола и мало зависит от прочности цементной матрицы ($R_{ц.м.}$). Данный факт объясняется тем, что для ПСБ характерны пластические деформации, обусловленные большой деформативностью гранул пенополистирола, релаксирующих напряжения создаваемые в бетоне при его нагружении [8]. Независимо от свойств заполнителя и его содержания в растворной матрице с повышением прочности цементной матрицы прочность полистиролбетона всегда повышается.

Микроструктура растворной части вокруг зерна пенополистирола является переменной в интервале радиуса поры, и представляет собой несколько слоев различных по плотности, отсюда возможно особое влияние микроструктуры на прочность и деформативность данного композитного материала.

3.2.1 Кубиковая прочность на сжатие

При изучении материала ранее проведенных исследований было установлено, что различными авторами для расчета величины предела прочности на сжатие полистиролбетона было предложено несколько эмпирических формул.

А.А. Евдокимов и О.С. Дайнеко [21, 22] ввиду значительного различия опытных и теоретических значений прочности полистиролбетона предложили рассматривать его структурную модель в виде совокупности сфер из затвердевшего раствора, внутри которых находятся зерна вспененного полистирола. Ими предложена аналитическая зависимость прочности полистиролбетона от свойств и объемного содержания его составляющих:

$$R_{\sigma} = 0,11 \frac{R_{pac} (5\varphi + 1) \varphi^{2/3}}{\varphi^r}, \quad (3.2.1)$$

где R_{σ} , R_{pac} – кубиковая прочность на сжатие полистиролбетона и растворной части, МПа; φ – относительное объемное содержание зерен крупного заполнителя; r – средний радиус зерен заполнителя, мм.

В.Г. Довжик и В.А. Рахманов [16, 75] предлагают выражать прочность полистиролбетона степенной зависимостью, разработанной в соответствии с теоретическими предпосылками механики дисперсных сред и учитывающей влияние содержания и характеристик пенополистирольного заполнителя:

$$R_{нсб} = 0,24 R_u \left(\frac{\rho_{нсб} - \varphi \rho_{пнс}}{1 - \varphi} \right)^2 (1 - \varphi)^n, \quad (3.2.2)$$

где $\varphi = 1 - V\alpha K_{изб}$, α – межзерновая пустотность заполнителя; V – единица объема бетона; $K_{изб}$ – объем межзерновых пустот; R_u – активность цемента, МПа; $\rho_{нсб}$ – плотность бетона в сухом состоянии; $\rho_{пнс}$ – плотность гранул пенополистирола.

В обеих формулах (3.2.1) и (3.2.2) важной величиной является φ – содержание зерен крупного заполнителя в бетоне.

А.С. Королевым и Е.А. Волошиным под руководством Б.Я. Трофимова была предложена модель зависимости изменения прочности вариотропного полисти-

ролбетона от плотности, проверенная экспериментально путем создания вариатропных и однородных образцов цементного полистиролбетона, в котором использовались гранулы не вспученного полистирола фракции 0,315-1,25 мм [35]. Сокращенно зависимость можно представить в виде формулы:

$$\frac{R_{\text{вар}}}{R_{\text{с.ж}}} = \frac{(1 - 1,2k_{\text{вар}})(k_{\text{вар}} + 1)^2 (21,2 - 5D(1 + 3,2B / \text{Ц}))^2}{(21,2 - 5(k_{\text{вар}} + 1)D(1 + 3,2B / \text{Ц}))^2}, \quad (3.2.3)$$

где В/Ц – водоцементное отношение; k – степень вариотропности, D – величина средней плотности; $R_{\text{вар}}$ – прочность вариотропного бетона.

Данная зависимость достаточно полно отражает свойства структуры полистиролбетона.

В результате экспериментальных исследований ПСБ, проведенных Р.В. Сакаевым и В.В. Щербаченко под руководством А. Я. Эппа [74] было получено эмпирическое уравнение прочности полистиролбетона для цементно-зольных растворов различного состава:

$$R_{\delta} = R_{\text{раств}} \times \varphi_p^{2,64}; \quad (3.2.4)$$

где $R_{\text{раств}}$ – кубиковая прочность раствора; φ - количество раствора, м³/м³.

Согласно данной формуле, с увеличением плотности растворной матрицы повышается ее прочность. Эта связь носит степенной характер.

При углубленном анализе всех вышеприведенных формул можно прийти к выводу, что влияние характеристик полистирольных гранул на прочность полистирола можно учесть обобщенной эмпирической формулой:

$$R_{\delta} = R_{\text{раств}}(1 - \varphi)^n \quad (3.2.5)$$

где n – величина переменная, устанавливаемая экспериментально.

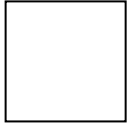
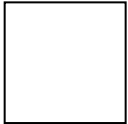
Данная формула была выбрана нами в связи с наибольшей сходимостью теоретического расчета по ней с полученными экспериментальными результатами.

Результаты определения предела прочности при сжатии см. в табл. 3.2.1 и табл. 3.2.2

Таблица 3.2.1 – Кубиковая прочность полистиролбетона на сжатие в зависимости от плотности, вида использованного заполнителя и времени твердения

№ п/п	Плотность, кг/м ³	Кубиковая прочность на сжатие R_m , МПа (28 суток)		Кубиковая прочность на сжатие R_m , МПа (60 суток)	
		кварцевый песок	доменный граншлак	кварцевый песок	доменный граншлак
1	2	3	4	5	6
1	800	6,5	7,5	7,2	9,0
2	850	7,0	8,1	7,6	9,4
3	900	7,4	8,5	8,1	9,8
4	950	8,0	9,0	8,6	10,1
5	1000	8,3	9,7	9,1	11,2
6	1100	9,5	11,2	10,4	12,1
7	1150	10,8	11,5	11,9	12,6
8	1220	11,0	11,8	12,1	13,0
9	1250	11,7	12,0	12,9	13,4
10	1350	12,5	13,2	13,3	14,0
11	1400	14,5	14,8	15,0	15,5
12	1450	15,0	15,4	15,5	16,1

Таблица 3.2.2 – Характер образования трещин на поверхности образцов-кубов из конструкционного ПСБ под действием разрушающей нагрузки

№ п/п	Серия образцов	Дата проведения испытаний	Количество образцов серии	Плотность, кг/м ³	Характер образования трещин на поверхности при разрушении
1	2	3	4	5	6
1	К.Ш.1 - 2.1	23.05.2003	6	850	
2	К.П.1 - 2.1	16.06.2003	6	950	

Окончание таблицы 3.2.2

1	2	3	4	5	6
3	К.П.1 - 2.1	3.07.2003	6	1030	<input type="checkbox"/>
4	К.П.1 - 2.1	1.08.2003	6	1150	<input type="checkbox"/>
5	К.Ш.1 - 2.1	1.08.2003	6	1220	<input type="checkbox"/>
6	К.П.1 - 2.1	30.06.2005	12	1250	<input type="checkbox"/>
7	К.П.1 - 2.1	7.07.2005	12	1350	<input type="checkbox"/>
8	К.П.1 - 2.1	5.09.2005	6	1410	<input type="checkbox"/>
9	К.П.1 - 2.1	11.10.2005	12	1450	<input type="checkbox"/>

На основании результатов исследований, проведенных автором в Испытательном центре ОАО институт «УралНИИАС» и анализа ранее проведенных исследований, был разработан симплекс-решетчатый план и выведена математическая модель изменения кубиковой прочности на сжатие, МПа при различном сочетании исходных компонентов (количество цемента с химической добавкой обозначено x_1 , инертного заполнителя – x_2 , гранул полистирола – x_3).

Математическая модель для кубиковой прочности на сжатие, МПа в кодированных значениях:

$$R_{сж} = 10,82x_1 + 3,63x_2 - 1,9x_1 \cdot x_2 - 2,1x_1 \cdot x_3 - 6,53x_2 \cdot x_3 + 11,67x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$$

Результаты экспериментов представлены графически для изменения предела кубиковой прочности при сжатии на рисунке 3.2.1. По наружным сторонам треугольников показано содержание компонентов полистиролбетона в % по массе. Заштрихованные области на рисунках обозначают зоны, для которых справедлива иная математическая модель, описывающая прочность теплоизоляционного полистиролбетона.

При статистической апробации модели критерий Фишера составил 0,97, а коэффициент корреляции с фактическими данными $r=0,997$

Результаты испытаний кубовой прочности на сжатие серий образцов полистиролбетона кроме того представлены в таблице 3.2.4.

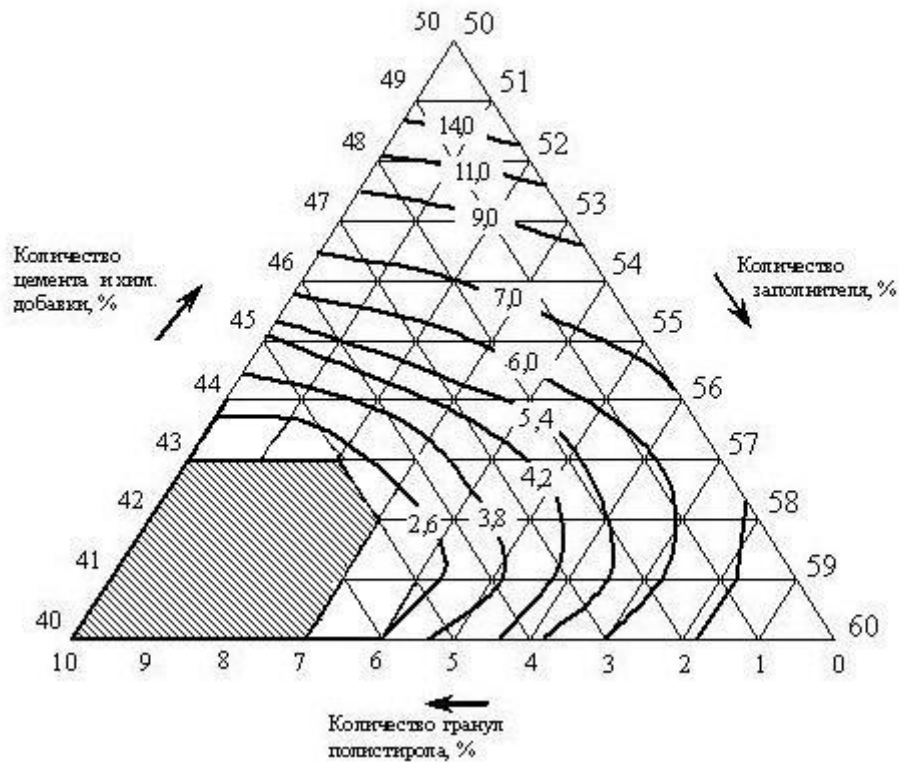


Рисунок 3.2.1 - Изолинии предела кубиковой прочности на сжатие ПСБ, МПа

Таблица 3.2.3 – Соотношение значений кубиковой прочности на сжатие полученных различными исследователями

Плотность ПСБ, кг/м ³	Заполнитель	Кубиковая прочность на сжатие, МПа				
		Парфенов В.Г.	Журба О.В.	К. Кохлинг	Ш. Эйк	Беляков В.А.
800	кв. песок / гр. шлак	3,7 / -	5,0 / -	3,0 / -	1,98 / -	6,0/6,5
900	кв. песок / гр. шлак	4,6 /	5,5 / -	4,0 / -	-	6,5/7,0
1050	кв. песок / гр. шлак	5,0 /	6,5 / -	5,5 / -	2,13 / -	8,8/9,0
1100	кв. песок / гр. шлак	5,4 /	-	6,0 / -	-	11,2/ 11,5
1200	кв. песок / гран. шлак	6,8 / -	-	7,0-9,0 / -	-	11,2/ 11,5

Анализируя полученные нами значения предела кубиковой прочности на сжатие в сравнении с результатами других авторов можно сделать вывод, что нами получены более высокие показатели прочности за счет использования рациональных составов и заполнителей. В исследованиях других авторов приоритетным являлось получение материала с более высокими теплоизоляционными характеристиками, а повышенная прочность не являлась основной целью.

К. Кохлингом [104, 105] были получены сравнительно высокие значения кубиковой прочности на сжатие за счет высокой насыпной плотности пенополистирольного заполнителя - 20 кг/м³, среднего диаметра гранул, принятого равным 3 мм и низкого значения В/Ц равного 0,25. Тем же автором испытывались ПСБ смеси без добавления песка. Для них значения кубиковой прочности на сжатие оказались несколько выше и составили от 3,5 МПа до 9,0 МПа в диапазоне плотностей 800-1180 кг/м³ (рис. 3.1.1).

Полученные нами результаты исследований зависимости предела прочности на сжатие $R_{сж}$ конструкционного полистиролбетона от его средней плотности $\gamma_{ср}$ представлены на рисунке 3.1.2 и описываются в безразмерных величинах уравнением регрессии:

$$R_{сж} = 0,4 + 0,0086\gamma_{ср}. \quad (3.2.2)$$

Следует отметить, что прочность конструкционного полистиролбетона находится в линейной зависимости от его средней прочности.

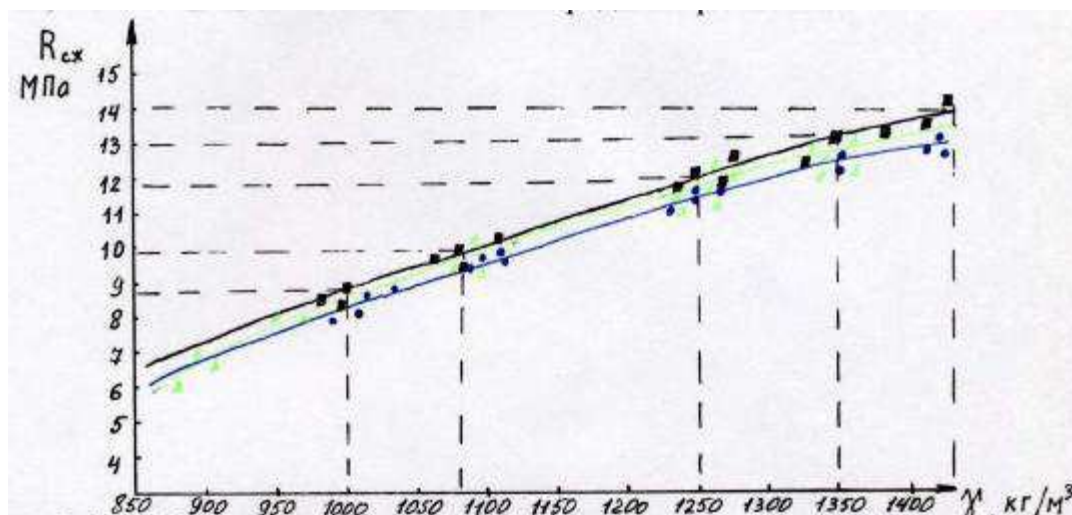


Рисунок 3.2.2 - Зависимость предела прочности при сжатии ($R_{сж}$) конструкционного полистиролбетона от его плотности (γ)

3.2.2 Осевое сжатие (призменная прочность).

При нагружении до некоторой величины σ_e - предела упругости конструкционный полистиролбетон находился в упругом состоянии, а зависимость напряжения σ от деформации является линейной, после этого предела материал переходит в пластическое состояние, а та же зависимость отображается пологой кривой. Как известно из работы А.А. Аракеляна [4] работа бетона под нагрузкой складывается из двух составляющих: работы растворной матрицы и работы зерен заполнителя, различных в зависимости от соотношения их объемов в материале. Учет внутренних параметров среды играет важную роль в построении физической модели материала. Таким образом, в ПСБ на начальном этапе нагружения работает растворная матрица совместно с зернами жесткого заполнителя, а по преодолении предела упругости, когда происходит всплеск роста остаточных деформаций, в работу материала включается основной заполнитель – гранулы полистирола. Затем напряжение вновь монотонно возрастает до некоторой величины σ_0 – предела прочности, составляющего для конструкционного полистиролбе-

тона около 0,75 от значения предела прочности, после чего происходит разрушение.

Результаты испытаний серий образцов ПСБ на сжатие приведены в табл.3.2.4

Таблица 3.2.4 – Результаты испытаний серий образцов ПСБ на сжатие

№ п/п	Шифр серии образцов	Дата испытаний	Количество образцов, шт.	Плотность, кг/м ³	Средняя прочность на сжатие R _m или R _b , МПа
1	2	3	4	5	6
1	К.Ш.1 – 2.1	01.08.2003	3	1450	13,9
2	К.Ш.1 – 2.1	01.08.2003	3	1290	13,53
3	К.Ш.1 – 2.1	09.12.2003	6	930	6,4
4	К.Ш.1 – 1.1	15.12.2003	6	1045	8,2
5	К.П.1 – 1.1	15.12.2003	6	900	7,5
6	К.Ш.2 – 1.1	27.02.2004	4	1000	7,4
7	К.П.2 – 1.1	13.04.2004	4	1010	7,6
8	К.П.1 – 2.1	28.04.2004	3	995	7,2
9	К.П.1 – 2.1	28.05.2004	3	1030	7,4
10	П.Ш.2 – 2.1	09.01.2004	6	1150	8,9
11	П.П.1 – 2.1	17.05.2005	3	1200	9,8
12	К.П.1- 1.1	19.09.2005	3	1365	14,3
13	К.Ш.1- 1.1	12.12.2005	4	1280	14,0
14	П.Ш.1 – 2.1	01.08.2003	6	1440	11,1
15	П.Ш.1 – 2.1	01.08.2003	6	1280	9,9
16	П.Ш.1 – 2.1	09.12.2003	6	930	8,0
17	П.Ш.1 – 1.1	15.12.2003	6	1050	8,9
18	П.П.1 – 1.1	15.12.2003	6	900	8,0
19	П.Ш.1 – 1.1	27-28.02.2004	3	1000	9,1
20	П.П.1 – 1.1	13-14.04.2004	3	1010	8,9
21	П.П.1 – 2.1	28-29.04.2004	3	1000	8,9
22	П.П.1 – 2.1	28.05.2004	3	1030	9,1
23	П.П.1- 1.1	19-20.09.2005	3	1365	10,6
24	П.Ш.1- 1.1	12-13.12.2005	3	1280	10,5

Результаты определения коэффициента призмной прочности при совместном испытании кубов и призм в сравнении с результатами других авторов приводятся в табл. 3.2.5.

Таблица 3.2.5 – Результаты определения коэффициента призмной прочности по данным автора и других исследователей

№ п/п	Автор исследований	Плотность полистиролбетона, кг/м ³	Коэффициент призмной прочности
1	2	3	4
1	А.А.Евдокимов и О.С. Дайнеко	700-800	0,8
2	В.Г. Довжик и В.Н. Россовский	300-600	0,89-1,22
3	Р.Д. Азелицкая и А.А. Спасских	1200	0,91
4	А.С Носков и В.А. Беляков	800-1450	1,06

По результатам испытания серий призм были построены диаграммы зависимости деформаций от напряжений для ПСБ с различными режимами твердения и использованными инертными заполнителями.



Рисунок 3.2.3 – Испытание призмной прочности на сжатие образца-призмы из конструкционного полистиролбетона размером 150x150x600 мм с определением значения начального модуля упругости

Для перехода от прочности кубов к прочности призм определялся коэффициент призмной прочности. Он колебался от 0,90 до 1,22 и в среднем был принят ближе к 1,06.

По данным Евдокимова А.А. и Дайнеко О.С. значение призмной прочности ПСБ с $\gamma_{cp}=700-800 \text{ кг/м}^3$ близко к нормативным характеристикам, приведенным в СНиП 2.03.01-84* и действующих нормативных документах, и в некоторых случаях превышает их.

Характер разрушения под действием сжимающей нагрузки образцов – призм из конструкционного полистиролбетона в диапазоне плотностей 800-1200 кг/м^3 отличается от характера разрушения обычного тяжелого бетона и керамзитобетона (рис. 3.2.5, а).

В диапазоне плотностей 1200-1450 кг/м^3 характер разрушения ПСБ призм близок к характеру разрушения обычного тяжелого бетона и керамзитобетона, описанному С.М. Скоробогатовым [84] (рис. 3.2.5, б). Разрушение призмы сопровождается преимущественно образованием нескольких столбиков, разделенных продольными трещинами, параллельными внешней нагрузке. Параллельность соблюдается только в удалении от опорных площадок, где развиваются касательные усилия от сил трения.

Учитывая полученные результаты для анализа соотношения между кубиковой и призмной прочностями конструкционного ПСБ предлагается зависимость, близкая по своей сущности к зависимости, установленной ранее А.С. Залесовым и др. при многочисленных испытаниях ячеистого бетона, приведенной в монографии [37]. Зависимость между кубиковой и призмной прочностями для ячеистого бетона составляет:

$$R_b = R_m(0,95-0,005R_m) \quad (3.2.3)$$

где R_b – призмная прочность.

Зависимость между кубиковой и призмной прочностями, полученная нами для конструкционного полистиролбетона:

$$R_b = R_m(0,9317-0,0304R_m) \quad (3.2.4)$$

где R_b – призмная прочность.

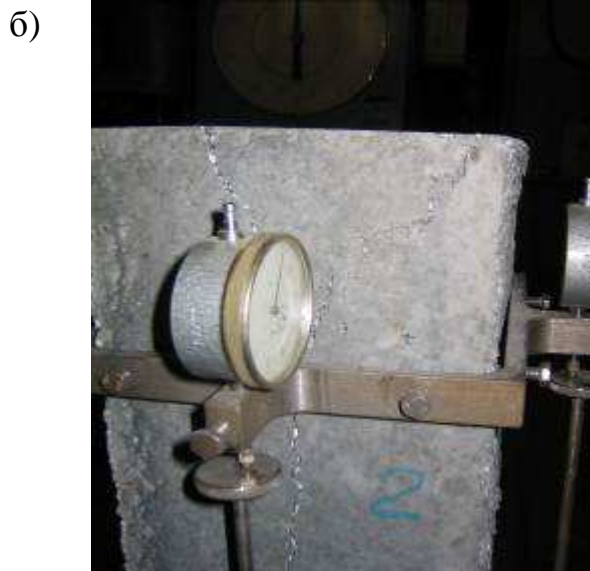
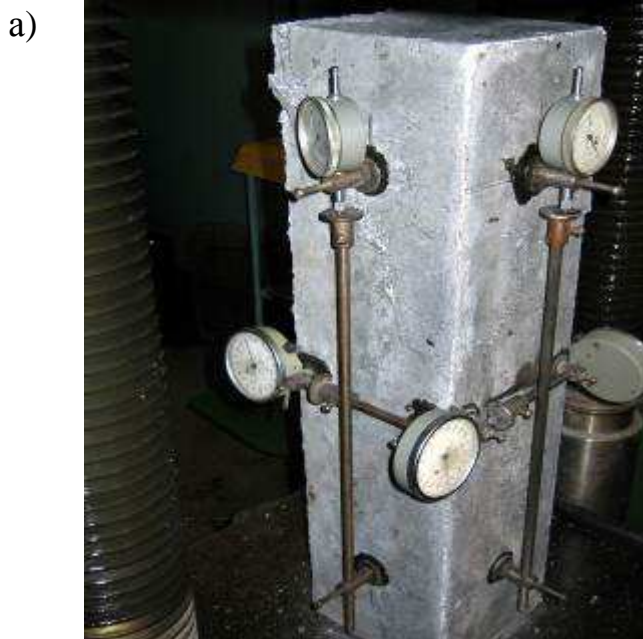


Рисунок 3.2.5 –Характер разрушения призм при воздействии осевого сжатия:

а) общий вид испытанного образца ($\gamma = 1000 \text{ кг/м}^3$);

б) расположение трещин на боковой поверхности ($\gamma = 1350 \text{ кг/м}^3$)

При разрушении в бетонной призме образуется система вертикальных блоков, образованная сетью сжимающих контактных сил, схожая с системой описанной в монографии С.М. Скоробогатова. Совместное рассмотрение поверхностей нескольких серий испытанных призм показывает, что вблизи наиболее нагруженных контактных силовых цепочек или продольных рабочих столбиков возникают поперечные растягивающие усилия или напряжения, приводящие к возникновению продольных мезотрещин и превращению их в продольные макротрещины [84].

Согласно физическим основам теории прочности по О.Я. Бергу и на базе исследований под руководством С.М. Скоробогатова для ПСБ малой призмной прочности необходимо учитывать факт раннего трещинообразования, но в меньшей мере, чем для ячеистого бетона. Нами предлагается для конструкционного полистиролбетона с $R_{пр} = 5 \text{ МПа}$ и $R_{пр} = 15,0 \text{ МПа}$ в методике расчета несущей конструкции из полистиролбетона учитывать понижающий коэффициент $\gamma_{срс} = 0,95$ и $\gamma_{срс} = 0,96$ соответственно, то есть применять предложенное профессором С.М. Скоробогатовым условие:

$$\sigma_{bc} \leq \gamma_{b2} \gamma_{сrc} R_b, \quad (3.2.5)$$

где σ_{bc} – величина сжимающих напряжений в крайнем волокне балки, R_b – величина расчетного сопротивления бетона, γ_{b2} – коэффициент учитывающий длительность действия нагрузок на конструкцию.

На основании полученных экспериментальных данных о работе и разрушении образцов призм при нагружении, с помощью программного комплекса для расчета и проектирования конструкций LIRA-WINDOWS версия 9.2 [69] на ЭВМ была предпринята попытка построения идеализированной модели работы и разрушения ПСБ под действием нагрузки. Объемный элемент в форме призмы геометрическими размерами 150x150x600 мм был разбит на кубические фрагменты размерами 5x5x5 мм, для каждого из которых задавались плотность, модуль упругости и коэффициент Пуассона. Структура элемента была построена таким образом, чтобы кубические фрагменты, для которых задавались расчетные характеристики растворной матрицы, как бы окружали кубические фрагменты, для которых задавались расчетные характеристики вспененного полистирольного заполнителя. Основная трудность построения данной расчетной модели состояла в невозможности задания фрагмента в теле призмы в форме шара с деформационными характеристиками пенополистирола. По углам кубического фрагмента под действием нагрузки образуются дополнительные концентраторы напряжений, вследствие чего предел прочности материала оказывается значительно ниже.

Построенная в LIRA-WINDOWS [69] идеализированная модель работы и разрушения призматического элемента из полистиролбетона под действием нагрузки не соответствовала реальной картине работы элемента, полученной по экспериментальным данным.

При построении в программе MathCad Professional графика зависимости теоретических прочностей ПСБ от средней плотности, рассчитанных по приведенным выше формулам, с экспериментальными значениями прочностей ПСБ полученными автором, установлено:

- зависимость Евдокимова А.А. и Дайнеко О.С. при большей части значений плотности и количества растворной части дает завышенные показатели прочности полистиролбетона на сжатие;

- прочность на сжатие, рассчитанная по уравнению прочности Сакаева Р.В. и Щербаченко В.В. несколько ниже, но, в основном, близка к полученным автором экспериментальным данным.

Аналитическая зависимость прочности, предложенная Евдокимовым А.А. и Дайнеко О.С., справедлива для полистиролбетона на ограниченном участке диаграммы при количестве растворной части $\varphi = 0,4-0,5$.

Для полистиролбетона при разрушении характерны пластические деформации. Данный характер разрушения обусловлен большой деформативностью гранул полистирола, релаксирующих напряжения, создаваемые в материале при его нагружении, так называемым демпфирующим эффектом. Экспериментально установлено, что явление пластических деформаций более явно проявляется при испытаниях под действием нагрузки у образцов теплоизоляционного ПСБ меньшей плотности и прочности. Что касается конструкционного ПСБ, то данный эффект проявляется в меньшей мере, в связи с меньшим содержанием гранул вспененного полистирола в объеме образца.

Установлено, что полученные нами результаты испытаний, в целом, согласуются с результатами экспериментов ранее проведенных исследований [16,17, 19, 21, 24, 28] с учетом более высокой плотности и некоторых различиях в составе материала (содержании вяжущего, фракции полистирольного заполнителя и характеристик инертного заполнителя).

На основании этого можно сделать важный вывод, что полистиролбетон является **значительно менее хрупким и более пластичным материалом** по сравнению с тяжелыми бетонами и легкими бетонами той же прочности (в частности ячеистыми, крупнопористыми шлаковыми бетонами и керамзитобетонами). Это свойство обусловлено в первую очередь наличием в его составе заполнителя из гранул полистирола отличающегося упругими свойствами.

3.2.3 Прочность на местное сжатие

Проверка прочности полистиролбетона на местное сжатие, в первую очередь важна при проектировании и расчете предварительно напряженных конструкций из него, но не теряет своей актуальности и при расчете обычных полистиролбетонных конструкций, например несущих перемычек.

Наибольшее распространение по данным [90] для учета смятия бетона получила формула А. Брандцаега:

$$\sigma_{b,loc}^{\max} = R\sqrt{A} / \omega , \quad (3.2.6)$$

где $\sigma_{b,loc}^{\max}$ - максимальное сопротивление смятию; A – площадь нагруженной поверхности сечения тела; ω – площадь смятия, учитывающая всего три фактора.

Считается, что условия трехосного сжатия менее эффективны для легких бетонов [26, 60], но в данном случае, исходя из особенностей структуры материала, нами было выдвинуто предположение об ином характере работы конструкционного полистиролбетона при центральном местном сжатии по сравнению с керамзитобетоном и ячеистым бетоном.

Механизм разрушения испытанных образцов при центральном смятии виден на рисунке 3.2.6. Разрушение возникает в результате появления трещины раскалывания. При приближении к зоне смятия развитие трещины раскалывания при останавливается. Однако, по М.М. Холмянскому [90] (в данном случае первый из пяти возможных механизмов разрушения) становится возможным межзерновой сдвиг. При дальнейшем увеличении нагрузки происходит также сдвиг по направлению к другому краю площадки смятия. При этом образуется клин (конус), отделившийся от основной массы полистиролбетона и перемещающийся в направлении смятия, которое сопровождается изменениями напряженного состояния, - образуется зона однородного сжатия под штампом, увеличивается распорность бетона. Зона однородного сжатия (внутри пирамиды), в которой касательные напряжения отсутствуют, остается целой. Закономерность развития трещины раскалывания в данном случае напрямую связана с условиями опирания образца-куба в испытательной установке.

При обработке результатов масштабный коэффициент α был принят равным 1,10 для стороны куба равной 300 мм. Коэффициент вариации прочности полистиролбетона составил $v = 7,5 \%$.

При центральном нагружении прочность полистиролбетона на местное сжатие изменялась до максимального значения 24,05 МПа. При угловом нагружении прочность полистиролбетона на местное сжатие изменялась от 5 до 7 МПа, что составляет 50% от значения общей прочности полистиролбетона на сжатие, на растяжение – от 0,4 до 2,65 МПа.

а)



б)



Рисунок 3.2.6 - Испытание прочности образца ПСБ на местное сжатие при центральном нагружении: а) общий вид; б) характер разрушения образца

Результаты испытаний прочности серий образцов-кубов полистиролбетона на местное сжатие представлены в таблице 3.2.6.

Таблица 3.2.6 – Результаты испытания прочности серий образцов-кубов полистиролбетона на местное сжатие

№ п/п	Плотность, кг/м ³	Количество образцов серии	Дата испытаний	Центральное сжатие R_{cm} , МПа	Краевое сжатие R_{cm} , МПа
1	800	3	17-18.03.2004	18,0	3,8
2	820	3	20.03.2004	18,2	4,0
3	815	3	24.03.2004	18,2	4,2

Окончание таблицы 3.2.6

4	1200	3	21.07.2004	20,1	5,2
5	1220	3	23.07.2004	20,2	5,2
6	1250	3	28.07.2004	20,3	5,4
7	1400	3	03.09.2004	22,2	6,1
8	1415	3	07.09.2004	23,08	6,5
9	1450	3	11.09.2004	24,05	7,0

а)



б)



в)



Рисунок 3.2.7 – Результаты испытания прочности образца-куба из ПСБ на местное сжатие при угловом нагружении: а) общий вид образца в прессе; б) характер разрушения; в) трещинообразование на боковой поверхности.

Опыты со штампами, приложенными внецентренно с краю кубов, показали, что величина расчетного сопротивления смятию получается несколько меньшей, чем прогнозируемая, подсчитанная по предлагаемой для легких бетонов формуле Баушингера:

$$R_{cm} = R_3 \sqrt{\frac{F}{F_{cm}}}, \quad (3.2.7)$$

где $R=R_3$ - прочность на осевое сжатие (призмная); F – площадь поверхности куба; F_{cm} – площадь смятия.

Опыты со штампами, установленными в центре кубов, показали превышение теоретических значений прочности, определенных по пособию по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов более чем в 1,2 раза.

Во втором случае сопротивление полистиролбетона местному смятию может быть принято пропорциональным кубическому корню отношения площади грузовой площадки к полной площади поперечного сечения образца (формула Баушингера).

Экспериментально установленный коэффициент характера распределения местной нагрузки по площади смятия, равный для ячеистого бетона $\psi = 0,50$, для конструкционного полистиролбетона составляет 0,64.

Установлен другой характер разрушения при местном сжатии образцов полистиролбетона плотностью 800 кг/м^3 по сравнению с ячеистым бетоном и керамзитобетоном аналогичной плотности. При разрушении деформируются также и зерна крупного заполнителя – гранулы вспененного полистирола.

При достижении значения разрушающей нагрузки во время испытания образцов плотностью 1200 и 1400 кг/м^3 происходило внезапное нарушение сплошности полистиролбетона вследствие распространения в теле образца макроскопических трещин, приводящих к тому, что образец распадается на части. При рассмотрении испытанных образцов установлено, что характер разрушения при смятии хрупкий (по стенкам растворной матрицы окружающим крупный полистирольный заполнитель, в основном, без его участия в сопротивлении разрушению), соответствует характеру разрушения образцов полученному в исследованиях Пирадова А.Б. [68] для керамзитобетона тех же плотностей.

Большой эффект использования прочности конструкционного полистиролбетона по сравнению с ячеистым и крупнопористым бетонами может быть объяснен особенностями напряженного состояния бетона, создаваемого окружающим ненапряженным материалом. В этом случае работающий на местное смятие бетон получает дополнительное реактивное боковое давление и находится в условиях трехосного сжатия.

3.3 Прочность на растяжение

3.3.1 Прочность на осевое растяжение

Известно, что прочность легкого бетона на растяжение в основном обуславливается прочностью цементного камня и заполнителя. При марках бетона В3,5-В12,5 по прочности на сжатие, легкий заполнитель по своей прочности на растяжение (например, керамзит) сам воспринимает растягивающие напряжения.

Еще в 1941 г. профессором Я.В. Столяровым в монографии «Введение в теорию железобетона» для испытания на осевое растяжение отмечалось, что «не следует применять образцов в виде восьмерок, как это принято при испытании цемента, ибо здесь нужно предполагать весьма значительную неравномерность в распределении напряжений в сечении разрыва». Кроме того, для получения функции локального сопротивления (уравнения, описывающего усредненные опытные зависимости $\sigma - \varepsilon$), необходимой для анализа неоднородного растяжения, образцы восьмерки малоприспособны, вследствие отсутствия участка постоянного сечения, на котором можно было бы измерять деформации.

Полученные результаты испытаний сведены в таблицу 3.3.1.

Таблица 3.3.1 – Зависимость прочности на осевое растяжение и предельной растяжимости образцов-призм от их средней плотности и кубиковой прочности на сжатие

№ п/п	Плотность, кг/м ³	R_{bt} , МПа	R_m , МПа	Предельная растяжимость ($\varepsilon_{\sigma.p}^{n.p.}$), мм/м
1	800	0,8	7,5	0,39
2	1000	1,2	9,7	0,35 (0,33)
3	1200	1,5	10,2	0,23
4	1400	1,8	14,2	0,17

Полученные ранее результаты испытаний других исследователей и формулы, предложенные ими на основе экспериментов, показаны в таблице 3.3.2

Таблица 3.3.2 – Формулы для определения прочности на осевое растяжение образцов ПСБ предложенные на основании ранее проведенных исследований

№/№	Авторы	Плотность образцов ПСБ, кг/м ³	R _{bt} , МПа	Предложенная формула
1	К. Кохлинг	800-1050	1,9-7	-
2	А.А. Евдокимов и О.С. Дайнеко (ВЗИСИ)	800	0,48	R _{bt} = 0,198 ln (R _m) + 0,1916 или R _{bt} = 0,125 ln (R _m) + 0,2916;
3	Т.И. Милых (НИИЖБ)	700-800	0,64	-
4	Е.А. Король (МГСУ - МИСИ)	300-500	0,2 - 0,4	R _{bt} = 0,198 ln (R _m) + 0,2916

На основании результатов экспериментальных испытаний Король Е.А., приведенных в ее монографии, [36, 37] известно, что сопротивление осевому растяжению образцов - призм из ПСБ низкой плотности на 3-14 % меньше, чем образцов - цилиндров. Данный факт объясняется неравномерностью высыхания поверхности призм и влиянием усадочных трещин в углах образцов.

На основании формулы Король Е.А. и результатов других исследователей прочность на осевое растяжение полистиролбетона низкой плотности составляет в среднем 0,4 – 0,6 от значения кубиковой прочности на сжатие.

В процессе анализа и обработки результатов экспериментов, проведенных автором данной работы, В.В. Щербаченко было предложено применять для ПСБ в диапазоне плотностей 1200-1450 кг/м³ эмпирическую формулу Р. Фере:

$$R_p = k \sqrt[3]{R_{сж}^2} ; \quad (3.3.1)$$

где R_p и R_{сж} – прочность ПСБ при растяжении и при сжатии, кг/см², а k – коэффициент обычно равный для тяжелых бетонов 0,5, а для конструкционного ПСБ определявшийся экспериментально и составивший в среднем 0,3-0,4.

В.А. Дорф и В.Г. Довжик отмечают справедливость данной формулы для высокопрочного керамзитобетона в диапазоне плотностей 1450-1600 кг/м³ [18].

К. Кохлингом [104, 105] были получены значения прочности на осевое растяжение от 1,9 МПа до 0,7 МПа для полистиролбетона на заполнителе из карьерного песка в диапазоне плотностей 800-1050 кг/м³ (см. график на рисунке 3.3.2).

Анализ результатов экспериментов ранее проведенных другими исследователями [33, 36, 45] свидетельствует о том, что значение прочности при осевом растяжении ПСБ плотности 700-800 кг/м³ близко к нормативным характеристикам, приведенным в СНиП 2.03.01-84* и действующих нормативных документах для легких бетонов, и в некоторых случаях превышает их. В.А. Дорфом и В.Г. Довжиком [18] для конструкционного керамзитобетона плотностью 1450 кг/м³ установлено, что прочность при растяжении данного легкого бетона составляет в среднем 5-15 % от его прочности на сжатие.

На основании анализа результатов проведенных автором экспериментов, и анализа ранее проведенных в ОАО институт «УралНИИАС» исследований, можно сделать вывод о том, что для полистиролбетона плотности 800-1450 кг/м³ выявлена повышенная прочность на осевое растяжение сравнительно с ячеистым безавтоклавным бетоном в том же диапазоне плотностей на 15%. Полученные экспериментальные значения выше на 10-30% аналогичных показателей установленных СНиП 2.03.01-84* и действующими нормативными документами для легких бетонов. Коэффициент изменчивости или вариационный коэффициент $v = \sigma/R_{bt}$ составил 6,2 % (R_{bt} – в данном случае средняя величина прочности). Данное свойство конструкционного полистиролбетона объясняется тем, что гранулы полистирольного заполнителя также вносят свой вклад в восприятие действующих на образец растягивающих напряжений.

Испытание образца-призмы из конструкционного ПСБ с помощью Испытательной разрывной машины Р-5 показано на рисунке 3.3.1.



Рисунок 3.3.1 - Испытание прочности образца - призмы из полистиролбетона размером 100x100x400 мм на осевое растяжение с помощью Испытательной разрывной машины Р-5

3.3.2 Прочность на растяжение при изгибе

Испытание прочности при изгибе необходимо для выяснения действительной работы полистиролбетона в изгибаемых балках – перемычках.

Результаты полученных нами лабораторных испытаний систематизированы и сведены в таблицу 3.3.3, приведенную ниже по тексту работы.

Таблица 3.3.3 – Результаты испытаний образцов - балочек из ПСБ на изгиб

№ п/п	Шифр серии образцов	Дата проведения испытаний	Количество образцов, шт.	Плотность, кг/м ³	Средняя прочность бетона на растяжение при изгибе ($R_{изг}$), МПа	Средняя прочность бетона на сжатие в половинках балочек, МПа
1	2	3	4	5	6	7
1	Б.Ш.1 – 1.4	15.12.2003	10	900	3,6	6,2
2	Б.Ш.1 – 2.4	23.01.2004	10	1350	3,4	8,2
3	Б.Ш.1 – 2.4	29.01.2004	10	1250	3,5	7,5

Окончание таблицы 3.3.3

№ п/п	Шифр серии образцов	Дата проведения испытаний	Кол-во образцов, шт.	Плотность, кг/м ³	Средняя прочность бетона на растяжение при изгибе R _{изг} , МПа	Средняя прочность бетона на сжатие в половинках балочек, МПа
1	2	3	4	5	6	7
4	Б.Ш.1 – 2.4	13.03.2004	12	1400	4,2	8,0
5	Б.Ш.1 – 1.4	26.02.2005	12	850	2,6	5,8
6	Б.П.1 – 1.4	5.12.2005	12	1100	3,6	6,8
7	Б.П.1 – 2.4	19.12.2005	12	995	3,0	6,5
8	Б.П.1 – 2.4	28.11.2005	12	1030	3,5	6,7

По данным экспериментов Яхонтовой Н.Е. и Авдеева Г.К. [98] предел прочности при изгибе ПСБ плотностью 1000 кг/м³ с диаметром гранул < 5 мм на заполнителе из кварцевого песка составил R_{28изг} = 1,9 МПа. Средняя прочность на сжатие половинок образцов-балочек ПСБ составила 3,3 МПа.

В экспериментах тех же авторов предел прочности при изгибе полистиролбетона плотностью 1000 кг/м³ с диаметром гранул до 10 мм на заполнителе из кварцевого песка составил R_{28изг} = 1,3 МПа. Средняя прочность на сжатие половинок образцов-балочек ПСБ составила 2,9 МПа.

Нами были получены значения прочности на растяжение близкие к результатам полученным К. Кохлингом [104, 105], при изгибе от 1,3 МПа до 3,0 МПа для ПСБ на заполнителе из кварцевого песка в диапазоне плотностей от 800 до 1100 кг/м³ (см. рис. 3.2.3).

По данным результатов испытаний Ш. Эйком образцов балочек на основе двух составов ПСБ плотностями в сухом состоянии 800 и 980 кг/м³, прочность на растяжение при изгибе составила 1,24 МПа и 0,91 МПа [102].

Если сравнить коэффициенты использования прочности на растяжение при изгибе $K_{ри} = R_{28изг} / R_b$ песчаного бетона и ПСБ, то первый имеет это значение вдвое ниже, чем у второго, а коэффициенты по использованию цемента в бетоне $K_c = R_b / Ц$ составляют: у песчаного бетона 0.054, а у ПСБ - 0.085.

Соппротивление ПСБ растяжению при изгибе предлагается выразить через сопротивление растяжению:

$$R_{28изг} = \kappa_{изг} * R_p, \quad (3.2.6)$$

где $\kappa_{изг} = R_{28изг}/R_p$, а $R_p=R_{bt}$ – среднее сопротивление материала призм осевому растяжению.

По данным нашей работы значение коэффициента $\kappa_{изг}$ находится в диапазоне 3÷4,5. Тогда уравнение (3.2.6) примет вид:

$$R_{28изг} = 4 * R_p, \quad (3.2.7)$$

На основании результатов исследований, проведенных автором в испытательной лаборатории ОАО институт «УралНИИАС», был разработан симплекс-решетчатый план и выведена математическая модель изменения прочности на растяжение при изгибе при различном сочетании исходных компонентов (количество цемента с хим. добавкой обозначено x_1 , инертного заполнителя – x_2 , полистирола – x_3). Коэффициент Фишера составил 0,95.

Математическая модель для прочности на растяжение при изгибе, МПа в кодированных значениях:

$$R_{28изг} = 3,03x_1 + 1,38x_2 - 1,09x_1 \cdot x_2 - 3,78x_1 \cdot x_3 - 0,23x_2 \cdot x_3 - 8,3x_1 \cdot x_2 \cdot x_3.$$

Результаты экспериментов представлены графически для изменения предела прочности при изгибе на рисунке 3.2.2. По наружным сторонам треугольников показано содержание компонентов ПСБ в % по массе.

Прочность на растяжение при изгибе полистиролбетона растет с повышением его прочности на сжатие, но с увеличением прочности соотношение $R_{изг}/R_{сж}$ уменьшается. Однако в целом этот показатель у ПСБ выше, чем у обычных легких, а также ячеистых бетонов.

На рисунке 3.3.3 экспериментально полученные точки иллюстрируют зависимость между кубиковой прочностью на сжатие конструкционного ПСБ и его прочностью на растяжение при изгибе, определенной на образцах-балочках различных режимов твердения. Для сравнения приведена кривая зависимости кубиковой прочности на сжатие, от прочности на растяжение при изгибе, характерная для ячеистого бетона тех же плотностей.

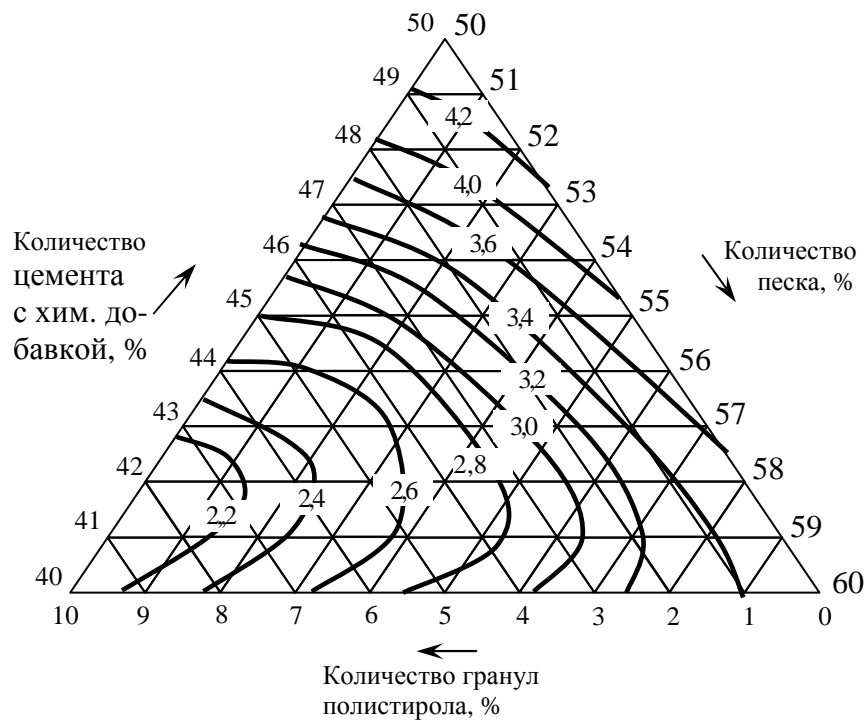


Рисунок 3.3.2. - Изолинии предела прочности на изгиб полистиролбетона, МПа для плотностей от 800 до 1500 кг/м³

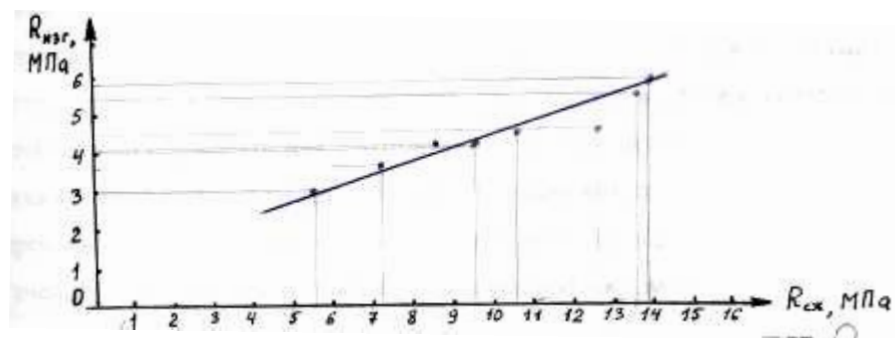


Рисунок 3.3.3. – Зависимость прочности при изгибе образцов ПСБ в диапазоне плотностей от 800 до 1500 кг на доменном гранулированном шлаке от их кубиковой прочности на сжатие



Рисунок 3.3.4 - Испытание прочности на растяжение при изгибе образца-балочки из конструкционного ПСБ с помощью испытательной машины МИЦИС -300К

Выводы

1. Получены результаты прочности на сжатие и растяжение полистиролбетона в диапазоне плотностей от 800 кг/м^3 до 1500 кг/м^3 , не регламентирующемся ГОСТ Р 51263-99 «Полистиролбетон. Технические условия».

Установлено, что по прочности на сжатие данный материал соответствует классам В 5,0-В 12,5, как автоклавный ячеистый бетон, превышает на 10-15% прочность ячеистого бетона естественного режима твердения и на 20-30% прочность керамзитобетона. В частности, нами установлено, что призмочная прочность R_b полистиролбетона плотностью 1000 кг/м^3 превышает показатель, установленный СНиП 2.03.01-84* и действующими нормативными документами, для легких бетонов на 30%, а для ячеистых бетонов на 8-10%.

Прочность на местное сжатие полистиролбетона допускается рассчитывать по предлагаемой для легких бетонов формуле Баушингера.

Прочность на осевое растяжение и растяжение при изгибе выше на 10-30% аналогичных показателей, установленных СНиП 2.03.01-84* и действующими нормативными документами, для легких бетонов.

2. На основе экспериментальных данных получены зависимости прочностных характеристик полистиролбетона от плотности и вида заполнителя, подобраны математические функции в виде полиномов аппроксимации прочностных характеристик от технологических факторов.

Данные показатели рекомендуются для учета при проектировании несущих строительных конструкций и изделий из полистиролбетона.

3. Прочностные показатели материала достаточны для применения конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного полистиролбетона в диапазоне прочностей $800-1500 \text{ кг/м}^3$ в изготовлении сборных несущих конструкций и изделий гражданских зданий малой и средней этажности, таких как стеновые блоки, панели и перемычки, которые изготавливались из ячеистого бетона, крупнопористого шлакового и керамзитобетона повышенной прочности.

4 Исследование деформационных характеристик конструкционного полистиролбетона

4.1 Методика проведения испытаний

При получении в процессе экспериментальных исследований деформативных свойств конструкционного полистиролбетона реальных диаграмм состояния $\sigma_b - \varepsilon_b$, для возможности их использования в деформационной модели расчета, возникает необходимость аналитического представления таких диаграмм параметрическими точками, в соответствии с принятыми исходными данными, для которых реализуется модель расчета. При этом следует рассматривать трансформирование диаграмм состояния конструкционного полистиролбетона по части ее ограничения значением критической деформации ПСБ в предельном состоянии.

В расчет, таким образом, должна приниматься преобразованная (трансформированная) диаграмма, полученная на основе реальных диаграмм состояния ПСБ. Только смоделировав такую трансформированную диаграмму состояния с учетом возможного влияния на нее различных факторов, можно сделать ее пригодной для оценки напряженно-деформированного состояния и прочности нормальных сечений полистиролбетонных и железобетонных элементов при различных силовых воздействиях.

Изначально автором данной работы была принята предпосылка, что для конструкционного полистиролбетона на нисходящей ветви диаграммы сжатия, как для легкого бетона малой прочности, могут быть получены большие деформации. В данной работе измерялась величина статического модуля упругости, получаемая экспериментальным путем при сжатии образцов призм из конструкционного полистиролбетона на гидравлическом прессе при ступенчатом способе нагружения.

Геометрические размеры призм составляли 150x150x600 мм.

Начальный модуль упругости (модуль мгновенных деформаций) для полистиролбетона плотностей 800-1500 кг/м³ определялся по методике, аналогичной принятой в ГОСТ 24452-80 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона».

Условная предельная деформативность автором данной работы определялась индикаторами часового типа МИГ и МИГП с ценой деления 0,001 мм в процессе испытаний прочности на осевое сжатие образцов-призм из полистиролбетона. В наших исследованиях предельные сжимаемость и растяжимость ПСБ определялись только с целью получения сравнительных результатов и их анализа.

Предельные деформации конструкционного полистиролбетона при осевом сжатии автором работы определялись на 6 сериях неармированных образцов-призм геометрическими размерами 150x150x600 мм и плотностью от 850 до 1500 кг/м³.

Коэффициент Пуассона μ или начальный коэффициент поперечной деформации в данной работе определялся в соответствии с методикой, приведенной в ГОСТ 24452-80 экспериментальным способом на основании результатов суммарной деформации материала испытывавшихся на сжатие призм из конструкционного ПСБ геометрическими размерами 150x150x600 мм, при уровне напряжений, равном $0,3 R_{bn}$.

Коэффициент Пуассона μ вычисляли по формуле:

$$\mu = s_{2y} / s_{1y} \quad (4.4.1)$$

где ε_{2y} - приращение упругомгновенной относительной поперечной деформации образца, соответствующее уровню нагрузки $R_1 = 0,3R_p$ и замеренное в начале каждой ступени ее приложения.

Значения ε_{1y} и ε_{2y} определяют по формулам:

$$s_{1y} = s_1 - \sum s_{1n}; \quad (4.4.2)$$

$$s_{2y} = s_2 - \sum s_{2n}, \quad (4.4.3)$$

где ε_1 и ε_2 - приращения полных относительных продольных и поперечных деформаций образца, соответствующие уровню нагрузки $R_1 = 0,3R_p$ и замеренные в

конце ступени ее приложения; $\sum \varepsilon_{1n}$ и $\sum \varepsilon_{2n}$ - приращения относительных продольных и поперечных деформаций быстронатекающей ползучести, полученные при выдержках нагрузки на ступенях нагружения до уровня нагрузки $R_1 = 0,3R_p$.

Приращения относительных продольных и поперечных деформаций вычислялись как среднее арифметическое показаний приборов по четырем граням призмы.

Значения относительных деформаций ϵ_1 и ϵ_2 определялись по формулам:

$$s_1 = \Delta l_1 / l_1; \quad (4.4.4)$$

$$s_2 = \Delta l_2 / l_2, \quad (4.4.5)$$

где $\Delta l_1, \Delta l_2$ - абсолютные приращения продольной и поперечной деформаций образца, вызванные соответствующим приращением напряжений;

l_1, l_2 - фиксированные базы измерения продольной и поперечной деформации образца.

- приращения полных относительных и продольных деформаций быстронатекающей ползучести, полученные при 3-х минутных выдержках нагрузки на ступенях нагружения до уровня нагрузки, равной $0,3 R_{bn}$.

Для определения самопроизвольных (объемных) деформаций усадки конструкционного полистиролбетона использовались образцы – призмы размером $150 \times 150 \times 600$ и $40 \times 40 \times 160$ мм, в соответствии с принятой для испытаний методикой, аналогичной методике, приведенной в ГОСТ 24544-81 «Бетоны методы определения усадки и ползучести».

Режим твердения образцов при исследовании деформаций усадки (линейного укорочения) был выбран следующим: 1 серия П.П.1-1.6 – ПСБ естественного твердения, 2 серия П.П.1-2.6 – ПСБ после пропарки. Наблюдения над контрольными образцами проводились в течение 200 суток.

Значение переходного коэффициента K_1 от ПСБ призм с геометрическими размерами $40 \times 40 \times 160$ мм к базовым размерам устанавливалось экспериментально и составило 0,85.

Для получения надежных результатов измерения усадки образцы ПСБ выдерживались в специальном испытательном стенде в лабораторном помещении со среднегодовым температурно-влажностным режимом $t = 20 \pm 3^{\circ}C$ и $W = 75 \pm 10 \%$.

Постоянство температуры и влажности поддерживалось приборами для соблюдения условия гигротермического равновесия полистиролбетона и окружающей среды.

Линейные деформации усадки в вертикальном направлении на контрольных образцах измерялись на базе 100 мм стационарно установленными индикаторами типа МИГ и Mitutoyo, ценой деления 0,001 мм, прикрепленными к специально изготовленной по размерам образцов металлической раме.

Деформации усадки ПСБ в момент времени t вычислялись по формуле:

$$\varepsilon_S(t, t_w) = \varepsilon_S(\infty, t_w) [1 - e^{-\alpha_S(t - t_w)}], \quad (4.5.1)$$

где $\varepsilon_S(\infty, t_w)$ – предельное значение относительной деформации усадки с момента начала высыхания образца ПСБ, а α – величина принимается постоянной для данного вида бетона.

Режим твердения образцов для испытаний был выбран при исследованиях деформаций ползучести естественный.

Методика проведения экспериментальных испытаний ползучести образцов полистиролбетона и тяжелого бетона была принята аналогичной методике, приведенной в ГОСТ 24544-81. Использовались пружинные установки, разработанные для исследования ползучести ячеистого бетона.

Плотность ПСБ у исследуемых образцов отличалась в пределах ± 10 кг/м³ и составляла 1000 кг/м³. Требуемая плотность образцов бетона определялась в соответствии с методикой, аналогичной принятой в ГОСТ 27005-86* «Бетоны легкие и ячеистые. Правила контроля средней плотности» пункт 4 таблица 2.

Исследования проводились на образцах - призмах геометрическими размерами 40x40x160 мм не гидроизолированных от влагообмена с окружающей средой, в лабораторном помещении со среднегодовым температурно-влажностным режимом $t = 20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ и $W = 75 \pm 10\%$. Температура и влажность в помещении измерялись аспирационным психометром, а также термографами и гигрографами.

Постоянство температуры и влажности поддерживалось приборами для соблюдения условия гигротермического равновесия ПСБ и окружающей среды, автоматической системой, состоящей из теплового реле с температурным датчиком, нагревательных элементов и вентилятора.

Геометрические размеры образцов полистиролбетона и контрольных образцов из тяжелого бетона для проведения испытаний были приняты исходя из наи-

большого размера основного заполнителя - гранул полистирола равного 5 мм, согласно требованиям ГОСТ 10180-90. В соответствии с требованиями п. 5.8 ГОСТ 24544-81 при проведении испытаний на образцах, отличных от базовых, учитывался переходной коэффициент K_2 , который был установлен экспериментально и оказался равным 0,745.

Две серии по 12 образцов на заполнителях из песка и шлака П.П.1-1.7 и П.Ш.1-1.7 испытывались в пружинных установках при действии сжимающей нагрузки на протяжении 1060 суток при уровне напряжений, равном 0,6 призмочной прочности конструкционного полистиролбетона. Время выдерживания образцов ПСБ и контрольных образцов при неизменной нагрузке было выбрано согласно схеме, описанной в ГОСТ 24544-81, по которой полное затухание деформаций ползучести бетона происходит примерно через два года после начала испытаний. Явление ползучести в обычных тяжелых бетонах, в основном, прекращается из-за стабилизации химических процессов в материале изделия.

Сжимающая нагрузка была принята равной 435 кгс в размере не более $0,6R_{\text{разр}}$. Напряжение в образцах от внешней нагрузки было принято большим, чем рекомендуемое п. 4.3 ГОСТ 24544-81 ($0,3 \pm 0,005$ от призмочной прочности бетона, установленной перед началом испытаний), в связи с необходимостью более полного исследования картины деформативности и трещинообразования в материале и принятым относительно малым размером образцов для испытаний [55].

Параллельно во времени исследовались деформации ползучести 2 серий по 3 контрольных образца из тяжелого бетона на заполнителях из доменного гранулированного шлака и кварцевого песка. Нагрузка была принята равной 1200 кгс также в размере не более 0,6 от значения разрушающей.

Нагрузка на образцы передавалась через стальные шары, располагавшиеся в геометрических центрах стальных торцовых опорных плит.

Образцы загружали одновременным закручиванием болтов рычагами до заданного уровня напряжений ступенями по 10 кгс/см², с 4-х минутной выдержкой

на каждой ступени. Деформации, натекавшие за время выдержек, причислялись к деформациям ползучести.

Неизменность во времени длительной нагрузки контролировалось при помощи образцовых динамометров типа ДОСМ-3-1 и ДОСМ-3-3 с индикатором типа ИЧ ценой деления 0,01 мм.

Замеры по индикаторным приборам проводились через 0,5; 1; 3; 6; и 12 часов после передачи нагрузки, затем в течение 5 суток ежедневно, а затем один раз в две недели на протяжении 3 лет.

Линейные деформации в вертикальном направлении на рабочих и контрольных образцах измерялись на базе 100 мм стационарно установленными индикаторами типа МИГ и Mitutoyo, ценой деления 0,001 мм.

Статистическая обработка результатов проводилась с помощью специально разработанной программы на ЭВМ по формулам для малой выборки.

Относительные деформации ползучести определялись по формуле:

$$\varepsilon_n(t) = \varepsilon_d(t) - \varepsilon_T(t), \quad (4.6.2)$$

где $\varepsilon_d(t)$ – длительные деформации (с учетом быстронатекающих деформаций ползучести) отсчитываются от момента окончания загрузки образца;

$\varepsilon_T(t)$ – температурные деформации ненагруженных изолированных образцов – призм той же серии.

Показатели ползучести исследуемых бетонов определялись по следующим формулам:

- мера ползучести

$$C(t) = \frac{\varepsilon_n(t)}{\sigma}, \text{ МПа}^{-1}, \quad (4.6.3)$$

где σ – величина напряжения в образце, МПа.

- характеристика ползучести

$$\varphi(t) = \frac{\varepsilon_n(t)}{\varepsilon_0}, \quad (4.6.4)$$

где ε_0 – мгновенная упругая деформация в момент загрузки образца.

Коэффициент линейной температурной деформации исследовался на образцах – призмах размером 100x100x400 мм путем помещения их в морозильную камеру и сушильный шкаф. Линейные деформации на образцах измерялись путем контрольных замеров геометрических размеров образца до помещения его в условия пониженной (или повышенной) температуры и последующих замеров при выдержке образца в данных условиях в течение 5-6 часов.

Испытывались три серии образцов полистиролбетона, по три образца в каждой серии, средней плотностью 1000, 1250 и 1450 кг/м³ на инертном заполнителе из кварцевого песка и три серии образцов той же плотности на заполнителе из доменного гранулированного шлака.

Относительные температурные деформации образца-призмы из конструкционного ПСБ определялись по формуле:

$$\xi = (l_1 - l) / l_1, \quad (4.7.1)$$

где l_1 – начальная длина образца, а l – длина образца после нагрева до заданной температуры;

$$\alpha_{bt} = \xi \Delta T, \quad (4.7.2)$$

где разность температур $\Delta T = T_1 - T_2$; T_1 – заданная температура испытания образца; T_2 – температура, при которой температурные деформации образца условно приняты равными нулю ($+20 \pm 2$ °C).

Значение коэффициента линейного температурного расширения (деформации) рассчитывалось по формуле:

$$\alpha_{bt} = \frac{l_1 - l}{l_1} / T_1 - T_2. \quad (4.7.3)$$

Так как испытывались образцы ПСБ естественного твердения, при определении α_{bt} учитывалась величина усадки.

Максимальная температура нагрева образцов полистиролбетона составляла плюс 400°С, для подтверждения того, что при больших температурах начинается окислительная температурная деструкция (плавление) гранул вспененного полистирола.

Для моделирования деформаций и прочности полистиролбетона представляется наиболее близкой эмпирической формула Ю.В. Зайцева [27], позволяющая

найти распределение напряжений по контуру эллиптической ячейки, занятой гранулой пенополистирола, с полуосями a и b :

$$\sigma_{\theta} = p \frac{(1+k^2) \sin^2(\theta + \alpha) - \sin^2 \alpha - k^2 \cos^2 \alpha}{\sin^2 \alpha + k^2 \cos^2 \alpha}, \quad (4.7.8)$$

где $k=b/a$, θ – центральный угол, характеризующий положение рассматриваемой точки на контуре ячейки (полуось a лежит на оси O_x).

В частном случае для круговой ячейки микронапряжения находятся по формуле:

$$\sigma_{\theta} = p (1 - 2 \cos 2\theta) \quad (4.7.9)$$

а максимальные и минимальные напряжения равны $\sigma_{\theta}^{\max} = 3p$; $\sigma_{\theta}^{\min} = -p$.

Приведенные формулы являются справедливыми для построения расчетной модели конструкционного полистиролбетона, как пористого материала, для теплоизоляционного полистиролбетона данная формула менее применима так как не учитывает эффект взаимодействия между соседними ячейками (порами).

В теплоизоляционном полистиролбетоне отверстия расположены рядом и расстояние между ними соизмеримо с их размерами. При эффекте взаимодействия отверстий необходимо найти решение бесконечной квазирегулярной системы уравнений или вести расчет методом последовательных приближений.

В случае конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного полистиролбетона более высокой плотности 800-1500 кг/м³ при взаимодействии относительно равных отверстий (диаметр гранул принимался 3-5 мм) при их не слишком близком расположении одно от другого («перешеек» между отверстиями не меньше их диаметра) эффект взаимодействия выражен не очень сильно и им можно пренебречь.

4.2 Начальный модуль упругости

В Европейских нормах СЕВ и FIP [107] модуль деформации (упругости) конструкционного легкого бетона рекомендуется определять по формуле Поу:

$$E_{ls} = 0,04\rho_b \sqrt[3]{\rho_3 f_{cj}}, \quad (4.2.1)$$

где E_{ls} – секущий модуль деформаций в МПа; ρ – плотность бетона в возрасте 28 дней; f_{cj} – кубиковая прочность на сжатие в возрасте j дней, МПа.

Вышеприведенная формула имеет ориентировочный характер и значения модуля упругости для конструкционного полистиролбетона по ней можно получить лишь весьма приближенные.

По предложению авторов работы [40] для нормирования значений начального модуля упругости легких бетонов в исследуемом диапазоне плотностей от 850 до 1450 кг/м³ предложена зависимость:

$$E_b = 3130\rho_b \sqrt[3]{R_m}, \quad (4.2.2)$$

По данным проведенных нами испытаний было установлено, что с увеличением прочности и плотности полистиролбетона его начальный модуль упругости повышается, что подтверждается опытами В.Г. Довжика, В.Н. Россовского и их сотрудников [17], проведенных во ВНИИжелезобетона. Зависимость E_b от R_m ими была представлена только графически, не имея математического выражения.

А.А. Евдокимов и О.С. Дайнеко рекомендуют для определения теоретического модуля упругости полистиролбетона использовать формулу Дж. К. Маккензи [108], выведенную для физической модели упругого тела со сферическими отверстиями:

$$1/\kappa = 1/\kappa_0\rho + 3(1-\rho) + O[(1-\rho)^3], \quad (4.2.3)$$

$$(\mu - \mu_0)/\mu = 5(1-\rho)(3\kappa_0 + 4\mu_0)/(9\kappa_0 + 8\mu_0) + O[(1-\rho)^2], \quad (4.2.4)$$

где $1/\kappa$ – обратная величина объемной упругости материала (модуль упругости), ρ – плотность материала, μ_0 и κ_0 – численные характеристики однородной части материала, μ – const внешнего воздействия.

Данная формула для расчета упругих постоянных в аппроксимации к бетонам слишком абстрактна и более удобна для гидростатических расчетов жидкостей, наполненных мелкими пузырьками газа.

Чешский ученый Милан Гвезд для полистиролбетона плотностью 850 кг/м³ получил значение статического модуля упругости (эластичности) равное 9000 Н/мм² [103].

В работе Е.А. Король для определения начального модуля упругости теплоизоляционного полистиролбетона в диапазоне плотностей 200-400 кг/м³ была предложена формула:

$$E_b = 2320\rho_b\sqrt[3]{R_m} - 1785, \quad (4.2.5)$$

где R_m – кубиковая прочность на сжатие, МПа, а ρ_b – средняя плотность полистиролбетона, т/м³.

В работе Т.И. Милых [45] было установлено отличие начального модуля упругости конструкционно-теплоизоляционного полистиролбетона плотностью 500-800 кг/м³ от значений, нормируемых для легких бетонов СНиП 2.03.01-84* в среднем на 45%, и была предложена формула для его определения:

$$E_b = 1085\rho_b\sqrt[3]{10R_m} \quad (4.2.6)$$

С другой стороны, по данным А.А. Евдокимова и О.С. Дайнеко значение модуля упругости при сжатии полистиролбетона плотности 700-800 кг/м³ близко к нормативным характеристикам, приведенным в СНиП 2.03.01-84*, и в некоторых случаях превышает их.

Значение расчетного модуля упругости при растяжении ПСБ плотности 700-800 кг/м³ на 30% ниже, чем для керамзито- и керамзитоперлитобетона той же прочности на сжатие, но более высоких плотностей.

Нами установлено, что в случае постепенного нагружения призмы при меньшей скорости деформирования значения модуля упругости E_b были несколько выше, чем при большей скорости. Колебания температуры в диапазоне от -10 °С до +20 °С в лабораторном помещении при испытании призм не оказывают существенного влияния на значение модуля упругости материала, поэтому влиянием температуры на модуль упругости можно пренебречь.

Статистическая обработка экспериментальных данных свидетельствует о том, что для полистиролбетона в диапазоне плотностей 800-1450 кг/м³ нормировать E_b по единой с керамзитобетоном зависимости невозможно.

Значения начального модуля упругости E_b при сжатии и растяжении для полистиролбетона на различных заполнителях с влажностью 8 ± 2 % (по массе) можно принимать по таблицам 4.2.1 и 4.2.2.

Таблица 4.2.1 - Начальные модули упругости полистиролбетона на заполнителе из кварцевого песка

Марка по средней плотности (D), кг/м ³	Начальные модули упругости полистиролбетона на заполнителе из кварцевого песка при сжатии и растяжении (E_b) · 10 ⁻³ , МПа, при классе бетона по прочности на сжатие						
	B2,5	B3,5	B5	B7,5	B10	B12,5	B15
800	<u>2,9</u> 29,6	<u>3,4</u> 34,7	<u>4,0</u> 40,8	-	-	-	-
900	-	<u>3,8</u> 38,8	<u>4,5</u> 45,9	<u>5,5</u> 56,1	-	-	-
1000	-	-	<u>5,0</u> 51,0	<u>6,0</u> 61,2	<u>7,0</u> 71,4	-	-
1100	-	-	<u>7,9</u> 80,6	<u>8,3</u> 84,6	<u>8,6</u> 87,7	-	-
1200	-	-	-	<u>8,4</u> 85,7	<u>8,8</u> 89,7	<u>9,3</u> 94,8	-
1300	-	-	-	<u>9,0</u> 91,8	<u>9,6</u> 94,8	<u>10,2</u> 10,41	-
1450	-	-	-	-	<u>9,6</u> 94,8	<u>10,2</u> 104,1	<u>10,8</u> 110,2

Примечание: Над чертой указаны значения $E_b \cdot 10^{-3}$ в МПа, под чертой - в кгс/см².

Таблица 4.2.2 - Начальные модули упругости полистиролбетона на заполнителе из доменного гранулированного шлака

Марка по средней плотности D, кг/м ³	Начальные модули упругости полистиролбетона на заполнителе из доменного гранулированного шлака при сжатии и растяжении $E_b \cdot 10^{-3}$, МПа, при классе бетона по прочности на сжатие						
	B2,5	B3,5	B5	B7,5	B10	B12,5	B15
800	<u>3,8</u> 38,6	<u>4,2</u> 42,7	<u>4,6</u> 46,8	-	-	-	-
900	-	<u>4,0</u> 40,8	<u>4,4</u> 44,9	<u>4,8</u> 49,1	-	-	-
1000	-	-	<u>4,7</u> 47,8	<u>4,9</u> 50,0	<u>5,1</u> 51,7	-	-
1100	-	-	<u>6,2</u> 62,6	<u>6,5</u> 65,7	<u>6,8</u> 68,7	-	-
1200	-	-	-	<u>7,8</u> 85,7	<u>8,0</u> 89,7	<u>8,4</u> 94,8	-
1300	-	-	-	<u>8,4</u> 84,8	<u>8,8</u> 88,8	<u>9,2</u> 92,4	-
1450	-	-	-	-	<u>9,4</u> 94,8	<u>9,8</u> 98,8	<u>10,4</u> 104,6

Примечание: Над чертой указаны значения $E_b \cdot 10^{-3}$ в МПа, под чертой - в кгс/см².

На рисунке 4.2.1 показана зависимость между плотностью и модулем упругости для полистиролбетона и ячеистого бетона построенный по данным результатов испытаний, проведенных автором работы и Никишкиным В.А. [51, 52, 73, 77-79] в лаборатории Испытательного центра ОАО институт «УралНИИАС».

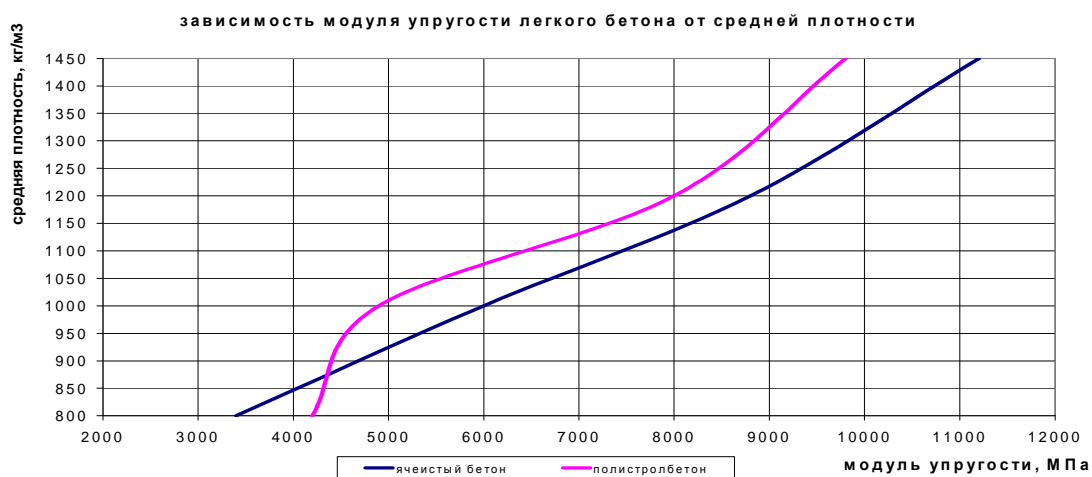


Рисунок 4.2.1 - Зависимость между плотностью и модулем упругости для полистиролбетона и ячеистого бетона

Полистиролбетон, начиная с плотности 875 кг/м^3 до плотностей, регламентируемых ГОСТом Р 51263-99, имеет модуль упругости на 20% ниже, чем у ячеистого бетона. Хотя зависимость для ячеистого бетона строилась по средним значениям, взятым из СНиП 2.03.01-84*, а отклонение от среднего значения для модуля упругости ячеистого бетона до 20% нормами допускается.

Видно, что кривую, показывающую данную нелинейную зависимость для ПСБ, можно разделить на три области, характеризующиеся перегибами функции $E_b = f(\rho_b)$, в диапазонах плотностей от 800 до 875 кг/м^3 , от 875 до 1200 кг/м^3 и от 1200 до 1450 кг/м^3 .

С точки зрения представлений физики бетонов перегибы кривой можно объяснить различным расположением (раздвижкой) гранул полистирола в растворной матрице материала. На первом участке кривой ПСБ по своим свойствам еще близок к теплоизоляционному материалу. Плотность упаковки гранул полистирола велика, растворная матрица на некоторых ее участках не полностью обволакивает гранулы, и место растворных стенок между заполнителем занимают поры от вовлеченного воздуха.

На втором участке кривой, ПСБ по своим свойствам близок к конструкционно-теплоизоляционному материалу и частичная поризация вовлеченными пузырьками воздуха уже не влияет на его модуль упругости. На модуль упругости

оказывает влияние только работа гранул полистирола в порах растворной матрицы.

На третьем участке кривой, ПСБ по своим свойствам близок к конструкционным легким бетонам, в частности к крупнопористому бетону. Раздвижка пор образованных гранулами полистиролбетона в структуре растворной матрицы достаточно велика и гранулы полистирола на упругость материала влияют не значительно.

По результатам проведенных экспериментов для конструкционного ПСБ в диапазоне плотностей от 900 до 1500 кг/м³ формула зависимости начального модуля упругости от плотности в первом приближении может быть скорректирована и примет такой вид:

$$E_b = 1235\rho_b\sqrt[3]{10R_m} \quad (4.2.7)$$

Коэффициент вариации для величины статического модуля упругости трех образцов-призм одного состава полистиролбетона составил от 8 до 17%.

Можно сделать вывод о том, что более мелкая ячеистая структура полистиролбетона плотностью от 800 до 1500 кг/м³ с фракцией гранул 2,5-5,0 мм является более жесткой, чем структура ячеистого бетона. В отличие от процесса деформирования обычных тяжелых бетонов и керамзитобетона развитие деформаций в полистиролбетоне прежде всего зависит от формостабильности стенок ячеек вокруг гранул пенополистирола, образующих композитную структуру.

4.3 Условная предельная деформативность

Европейскими исследователями [107] для легких бетонов была предложена следующая формула, аппроксимирующая предельные деформации сжатия:

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{ou} + \frac{f_{cu}}{E_{ou}}, \quad (4.3.1)$$

где ε_{cu} – предельная деформация при максимальной величине уровня напряжения осевого сжатия; ε_{ou} – самая малая предельная деформация бетона данного типа, прочность которого близка к нулю; E_{ou} – секущий модуль предельной деформации сжатия для данного типа бетона; f_{cu} – прочность бетона на сжатие (растяжение).

а) По данным испытаний А.А. Евдокимова и О.С. Дейнеко (НИИЖБ) [22] предельная сжимаемость конструкционно-теплоизоляционного ПСБ $\varepsilon_{осж}^{н.р.}$ плотностью 800 кг/м³ составила 1,7 мм/м.

По данным испытаний Т.И. Милых (НИИЖБ) [45] предельная сжимаемость конструкционного ПСБ $\varepsilon_{осж}^{н.р.}$ плотностью 700-800 кг/м³ находится в интервале 2,37-2,45 мм/м, что превышает указанную СНиП 2.03.01-84* характеристику для тяжелых бетонов в 2,0-2,25 раза, а для легких бетонов – в 1,2-2,0 раза.

По данным испытаний В.Г. Довжика, В.Н. Россовского и их сотрудников [17] предельная сжимаемость ПСБ колеблется в интервале от 1,4 до 2,2 мм/м и практически не зависит от его прочности. Испытания проводились на образцах полистиролбетона плотностью 250-500 кг/м³.

По данным ранее проведенных в ОАО институт «УралНИИАС» совместно с автором работы испытаний, предельные деформации сжатия для шлакозолополистиролбетона плотностью 1000 кг/м³ составляют от 0,85 до 1,6 мм/м [29].

б) Предельная растяжимость $\varepsilon_{\sigma.p}^{н.р.}$ конструкционного полистиролбетона определялась при значении напряжений равном 0,95R_{bh} (призменной прочности). По данным испытаний Евдокимова А.А. и Дейнеко О.С. (НИИЖБ) [21] предельная растяжимость конструкционного ПСБ $\varepsilon_{осж}^{н.р.}$ плотностью 800 кг/м³ составила 0,28 мм/м, что вдвое больше чем у тяжелых бетонов. Однако, по данным испыта-

ний Т.И. Милых предельная растяжимость $\epsilon_{б.р.}^{н.р.}$ ПСБ плотностью 700-800 кг/м³ изменяется в пределах 0,41 – 0,47 мм/м, что также выше, чем для тяжелых бетонов, в 1,3-6,0 раза, для легких бетонов – в 1,6-4 раза [45].

Е.А. Король отмечает [37], что коэффициент поперечных деформаций при растяжении образцов-призм полистиролбетона низкой плотности находится в диапазоне 0,22-0,28, что выше, чем у других видов бетонов. Для шлакозолополистиролбетона плотностью 1000 кг/м³ предельные деформации растяжения составляют от 0,05 до 0,35 мм/м [29].

В результате экспериментов, проведенных в ходе данной диссертационной работы, значения предельных деформаций сжатия для конструкционного полистиролбетона в диапазоне плотностей от 900 до 1450 кг/м³ составили 2,2-1,4 мм/м, а значения предельных деформаций растяжения составили 0,24-0,12 мм/м.

Результаты испытаний серий призм приведены в таблице 4.3.1.

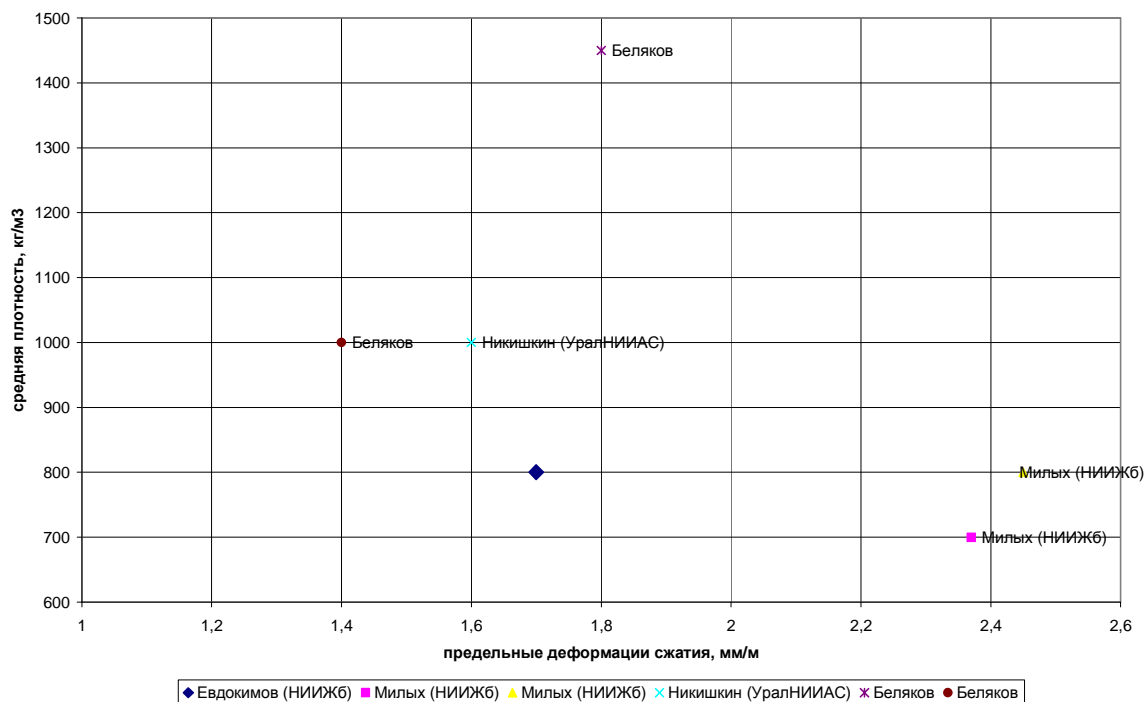
Таблица 4.3.1 – Результаты испытаний призм из полистиролбетона на определение условной предельной деформативности

№ п/п	Шифр серии образцов	Кол-во образцов, шт.	Плотность, кг/м ³	$\epsilon_{осж.}^{н.р.}$, мм/м	$\epsilon_{б.р.}^{н.р.}$, мм/м
1	П.П.1 – 2.2	3	900	2,2	0,24
2	П.Ш.1 – 2.2	5	950	2,0	0,2
3	П.П.1 – 2.2	3	1000	1,8	0,18
4	П.Ш.1 – 1.2	3	1020	1,8	0,17
5	П.П.1 – 1.2	3	1050	1,7	0,17
6	П.Ш.1 – 2.2	5	1075	1,6	0,16
7	П.П.1 – 2.2	3	1150	1,6	0,16
8	П.Ш.1 – 2.2	5	1220	1,5	0,15
9	П.П.1 – 2.2	3	1250	1,5	0,15
10	П.Ш.1 – 1.2	3	1300	1,4	0,14
11	П.П.1 – 1.2	6	1350	1,4	0,13
12	П.П.2 – 1.2	6	1450	1,4	0,12

Графическая интерпретация полученных нами результатов при определении предельных значений деформаций сжатия и растяжения, а также результатов полученных в работах других авторов показана на рисунке 4.3.1.

По данным проведенных нами экспериментальных исследований необходимо заметить, что предельная сжимаемость и предельная растяжимость ПСБ в диапазоне исследуемых плотностей от 800 до 1000 кг/м³ явно не зависят от его прочности на осевое сжатие. В диапазоне исследуемых плотностей от 1000 до 1450 кг/м³ определение предельной сжимаемости и предельной растяжимости конструкционного полистиролбетона возможно по обобщенной формуле (4.2.1) для легких бетонов. Увеличение количества цементного камня в структуре бетона при оптимальных составах ПСБ средней плотностью 1250-1450 кг/м³ способствует уменьшению его сжимаемости и растяжимости в раннем возрасте, что вероятно связано с усадочными явлениями.

а)



б)

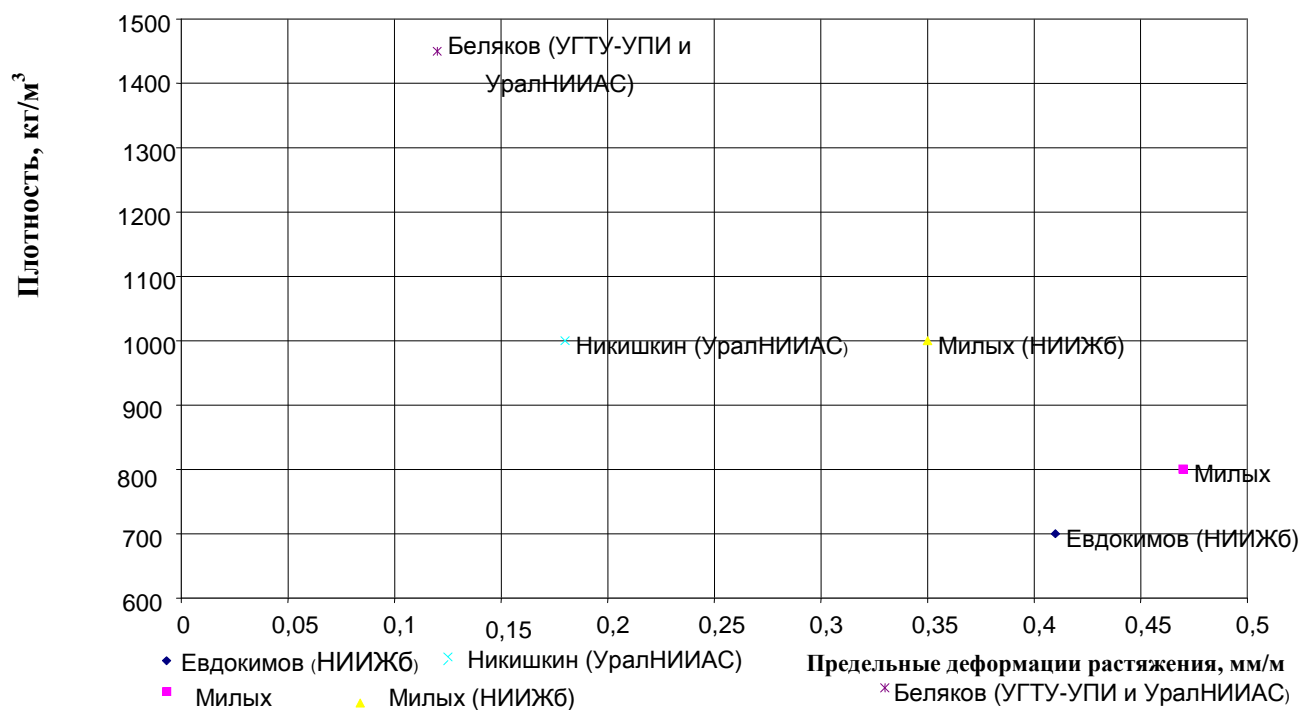


Рисунок 4.3.1 – Значения предельной сжимаемости (а) и растяжимости (б) в диапазоне исследуемых плотностей ПСБ, по данным автора и ранее проведенных исследований

4.4 Коэффициент Пуассона

Начальный коэффициент поперечной деформации конструкционного ПСБ μ (коэффициент Пуассона) на заполнителе из доменного гранулированного шлака составил для В7,5 – 0,23, на заполнителе из кварцевого песка составил 0,21 и превышает начальный коэффициент поперечной деформации тяжелого бетона на величину в 5 %. По данным экспериментов В.Г. Довжика [16], проведенных во ВНИИжелезобетона, значение коэффициента Пуассона μ для ПСБ средней плотностью 560 кг/м³ составило 0,2.

На основании данных значений коэффициента Пуассона и исходя из предположений теории упругости можно сделать предположение, что модуль сдвига ПСБ - G допускается принимать равным 0,4 соответствующих значений E_b , указанных в таблицах 4.2.1 и 4.2.2. Установлено, что величина коэффициента Пуассона почти не зависит от прочности ПСБ. Величина коэффициента Пуассона конструкционного ПСБ превышает величину коэффициента Пуассона конструкционного керамзитобетона равную 0,18 [1].

В целом можно сделать вывод о сходимости результатов экспериментальных данных ранее проведенных исследований с результатами, полученными в диссертационной работе в пределах вероятности статистического разброса значений.

4.5 Деформации усадки

Усадка полистиролбетона происходит за счет старения геля цементного камня при твердении и миграции воды в капиллярах (контракционная усадка), а также при карбонизации. Первая причина вызывает деформации усадки в начальный период твердения (при его естественном режиме), до достижения полистиролбетоном проектной прочности в возрасте 28 суток, так как в течение этого времени химические процессы твердения цементного камня еще не завершены.

Процесс карбонизации мало влияет на усадку полистиролбетонов. Они практически воздухонепроницаемы и процессы карбонизации проходят только по поверхности образцов. Наибольшая усадка у ПСБ происходит при испарении воды. Установлено, что деформации влажностной усадки ПСБ повышаются с уменьшением его прочности. Влажностная усадка образцов ПСБ плотностью 1100 кг/м^3 В 5 (М75) составляет $0,20 \text{ мм/м}$.

Наиболее интенсивно усадка всех образцов ПСБ естественного режима твердения проявлялась в первые 20-28 суток твердения, за которые ее деформации достигали 30-35 % от предельных. Такой же прирост происходил за последующие 50 суток, а затем в течение еще 120 суток. По истечении 200 суток деформации практически не увеличивались.

Деформации усадки ϵ_{yc} для образцов ПСБ естественного режима твердения плотностью 800 кг/м^3 составили $0,35 \text{ мм/м}$. При испытаниях образцов ПСБ после тепловлажностной обработки, в первые 30 суток твердения величина усадки составила 80% от конечных значений. Через 60 суток усадочные деформации практически прекратились.

У образцов призм плотностью 1000 кг/м^3 и кубов плотностью 1200 кг/м^3 в возрасте 6-8 месяцев были обнаружены усадочные трещины шириной раскрытия около $\delta=0,1 \text{ мм}$ так называемые волосяные, располагающиеся в центре образца «крест накрест». Деформация, которая соответствует появлению трещины при воздушном хранении, в результате усадки имеет величину 9×10^{-5} .

На поверхности конструкций из ячеистых бетонов (наружных и внутренних стеновых панелей, плит междуэтажных и чердачных перекрытий) допускается наличие усадочных трещин шириной раскрытия до $\delta=0,2$ мм.

Возникновение локальных усадочных трещин, обусловлено напряжениями от разницы деформаций усадки внешних и внутренних слоев полистиролбетона, его неоднородностью, а также возможно тем, что напряжения от усадки превышают прочность на растяжение растворной матрицы.

По данным исследований Евдокимова А.А. и Дайнеко О.С. [19-22] деформации усадки полистиролбетона В 3,5 (М50) на кварцевом песке и керамзитоперлитобетона той же марки примерно равны. Исследования, проведенные Милых Т.И., свидетельствуют о том, что усадка конструкционного полистиролбетона возрастает с увеличением расхода цемента и снижается с повышением количества плотного песка.

По истечении 150 суток наших испытаний усадка полистиролбетона была ниже на 14% усадки керамзитобетона аналогичной плотности 1000 кг/м^3 .

Полученные средние значения $Y = \frac{1}{n} \sum \frac{\Delta t}{\varepsilon_{i.}(t)} \cdot 10^5 = 3,95$ сут. и $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = 104,6$ сут. ($X_i = \Delta t$).

Дисперсии данных значений: $S_1^2 = 2885,8 \text{ сут}^2$, $S_1 = 53,71$ сут; $S_2^2 = 0,0643$ (10^5 сут)², $S_2 = 0,254$ сут; Корреляционный момент $m_{1,2} = 13,64 \text{ сут}^2$; коэффициент корреляции $r = 0,997$.

Уравнение регрессии имеет вид:

$$\frac{\Delta t}{\varepsilon_{i.}(t)} = (0,371 + 0,00426 \cdot \Delta t) \cdot 10^5 \text{ сут.}$$

Усадка ПСБ тепловлажностного режима твердения составляет 0,28-0,3 мм/м.

Данная величина сопоставима с результатами, полученными при исследованиях усадки крупнопористого бетона автоклавного твердения, и незначительно превышает величину усадки плотного мелкозернистого бетона.

В опытах И. Т. Кудряшова, А. Т. Баранова, А. В. Волженского, Л. Н. Розенфельда, С. А. Миронова, М. Я. Кривицкого и Е.С. Силаенкова [83] усадка автоклавных ячеистых бетонов при высыхании на стеллажах в лаборатории составляла 0,4...0,5 мм/м, что превышает полученные автором значения для ПСБ.

В результате этого не возникают опасения в склонности к более высокому трещинообразованию крупных элементов стен, покрытий и перекрытий из ПСБ.

На рисунке 4.5.1 показаны зависимости относительных деформаций усадки от вида легкого бетона, режима твердения, времени испытаний и средней плотности образцов-призм по данным испытаний автора работы и результатов, полученных в более ранних исследованиях.

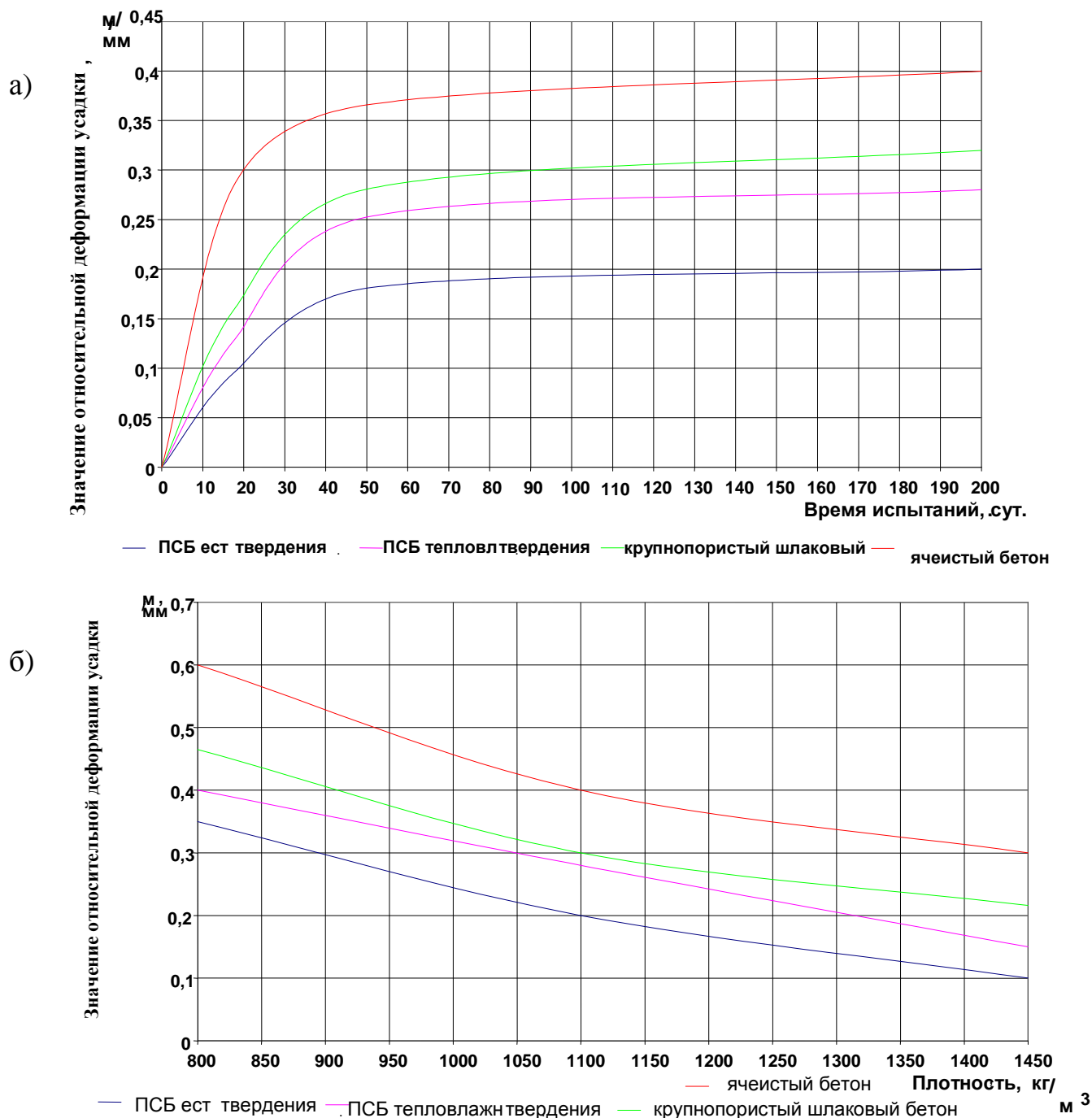


Рисунок 4.5.1- Зависимости относительных деформаций усадки от вида легкого бетона, режима твердения, времени испытаний (а), плотности испытанных образцов (б)

4.6 Прочность при длительном приложении нагрузки

4.6.1 Деформации ползучести

В настоящее время имеется сравнительно небольшое количество работ, в которых приводятся данные об исследовании ползучести полистиролбетона.

Ниже излагается метод аналитического описания ползучести полистиролбетона, основанный на результатах проведенных автором экспериментов.

По данным исследований Евдокимова А.А. и Дайнеко О.С. [22] деформации ползучести ПСБ марки 50 (В 3,5) на кварцевом песке превышают деформации ползучести керамзитоперлитобетона той же марки на 20%.

Согласно данным Арутюняна Н.Х. и Зевина А.А. приведенным в [12], влияние колебания температуры и влажности в описанных выше пределах на значение деформации ползучести бетона, загружаемого в молодом возрасте, представляется незначительным, и учитывалось автором работы при его определении формулой:

$$E_v(t) = \alpha_{bt} \cdot \Delta T(t), \quad (4.6.1)$$

где α_{bt} – коэффициент линейной температурной деформации бетона, принимаемый согласно п. 4.7, град⁻¹; $\Delta T(t)$ – приращение температуры в момент времени.

Известно, что призмная прочность обычного тяжелого бетона нарастает до 90-суточного возраста. Нами установлено, что у образцов ПСБ на заполнителе - кварцевом песке прослеживается та же картина нарастания прочности в раннем возрасте, а образцам ПСБ на доменном граншлаке данное свойство присуще даже в большей мере, в связи с большей активностью доменного шлака как заполнителя. При нарастании призмной прочности величина уровня напряжений будет уменьшаться и интенсивность нарастания деформаций ползучести ПСБ в молодом возрасте, как следствие, снижается.

Анализ расхождения между средними значениями деформаций образцов-близнецов после выдерживания под нагрузкой в течение 1095 суток приведен в таблице 4.5.1.

Для вычисления коэффициента времени релаксации n кривые деформаций ползучести были разбиты на участки, в пределах которых n принималось постоянным и равным:

$$n(t) = \frac{H}{E} \times \frac{t}{\frac{\varepsilon_{\infty} - \varepsilon_0}{\varepsilon_0 - \varepsilon_t}} \quad (4.6.5)$$

Теоретические кривые деформаций ползучести, рассчитаны по уравнению (4.6.5) с учетом изменения $n(t)$. Для построения теоретической модели ползучести бетонного стержня призматической формы рассматривалась контактная задача о сжатии n -го количества мезо-блоков с различными упругими и наследственными свойствами. Неоднородность обуславливается композиционной трехфазной структурой материала.

Доменный гранулированный шлак, принятый в качестве активного заполнителя конструкционного ПСБ, обладает большей пористостью по сравнению с кварцевым песком, и цементно-шлаковая растворная матрица имеет более низкий модуль упругомгновенной деформации $E = 2600$ МПа, сравнительно с модулем упругомгновенной деформации цементно-песчаной растворной матрицы $E = 3800$ МПа, при разнице в плотностях образцов около 3% и почти одинаковых расходах цемента.

Данным фактом можно объяснить большее значение меры ползучести образцов ПСБ на шлаковом заполнителе сравнительно с мерой ползучести образцов ПСБ на заполнителе из кварцевого песка.

Полученные при статистической обработке средние значения для ползучести: $\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum \frac{\Delta t}{\varepsilon_i(t)} \cdot 10^5 = 2,85$ сут. и $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = 102,6$ сут. ($X_i = \Delta t$); дисперсии данных значений: $S_1^2 = 2334,6$ сут², $S_1 = 48,317$; $S_2^2 = 0,0421$ (10^5 сут)², $S_2 = 0,205$ (10^5 сут), Корреляционный момент $m_{1,2} = 9,91$ сут.; коэффициент корреляции $r = 0,999$. Уравнение регрессии имеет вид:

$$\frac{\Delta t}{\varepsilon_i(t)} = (0,359 + 0,00426 \cdot \Delta t) \cdot 10^5 \text{ сут.}$$

Результаты исследований ползучести образцов приведены на рисунке 4.6.1.

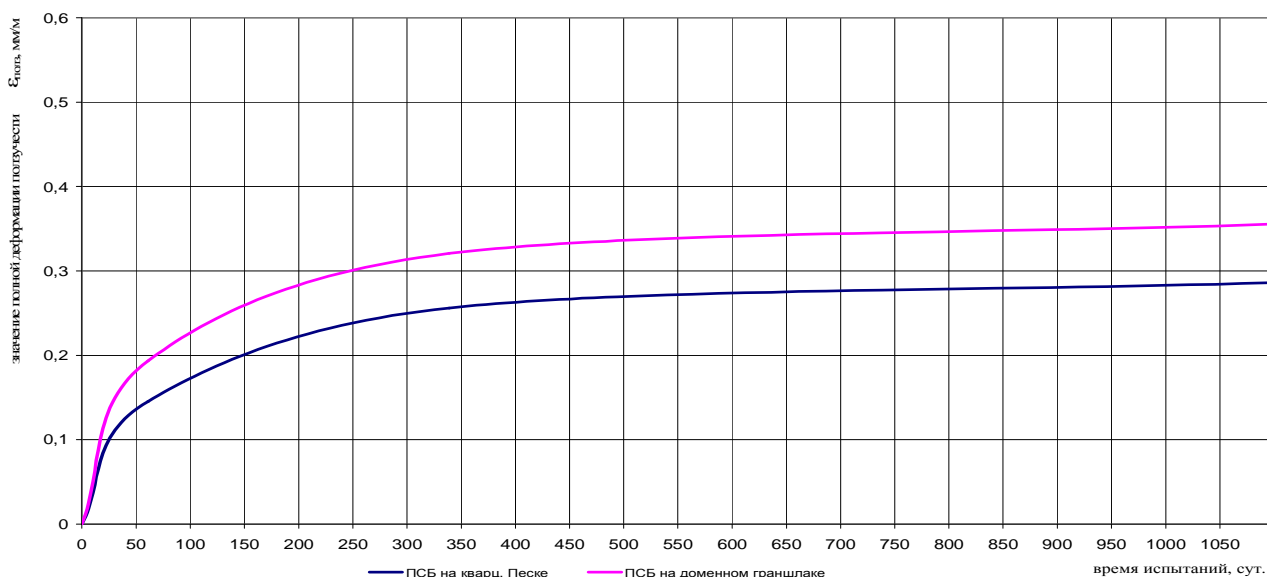


Рисунок 4.6.1 – Зависимость деформаций ползучести полистиролбетона плотностью 1000 кг/м^3 от времени испытаний

Ранее считалось, что роль основного заполнителя в конструкционном ПСБ – гранул полистирола в явлении деформации ползучести незначительна, из-за его слабой адгезии с цементным камнем, низких модуля упругости и прочности на сжатие. Более значительно деформации ползучести способствуют крупные поры, образующиеся в цементном камне вокруг гранул полистирола различного фракционного состава.

На основании анализа ранее проведенных исследований [54] и обработки результатов экспериментальных данных, полученных нами, можно сделать вывод о том, что чем однородней гранулометрический состав и меньше размеры гранул вспененного полистирола (фракция 2,5-5,0 мм), используемого в качестве основного заполнителя, тем меньше деформативность и выше прочность конструкционного полистиролбетона под действием длительной нагрузки.

Характер работы ПСБ при действии постоянной длительной нагрузки отличается от хорошо изученного характера работы тяжелого бетона и керамзитобетона [29]. Дополнительным фактором, повышающим деформативность материала, являются особенности его трехфазной композитной структуры. При разработке методики расчета конструкционного полистиролбетона на ползучесть, необходимо учитывать вклад от разрушения перемычек из растворной матрицы, окружающих основной заполнитель - гранулы вспененного полистирола.

Учитывая, что деформации ползучести полистиролбетона превышают аналогичные деформации поризованных легких бетонов на пористом мелком заполнителе, значение коэффициента кратковременной ползучести φ_{b1} , нормируемого п. 4.24 СНиП 2.03.01-84* Бетонные и железобетонные конструкции, рекомендуется принимать равным 0,68 - на доменном гранулированном шлаке и 0,65 - на плотном кварцевом песке.

Для ползучести ПСБ характерна высокая доля упругой составляющей сжатия и быстрое нарастание ее в начальном периоде времени испытаний. Полистиролбетон отчетливо выявил присущую композитным материалам на основе полимеров «запаздывающую» упругость, чем еще раз подтверждается существенное влияние полистирольной составляющей на прочностные и деформационные свойства исследуемого бетона.

Статистический анализ данных по ползучести, полученных при использовании методики, принятой в данной работе, показал, что она позволяет получать хорошо воспроизводимые результаты и может быть рекомендована для испытания конструктивных полистиролбетонов на ползучесть.

Пружинные установки, использовавшиеся для измерения ползучести, показаны на рисунке 4.6.1.



Рисунок 4.6.1 - Общий вид пружинных установок с образцами-призмами из ПСБ, испытываемыми на ползучесть при длительном действии нагрузки

Таблица 4.6.1 – Результаты испытаний по определению ползучести полистиролбетона плотностью 1000 кг/м³

№ п/ п	Наименование показателей	Полистиролбетон		Ячеистый бетон естеств. твердения
		на кварце- вом песке	на доменном гранулиров. шлаке	
1	Кубиковая прочность в МПа	9,8	10,7	8,2
2	Призменная прочность в МПа	7,2	8,2	6,8
3	Степень обжата образцов	0,6R _{разр}	0,6R _{разр}	0,6R _{разр}
4	Напряжение, действующее в образцах-призмах σ в МПа	4,32	4,92	7,6
5	Упругие деформации при загрузении образцов	0,210	0,240	0,280
6	Деформации ползучести при загрузении образцов в мм/м	0,024	0,028	0,036
7	Деформации ползучести от длительного загрузения призм на все время испытания в мм/м	0,265	0,321	0,41
8	Полные деформации ползучести $\epsilon_{\text{полз}}$ в мм/м	0,289	0,349	0,440
9	Полные деформации образцов $\epsilon_y + \epsilon_{\text{полз}} = \epsilon_\delta$ в мм/м	0,499	0,589	0,720
10	Отношение полных деформаций ползучести к упругим деформациям $\varphi_{(t)} = \frac{\epsilon_{\text{полз}(t)}}{\epsilon_y}$	2,38	2,45	1,57
11	Отношение полных деформаций ползучести к полным деформациям образца $\lambda_{(t)} = \frac{\epsilon_{\text{полз}(t)}}{\epsilon_\delta}$	0,579	0,592	0,610
12	Отношение упругих деформаций к полным деформациям образца $\nu = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_\delta}$	0,42	0,41	0,39
13	Наибольшая мера ползучести $C = \frac{\sigma_{\text{полз}}}{\sigma} 10^5 \frac{\text{мм/м}}{\text{кг/см}^2}$	2,86	3,05	3,2

4.7 Коэффициент линейной температурной деформации

Коэффициент линейной температурной деформации полистиролбетона (коэффициент линейного температурного расширения КЛТР) является не только эксплуатационной, но и деформационной характеристикой полистиролбетона и необходим для применения в расчетах железобетонных конструкций.

Изначально была принята предпосылка, что коэффициент теплового расширения полистиролбетона в основном зависит от модуля деформаций заполнителя (кварцевого песка или доменного гранулированного шлака), соотношения объемной концентрации в бетоне основного заполнителя – гранул полистирола и цементно-песчаной матрицы от влажности и температуры полистиролбетона.

На основании результатов проведенных нами технологических исследований установлено, что основной заполнитель полистиролбетона – гранулы полистирола (особенно в раннем возрасте после вспенивания) подвергаются расширению даже при сравнительно низких положительных температурах за счет нагрева находящегося в них воздуха [29].

В соответствии с данными СНиП 2.03.01-84*, α_{bt} при изменении температуры от -40 до +50 °С в зависимости от вида бетона принимается равным:

- для тяжелого, мелкозернистого бетонов и легкого бетона при мелком плотном заполнителе - $1 \cdot 10^{-5}$ 1/К;
- для легкого бетона при мелком пористом заполнителе - $0,7 \cdot 10^{-5}$ 1/К;
- для ячеистого и поризованного бетонов - $0,8 \cdot 10^{-5}$ 1/К.

Коэффициент теплового линейного расширения по рекомендациям приведенным в Европейских нормах СЕВ и FIP для легких бетонов [107] можно принимать $8 \cdot 10^{-6}$ 1/К, что, как это сказано выше, соответствует значениям, принятым СНиП 2.03.01-84* для ячеистого и поризованного бетонов. Для конструкционного полистиролбетона в исследуемом диапазоне плотностей значение α_{bt} СНиП 2.03.01-84* «Бетонные и железобетонные конструкции» не регламентируется.

На основании результатов проведенных автором экспериментов установлено, что коэффициент линейной температурной деформации α_{bt} полистиролбетона плотностью около 1200 кг/м^3 на заполнителе из доменного гранулированного

шлака равен $0,8 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, а на заполнителе из кварцевого песка несколько выше и равен $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Результаты испытаний по определению коэффициента линейной температурной деформации ПСБ совместно со значениями данного коэффициента для других видов легких бетонов, взятые из литературных источников, приведены в таблице 4.7.1:

Таблица 4.7.1 - Коэффициенты линейной температурной деформации различных видов легких бетонов в сравнении с полистиролбетоном

№ п/п	Вид заполнителя и тип бетона	Плотность, кг/м ³	Прочность на сжатие R, МПа	α_{bt} , $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
1	2	3	4	5
1	Полистиролбетон на доменном гранулированном шлаке (при $t_{нагр}$ от -40 до $+80$ °С)	1000	8,5	5,5
		1250	10,2	8
		1450	14,5	10,2
2	Полистиролбетон на кварцевом песке (при $t_{нагр}$ от -40 до $+80$ °С)	1000	7,6	6,5
		1250	9,8	10,0
		1450	15,2	11,7
3	Ячеистый бетон (при $t_{нагр}$ от -40 до $+50$ °С) (данные А.А. Кудрявцева)	1050	-	8,0
4	Крупнопористый бетон (при $t_{нагр}$ от -40 до $+50$ °С) (данные А.А. Кудрявцева)	1240	-	9,0
5	Керамзитобетон (при $t_{нагр}$ от -40 до $+50$ °С) (данные А.А. Кудрявцева)	1020	13,0	5,5
		1120	16,3	6,9
		1250	-	8,6
		1540	24,2	11,4

Долю деформаций от давления внутри гранул пенополистирола разогретого воздуха можно подсчитать лишь теоретически с помощью термоэластических уравнений Дюгамеля-Неймана для частного случая. Для этого необходимо ре-

шить задачу о температурных напряжениях сферической оболочки, ограниченной сферами радиусов b и a ($b < a$), (гранулы полистирола) при симметричном относительно его центра распределении температуры с помощью уравнения:

$$P = (3\lambda + 2\mu)C_1 - \frac{4\mu}{r^3}C_2 - \frac{4\mu\beta}{\lambda + 2\mu}\varphi(r), \quad (4.7.4)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; $\varphi(r)$ – функция расстояния от центра сферы; μ – модуль сдвига; β – коэффициент повышения температуры, C_1 и C_2 – произвольные постоянные, которые находятся при введении граничных условий $P=0$ для $r = b$ и для $r = a$ по формулам приведенным ниже:

$$(3\lambda + 2\mu)C_1 = \frac{4\mu\beta[a^3\varphi(a) - b^3\varphi(b)]}{(\lambda + 2\mu)(a^3 - b^3)}, \quad (4.7.5)$$

$$C_2 = \frac{\beta a^3 b^3 [\varphi(a) - \varphi(b)]}{(\lambda + 2\mu)(a^3 - b^3)}. \quad (4.7.6)$$

Доля деформаций при $t = -40$ °С от вакууммирования воздуха внутри гранул также возможно подсчитать лишь теоретически с помощью дифференциальных уравнений теории упругости и вследствие того, что данная величина для исследуемого вида бетона представляется незначительно малой, ею было решено пренебречь. Данный факт предположительно объясняется тем, что из-за низкого модуля деформаций доменного гранулированного шлака его присутствие в полистиролбетоне не сдерживает температурных деформаций цементного камня, коэффициент линейного расширения которого колеблется в зависимости от влажности. Полученные результаты в целом соответствуют значениям, принятым в СНиП 2.03.01-84* для ячеистого и поризованного бетонов. Для сравнения можно привести данные, полученные Л.А. Осиповым и С.Р. Медведевым, приведенные в книге Пирадова А.Б. [68], при нагреве керамзитобетона плотностью 1250 кг/м^3 получено значение $\alpha_{bt} = 0,86 \cdot 10^{-5} \text{ 1/К}$.

При наличии данных о минералогическом составе заполнителей, расходе цемента, степени водонасыщения бетона, морозостойкости и т. д. допускается принимать другие значения α_{bt} , обоснованные в установленном порядке. Для расчетной температуры ниже -50 °С значения α_{bt} принимаются по экспериментальным данным.

Было исследовано поведение полистиролбетона при нагревании с целью ускорения деструкции пенополистирольных гранул. Поэтому представляло интерес ускорить процесс старения путем нагревания, для этого образцы нагревались, через интервал 50 °С в область интервала температур от 50°С до 200°С, нагрев изотермической выдержки составлял 1 час. Измерялись потери массы и прочности. Результаты испытания кубов представлены в таблице 4.7.2.

Таблица 4.7.2 - Поведение полистиролбетона при нагревании

Показатели	Температура нагрева, °С			
	50	100	150	200
Потеря массы, %	0,5	2,0	4,8	6
Потеря прочности, %	0,5	2,6	3,2	3,3

Известно, что в процессе эксплуатации пенополистирол подвержен процессу старения, изменяет свою структуру, а именно повышает плотность и теплопроводность. Действительно подтвердились известные в литературе данные, что полистиролбетон подвержен деструкции при температуре 85°С, после нагрева образца до 100°С гранулы пенополистирола превратились в бисерную смолу.

Исследование температурных деформаций конструкционного полистиролбетона, проведенное по методике НИИСтройфизики разработанной для ячеистых бетонов (работа Г.И. Вейденбаума), привело к разработке эмпирических формул для вычисления коэффициента температурной деформации (в первом приближении) в интервале температур от – 40 до + 80 °С в зависимости от влажности по объему ω (%) и температуры (t):

$$\alpha_{bt-} = 8,04 + 0,366\omega + 0,004\omega^2 + (0,064 - 0,004\omega + 0,0002\omega^2)t,$$

$$\alpha_{bt+} = 8,04 - 0,189\omega + 0,005\omega^2 + (0,064 - 0,005\omega + 0,0007\omega^2)t \quad (4.6.7)$$

Нижний температурный предел, который выдерживают гранулы пенополистирола без особых изменений, составляет - 180 °С. Учитывая, что температурное расширение пенополистирола весьма незначительно, следует отметить, что на практике он выдерживает все температуры, которые имеют место в типовом строительстве.

Выводы

1. Установлены значения деформационных характеристик полистиролбетона в диапазоне плотностей от 800 до 1500 кг/м³ не нормируемых ГОСТ Р 51263-99 Полистиролбетон: начального модуля упругости, коэффициента Пуассона, предельной деформативности и коэффициента температурного расширения.

Проведенные эксперименты позволяют сформулировать основные положения высокой устойчивости материала к воздействиям температурных деформаций (сравнительно с другими видами легких бетонов). Даже после деструкции пенополистирольных гранул бетон сохраняет несущую способность.

3. Проведенное нами определение в натуральных условиях деформативных характеристик полистиролбетона объемных элементов и конструкций [51, 52, 77-80] полностью подтвердило данные лабораторных испытаний. Кроме того, теоретически рассчитанные характеристики температурных деформаций полистиролбетона по предложенным формулам 4.6.7 показали достаточно высокую сходимость с экспериментальными данными.

3. Полученные результаты исследования деформационных характеристик полистиролбетона в диапазоне плотностей от 800 до 1500 кг/м³ включены в Территориальные градостроительные нормы Свердловской области «Бетонные и железобетонные конструкции из полистиролбетона» (Приложение 3).

5 Исследование эксплуатационных характеристик конструкционного полистиролбетона

5.1 Методика проведения испытаний

Автором данной работы проводились испытания 6 серий образцов, на заполнителе из дробленого кварцевого песка и 6 серий на заполнителе из гранулированного доменного шлака ОАО «Серовский металлургический завод им. А.К. Серова», плотностью 850, 950, 1050, 1250, 1350 и 1450 кг/м³. Среднее значение плотности образцов каждой серии не отличалось от минимального более чем на 50 кг/м³. Каждая серия состояла из 5 контрольных образцов и 5 основных образцов. Для проведения испытаний использовались кубы геометрическими размерами 100x100x100 мм без видимых внешних дефектов.

Определение морозостойкости полистиролбетона проводили согласно действующим нормативам по изменению прочности на сжатие. Для образцов плотностью от 850 до 1050 кг/м³ метод определения морозостойкости был принят базовым – первым, в соответствии с требованиями таблицы 1 ГОСТ 10060.1-95 «Методы определения морозостойкости. Общие требования». Для образцов плотностью от 1250 до 1450 кг/м³ использовался ускоренный метод по ГОСТ 10060.3-95 с помощью дилатометра объемного дифференциального ДОД-100К/3.

Границы исследования морозостойкости конструкционного полистиролбетона были ограничены 50, 100 и 150 циклами замораживания и оттаивания в зависимости от плотности образцов. Более высокие значения морозостойкости необходимы для эксплуатации бетонов, использующихся в специальных сооружениях.

Образцы подвергали циклическому замораживанию-оттаиванию в низкотемпературном ларе (заводской номер № 00913130, аттестат сертификации № 37). Продолжительность одного цикла замораживания составляла 4 часа с момента установления в низкотемпературном ларе температуры воздуха $t = -15^{\circ}\text{C}$, оттаивания в воде – 2 часа при $t = 20^{\circ}\text{C}$, так как работа проводилась в одну смену.

Образцы испытывали через 4 часа после извлечения их из ванны оттаивания. По окончании 150 циклов попеременного замораживания и оттаивания отмечены дефекты, появившиеся на образцах обеих серий, после чего кубы испытаны на прочность при сжатии.

Оценку морозостойкости по потере прочности при сжатии образцов ПСБ при попеременном их замораживании и оттаивании производили путем сравнения прочности основных и контрольных образцов в насыщенном водой состоянии.

Среднюю потерю прочности образцов в % вычисляли по формуле:

$$\Delta = \frac{R_{\text{контр}} - R_{\text{осн}}}{R_{\text{контр}}} \cdot 100, \quad (5.1.1)$$

где $R_{\text{контр}}$ – среднее арифметическое значение предела прочности при сжатии контрольных образцов, МПа; $R_{\text{осн}}$ – среднее арифметическое значение предела прочности при сжатии основных образцов после испытания их на морозостойкость, МПа.

Определение коэффициента теплопроводности проводилось методом Бокка при стационарном тепловом потоке и разности температур на противоположных гранях 10 К. Исследовались образцы полистиролбетона – пластины размером 250x250x50 мм по 5 штук в серии по методике, аналогичной методике принятой в ГОСТ 7076-99. Образцы испытывались в абсолютно сухом состоянии, в соответствии с требованиями методики квазистационарного режима. Теплопроводность также определялась прибором ИТП-МГ4"250" (зав.н.443 СКБ «Стройприбор»).

Было испытано более 30 серий образцов отличающихся плотностью (от 900 до 1450 кг/м³), режимом твердения (естественным или тепловлажностным) и инертным заполнителем (доменным гранулированным шлаком ОАО «Металлургический завод им. А.К.Серова или кварцевым песком ЗАО «Карьер Гора Хрустальная»). Во всех случаях нормировались размеры полистирольных гранул (2-5 мм) и их насыпная плотность.

Вычисления коэффициента теплопроводности λ в Вт/м·К проводили по формуле:

$$\lambda = \frac{q \cdot \delta}{T_1 - T_2}, \quad (5.1.1)$$

где q – плотность теплового потока через образец, Вт/м²; δ – толщина образца, м; T_1 – температура горячей поверхности образца, К; T_2 – температура холодной поверхности образца, К.

Определение коэффициента паропроницаемости μ проводилось в соответствии с требованиями ГОСТ 25898-83.

Испытания проводились на 6 сериях по три образца из полистиролбетона (Ц.П.1-1.11 и Ц.Ш.1-1.11) цилиндрической формы геометрическими размерами $d = 100$ мм, $h=37$ мм (при $\varphi_{отн} = 70\%$).

Коэффициент паропроницаемости μ в г/м·ч·Тор вычислялся как среднее арифметическое результатов испытания трех образцов по формуле:

$$R = \frac{P_1 - P_2}{q} - \frac{\delta_B}{\mu_B}, \quad (5.1.2)$$

где R - сопротивление паропроницанию слоя материала R в кв.мчПа/мг; P_1 - парциальное давление насыщенных паров воды при температуре испытания, определяемое по таблице, Па; δ_B - толщина воздушного слоя, равная расстоянию от уровня воды в стеклянной чашке ЧВ до нижней грани образца в обойме при последнем взвешивании, м; μ_B - паропроницаемость воздуха в металлической обойме с образцом, равная 1,01 мг/м·ч·Па; P_2 - парциальное давление паров воды над образцом, Па.

Плотность потока водяного пара через образец q в мг/ч·кв.м вычислялась по формуле:

$$q = \frac{\Delta m}{\Delta \tau F}, \quad (5.1.3)$$

где Δm - уменьшение массы чашки ЧВ с дистиллированной водой за время $\Delta \tau$, мг; $\Delta \tau$ - время между двумя последовательными взвешиваниями, ч; F - площадь образца, м². Величина P_2 вычислялась по формуле:

$$P_2 = \frac{\varphi P_1}{100 \%}, \quad (5.1.4)$$

где φ – среднее значение относительной влажности воздуха в шкафу с образцами за последние 7 суток испытания, определяемое по показаниям гигрографа и аспирационного психометра, %.

5.2 Морозостойкость

Проведенный Ермиловой В.С. и Степановой В.Ф. [23] комплекс исследований полистиролбетона на камчатских шлаках установил, что шлакополистиролбетон, обладая начальными пассивирующими свойствами по отношению к арматуре, сохраняет их во времени при многократном попеременном увлажнении и высушивании.

Долговечность пенополистирольных гранул в полистиролбетоне исследовалась М. Гвuzдом [103]. Установлено, что по прошествии 10 лет эксплуатации стеновых панелей из ПСБ плотностью 850 кг/м^3 разрушения гранул пенополистирола с последующим выделением стирола под воздействием агрессивных газов окружающей среды и температурного влияния не произошло даже в поверхностных слоях панелей.

По данным Ли А.В. [42], долговечность ограждающих конструкций с использованием пенопластов, в т.ч. и пенополистирольных варьируется от 13 до 43 лет. Данные значения долговечности более справедливы для теплоизоляционного полистиролбетона низкой плотности и пенополистирольных плит. Для конструкционного ПСБ с меньшим содержанием гранул долговечность значительно выше.

Сегодня, существуют данные натуральных наблюдений и экспертное заключение исследовательской лаборатории фирмы BASF, которые доказывают, что полистирольные гранулы в бетоне конструкции, заложенные в него около 30 лет назад, не подверглись необратимым изменениям и устойчивы к старению. Плиты из теплоизоляционного ПСБ сохраняют стабильные форму и размеры, длительное время не подвергаясь деформациям ползучести.

Исследование морозостойкости конструкционного полистиролбетона представляется очень важным в данной работе, так как от показателя морозостойкости материала напрямую зависит его долговечность, что особенно актуально для тех климатических условий, где присутствуют сезонные изменения температуры с периодическим переходом нулевой температурной отметки.

Морозостойкость полистиролбетона является физической характеристикой материала, связанной с его плотностью, и характеризует способность ПСБ в

насыщенном водой состоянии выдерживать определенное число циклов попеременного замораживания и оттаивания.

По данным исследований свойств полистиролбетона на заполнителе из камчатских шлаков, проведенных в НИИЖБ В.С. Ермиловой и В.Ф. Степановой, ослабление, разрыхление контактной зоны цементного камня и полистирола при воздействии знакопеременных температур (попеременное замораживание и оттаивание) не оказывает существенного влияния на прочностные и эксплуатационные (морозостойкость, теплопроводность, водопоглощение, сорбцию) характеристики бетона [23].

В.Г. Парфенов выдвинул идею о том, что показатель морозостойкости ПСБ плотностью 800 кг/м^3 и выше представляет большой интерес, так как он в наружных стеновых конструкциях (панели, блоки и другие объемные изделия) вследствие непосредственного воздействия окружающей среды может находиться в водонасыщенном состоянии. По данным его исследований морозостойкость конструктивного ПСБ составила не менее 40 циклов [65, 66].

В лаборатории НИИСФ г. Москва были проведены исследования на долговечность и необходимые испытания свойств пенополистирольного заполнителя в составе пенополистирольных плит на анализ характерных циклических изменений температуры наружного воздуха в годовом цикле для климатических условий средней полосы России. В климатической камере было смоделированы температурно-влажностные воздействия на фрагменты бетонных конструкций, в которых содержится пенополистирол. Всего было проведено 80 циклов испытаний образцов. Получены следующие выводы, что образцы успешно выдержали циклические испытания на температурно-влажностные воздействия в количестве 80 циклов, что может быть интерпретировано как соответствующее количество условных лет эксплуатации многослойных ограждающих конструкций с амплитудой температурных воздействий $\pm 40^\circ \text{C}$ [3].

На основании результатов испытаний В.Г. Довжика, В.Н. Россовского и их сотрудников [16, 17] марка по морозостойкости теплоизоляционного ПСБ существенно повышается с увеличением его плотности и прочности: например, при

увеличении плотности материала на 250 кг/м^3 и прочности на 2 МПа его марка по морозостойкости увеличивается в 2,15 раза.

В.Н. Панталеенко и Л.С. Крупенская исследовали морозостойкость бетона при введении в него полистирольных гранул [64]. Т.И. Милых для полистиролбетона на кварцевом песке получила предельное значение морозостойкости F равное 350 циклам [45]. В процессе испытания на морозостойкость в воздушной среде было достигнуто увеличение прочности на сжатие стиропорбетона плотностей $2180\text{-}2360 \text{ кг/м}^3$ по сравнению с обычными бетонами. Наибольший прирост $R_{сж}$ был достигнут за 150 циклов – 28 %, за 300 циклов общее увеличение $R_{сж}$ достигло 35%.

Внешний вид образцов ПСБ после проведения испытаний показан на рисунке 5.2.1.



Рисунок 5.2.1 – Общий вид 6 серий контрольных образцов-кубов ПСБ после проведения испытаний на циклическое замораживание и оттаивание

Коэффициент морозостойкости вычислялся по формуле:

$$K_{\text{мрз}} = \frac{\sigma_{\text{м}}}{\sigma}, \quad (5.2.2)$$

где $\sigma_{\text{м}}$ – прочность основных образцов при сжатии, подверженных испытаниям на морозостойкость, МПа; σ – прочность контрольных образцов в сухом состоянии, МПа.

Характерным для полистиролбетона при замораживании является уменьшение «микротрещин сцепления», определяемых величиной напряжения R_t^0 . Значение этой характеристики у полистиролбетона выше, чем у бетонов с плотной структурой [64].

Свидетельством не морозостойкости структуры может служить характеристика $\frac{R_t^v - R_t^0}{R_{iD}}$, которая определяет по существу условный путь, от интенсивного развития микротрещин зоны сцепления, до соединения их с микротрещинами в цементном камне. Увеличение этого отношения может судить об увеличении области образования трещин в ПСБ, а уменьшение, наоборот, - о развитии деструктивных процессов в цементно-песчаном камне.

Для полистиролбетона, в отличие от бетонов плотной структуры, характерным является медленное увеличение данной зоны для всего диапазона температур и влажности, что может быть свидетельством того, что деструктивные процессы при замораживании не происходят.

Наиболее близкой формулой, описывающей зависимость морозостойкости от водопоглощения образцов, по мнению автора работы, является формула, предложенная Силаенковым Е.С. [83] для ячеистых бетонов плотностью 500-600 кг/м³:

$$M(F) = 397 - 8,26W + 0,41W^2, \quad (5.2.3)$$

где M – морозостойкость бетона, циклы; W – водопоглощение бетона, масс. %.

Для полистиролбетона плотностью 800-1000 кг/м³ данная корреляционная зависимость морозостойкости от водопоглощения, по результатам испытаний проведенных в ОАО «УралНИИАС» с участием автора работы, несколько изменится и примет вид:

$$M(F) = 415 - 8,35W + 0,45W^2. \quad (5.2.4)$$

Среднее квадратичное отклонение относительно линии регрессии для уравнения (5.1.2) составит 6,9 цикла.

Матрицы планирования и результаты экспериментов, полученных при реализации матриц, а также статистическая обработка экспериментальных данных приведены в приложении 2 (табл. П.2.). Средние значения откликов экспе-

риментов по строкам планов для шести участков области исследования сведены в табл. П.2 Приложения 2.

Таблица 5.2.1-Исследование морозостойкости конструкционного ПСБ на заполнителе из кварцевого песка в диапазоне 0-150 циклов замораживания и оттаивания

Номер образцов	Контрольные образцы		Основные образцы		R _{контр.} – R _{осн.} , Мпа	Δ, %	Потери по массе, %	Циклы (X ₂)
	ρ, кг/м ³ (X ₁)	R, МПа	ρ, кг/м ³	R, МПа				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	895	6,5	897	6,5	0	0	3,0	50
2	856	6,7	844	6,4	0,3	4,5		
3	813	5,8	807	5,6	0,2	3,4		
4	850	6,7	855	6,5	0,2	3,0		
5	810	5,8	814	5,6	0,2	3,4		
Среднее	-	-	-	-	-	3,6		50
1	950	7,2	946	6,8	0,3	4,2	4,0	100
2	955	7,2	953	6,9	0,3	4,2		
3	963	7,5	967	7,2	0,3	4,0		
4	930	7,3	925	7,1	0,2	2,7		
5	945	7,6	945	7,0	0,3	3,9		
Среднее	-	-	-	-	-	3,8		100
1	1020	7,7	1020	7,3	0,4	5,1	3,5	100
2	1060	8,2	975	7,8	0,4	4,8		
3	1015	7,8	1005	7,4	0,3	3,8		
4	1030	8,0	1030	7,7	0,3	3,7		
5	990	7,2	990	6,9	0,3	4,1		
Среднее	-	-	-	-	-	4,3		100
1	1220	10,7	1220	10,3	0,4	4,6	4,6	150
2	1215	9,8	1215	9,3	0,5	4,6		
3	1222	10,5	1222	10,0	0,4	4,6		
4	1245	11,8	1245	11,4	0,4	4,7		
5	1250	11,5	1250	11,1	0,4	4,5		
Среднее	-	-	-	-	-	4,6		150
1	1350	12,5	1350	12,0	0,5	12	4,5	150
2	1375	13,4	1375	13,1	0,3	9,7		
3	1365	13,0	1365	12,5	0,5	11,5		
4	1345	12,1	1345	11,4	0,7	9,1		
5	1360	12,8	1360	11,0	0,6	14		
Среднее	-	-	-	-	-	4,7		150
1	1415	14,9	1415	14,2	0,7	4,2	4,0	150
2	1450	15,2	1450	14,8	0,6	4,2		
3	1465	15,4	1465	14,8	0,6	4,3		
4	1445	15,3	1445	14,6	0,7	4,3		
5	1440	14,7	1440	14,0	0,7	4,5		
Среднее	-	-	-	-	-	4,3		150

Таблица 5.2.2 - Исследование морозостойкости конструкционного ПСБ на заполнителе из доменного гранулированного шлака в диапазоне 0-150 циклов замораживания и оттаивания

№ образцов	Контрольные образцы		Основные образцы		R _{контр.} – R _{осн.}	Δ, %	Потеря по массе	Циклы (X ₂)
	ρ, кг/м ³ (X ₁)	R, МПа	ρ, кг/м ³	R, МПа				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	845	6,5	897	6,5	0	0	3,2	50
2	850	6,7	844	6,4	0,3	4,5		
3	843	5,8	807	5,5	0,3	5,1		
4	850	6,7	855	6,4	0,3	4,5		
5	840	5,8	814	5,5	0,3	5,1		
среднее	-	-	-	-	-	3,8		50
1	940	7,4	946	6,9	0,5	4,0	4,0	100
2	935	7,5	953	7,0	0,5	4,3		
3	945	7,8	967	7,4	0,4	3,9		
4	930	7,5	925	7,0	0,5	3,6		
5	945	7,6	945	7,2	0,4	3,9		
среднее	-	-	-	-	-	3,9		100
1	1050	7,7	1020	7,3	0,3	3,9	3,8	100
2	1090	8,4	1050	8,0	0,4	4,8		
3	1035	8,3	1015	7,9	0,4	4,8		
4	1060	8,5	1035	8,1	0,4	4,7		
5	1020	7,6	1000	7,3	0,3	3,9		
среднее	-	-	-	-	-	4,4		100
1	1235	11,0	1220	10,4	0,6	4,8	4,7	150
2	1190	10,2	1180	9,7	0,5	4,6		
3	1220	11,0	1205	10,5	0,5	4,6		
4	1245	11,2	1235	10,8	0,4	4,4		
5	1215	11,5	1200	11,0	0,5	4,6		
среднее	-	-	-	-	-	4,6		150
1	1340	13,0	1325	11,5	0,5	4,5	4,6	150
2	1365	13,7	1350	12,2	0,6	4,5		
3	1360	13,0	1340	11,6	0,6	4,6		
4	1355	12,5	1340	11,2	0,5	4,0		
5	1360	12,8	1340	11,5	0,6	4,7		
среднее	-	-	-	-	-	4,5		150
1	1465	14,9	1453	14,3	0,6	4,5	4,2	150
2	1450	15,5	1440	14,5	0,6	4,5		
3	1455	16,0	1442	15,5	0,5	4,4		
4	1445	16,0	1431	15,3	0,7	4,8		
5	1440	15,5	1423	15,0	0,5	4,3		
среднее	-	-	-	-	-	4,5		150

5.3 Теплопроводность

Из эксплуатационных и теплофизических характеристик полистиролбетона наибольшее прикладное значение имеет его коэффициент теплопроводности.

Результаты наших испытаний в сравнении с полученными ранее результатами обобщены в таблице 5.3.1.

Таблица 5.3.1 – Анализ значений коэффициента теплопроводности по данным ранее проведенных исследований и наших экспериментов

№ п.п.	Исследователь	Заполнитель	Плотность, кг/м ³	Количество пенополистирола, л	Коэффициент теплопроводности, Вт/мК
1	2	3	4	5	6
1	Укроргтехсельстрой	кварцевый песок	800	1080	0,232
2	Евдокимов А.А. и Дайнеко О.С.	кварцевый песок	800	1050	0,24
3	Т.И. Милых (НИИЖБ)	кварцевый песок	700 800	1000	0,25 0,29
4	Ш. Эйк	-	800 980	900	0,18 0,23
5	М. Гвезд	кварцевый песок	850	1000	0,19
6	Р. Трауветтер	кварцевый песок	900	1000	0,27
7	В. Суссман	кварцевый песок	1000	1000	0,27
8	В.А. Беляков ОАО институт «УралНИИАС»	кварцевый песок	900	900	0,26
			1100	800	0,27
			1220	800	0,29
			1270	800	0,30
			1350	800	0,34
			1450	740	0,36
		доменный гранулированный шлак	875	880	0,24
			950	800	0,25
			1100	800	0,27
			1200	800	0,28
			1300	800	0,32
	1450	720	0,34		

Из таблицы видно, что на теплопроводность полистиролбетона влияют такие технологические факторы, как вид заполнителя или его отсутствие и количественное содержание пенополистирольного заполнителя на 1 м³. Помимо этого, косвенное значение имеет фракция пенополистирольных гранул. Большинство исследований проводилось с использованием фракции гранул от 0,5 до 10 мм с преобладанием в составе ПСБ крупной фракции диаметром 5-10 мм. При этом ухудшаются прочностные и деформационные характеристики полистиролбетона.

Применение фракции пенополистирольных гранул 2-5 мм позволяет получить мелкопористый скелет бетона и является наиболее оптимальным для конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного полистиролбетона.

По нашим данным и по данным Укроргтехсельстрой, использование пенополистирола из измельченного материала, по сравнению со вспененным пенополистиролом не влияет на теплопроводность, так как она в первую очередь зависит от объемной массы полистиролбетона, но измельченного материала всегда необходимо больше на 20-25%, чем вспененного.

По данным испытаний, проведенных нами в лаборатории Испытательного центра ОАО институт «УралНИИАС», значение коэффициента теплопроводности λ образцов ПСБ, не превышает рекомендуемое значение в разработанном авторами ТУ 5767-001-20875427-02.

Более высокие значения коэффициента теплопроводности полистиролбетона были получены в НИИЖбе при использовании материала с влажностью (ω) = 10 % [45]. Остальные исследования проводились с использованием материала в сухом состоянии, как это рекомендуется нормативными документами.

На основании результатов ранее проведенных испытаний [16, 17] для конструкционно-теплоизоляционного полистиролбетона была предложена обобщенная зависимость $\lambda^{\text{сух}}_{\text{псб}} = f(\rho^{\text{сух}}_{\text{псб}})$, которая аппроксимируется линейной зависимостью:

$$\lambda^{\text{сух}}_{\text{псб}} = 0,035 + 0,002 \rho^{\text{сух}}_{\text{псб}}, \quad (5.3.1)$$

где $\lambda^{\text{сух}}_{\text{псб}}$ - коэффициент теплопроводности ПСБ в сухом состоянии Вт/(м·К);

$\rho^{\text{сух}}_{\text{псб}}$ - плотность материала в сухом состоянии в кг/м³.

По данным [103] также установлены зависимости коэффициентов теплопроводности и его приращений на 1% влажности материала для ПСБ на портландцементе:

$$\lambda^{\text{сух}}_{\text{псб}} = 0,000196 \rho^{\text{сух}}_{\text{псб}} + 0,039; \quad (5.3.2)$$

$$\Delta\lambda = 0,0000083 \rho^{\text{сух}}_{\text{псб}} + 0,00045; \quad (5.3.3)$$

$$\Delta\lambda = 0,0288\lambda^{\text{сух}} + 0,000498; \quad (5.3.4)$$

а также для полистиролбетона на ГМЦ 50:

$$\lambda^{\text{сух}}_{\text{псб}} = 0,000268 \rho^{\text{сух}}_{\text{псб}} + 0,039; \quad (5.3.5)$$

$$\Delta\lambda = 0,0000048 \rho^{\text{сух}}_{\text{псб}} + 0,00018; \quad (5.3.6)$$

$$\Delta\lambda = 0,0115\lambda^{\text{сух}} + 0,0026. \quad (5.3.7)$$

Установлено, что коэффициент теплопроводности увеличивается пропорционально с ростом плотности полистиролбетона.

По результатам предыдущих исследований [69, 110] зависимость коэффициента теплопроводности в Вт/м·К от плотности, прочности на сжатие и влажности материала нами предлагается выразить формулами:

$$\lambda = (23+W_{\text{в}}) \gamma_{\text{с}} 10^{-5}, \quad \lambda = (23+W_{\text{в}}) \cdot (116,3R_{\text{сж}} - 46,5)10^{-5} \quad (5.3.8)$$

где $W_{\text{в}}$ – весовая влажность материала в %; $\gamma_{\text{с}}$ – плотность материала в сухом состоянии в кг/м³; $R_{\text{сж}}$ – кубиковая прочность на сжатие, МПа.

В результате анализа проведенных исследований, можно сделать вывод о том, что коэффициенты теплопроводности конструкционного полистиролбетона, определенные в диапазоне плотностей от 800 до 1450 кг/м³, ниже коэффициентов теплопроводностей всех видов бетонов в тех же диапазонах плотностей, регламентированных по СНиП II- 3-79* «Строительная теплотехника» (таблица Теплотехнические показатели строительных материалов и конструкций в приложении 3).

Сочетание полистирольных гранул, не впитывающих влагу, с цементно-песчаной или цементно-шлаковой матрицей, имеющей небольшое влагосодержание, благоприятно сказывается на теплозащитных качествах конструкций из полистиролбетона: установлен низкий коэффициент теплопроводности сравнительно к другим видам легких бетонов аналогичной плотности.

Для установления расчетных коэффициентов теплопроводности ПСБ плотностей 800-1450 кг/м³ необходимо знать величины его эксплуатационной влажности, что требует длительных испытаний по измерению влажности материала в стенах зданий. Ориентировочные значения могут быть установлены по данным сорбционного увлажнения материала при $\varphi = 80\%$ (для условий эксплуатации «А») и $\varphi = 97\%$ (для условий эксплуатации «Б»).

Зависимость коэффициента теплопроводности полистиролбетона от влажности носит нелинейный характер. В европейских нормах проектирования [103] зависимость теплопроводности стеновых материалов от влажности описывается степенной функцией, которая в общем виде справедлива и для теплоизоляционного ПСБ:

$$\lambda_2 = \lambda_1 \cdot e^{f_u(u_2 - u_1)}, \quad (5.3.10)$$

где: λ_1, λ_2 – теплопроводность при влажности 1 и 2, Вт/(м·К); u_1, u_2 – относительная весовая влажность 1 и 2, %; f_u – эмпирический коэффициент, кг/кг.

После уточнения по результатам проведенных нами испытаний для конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного полистиролбетона данная формула приобретает вид:

$$\lambda_2 = \lambda_1 \cdot e^{3(u_2 - u_1)} \quad (5.3.11)$$

По данным И.Л. Тонкова [88] сорбционная влажность может быть принята $W_{\text{сорб}} = 7\%$ - для условий эксплуатации группы «А» и 11% для условий эксплуатации группы «Б».

По данным испытаний, проведенных в ОАО институт «УралНИИАС» при участии автора данной работы, сорбционная влажность $W_{\text{сорб}}$ при $\varphi = 80\%$ (условия эксплуатации «А») по массе составляет 4% при плотности ПСБ $\gamma = 1100 \text{ кг/м}^3$ [87].

Сорбционная влажность $W_{\text{сорб}}$ при $\varphi = 97\%$ (условия эксплуатации «Б») по массе составляет 8% при плотности ПСБ $\gamma = 1100 \text{ кг/м}^3$.

Полученные нами экспериментальные данные согласуются с данными испытаний В.Г. Довжика, В.Н. Россовского и их сотрудников [16, 17], получившими значения $W_{\text{сорб}}$ в диапазоне от 3,5 до 9% для зоны «А» и $W_{\text{сорб}}$ в диапазоне от 7 до

13% для зоны «Б».

Зависимость коэффициента теплопроводности от плотности ПСБ по данным экспериментов автора и зарубежных и советских исследований прошлых лет представлены на рисунке 5.3.1.

На основании результатов исследований был разработан симплекс-решетчатый план и выведена математическая модель изменения теплопроводности при различном сочетании исходных компонентов (количество цемента с хим. добавкой «Реламикс» обозначено x_1 , инертного заполнителя – x_2 , полистирола – x_3).

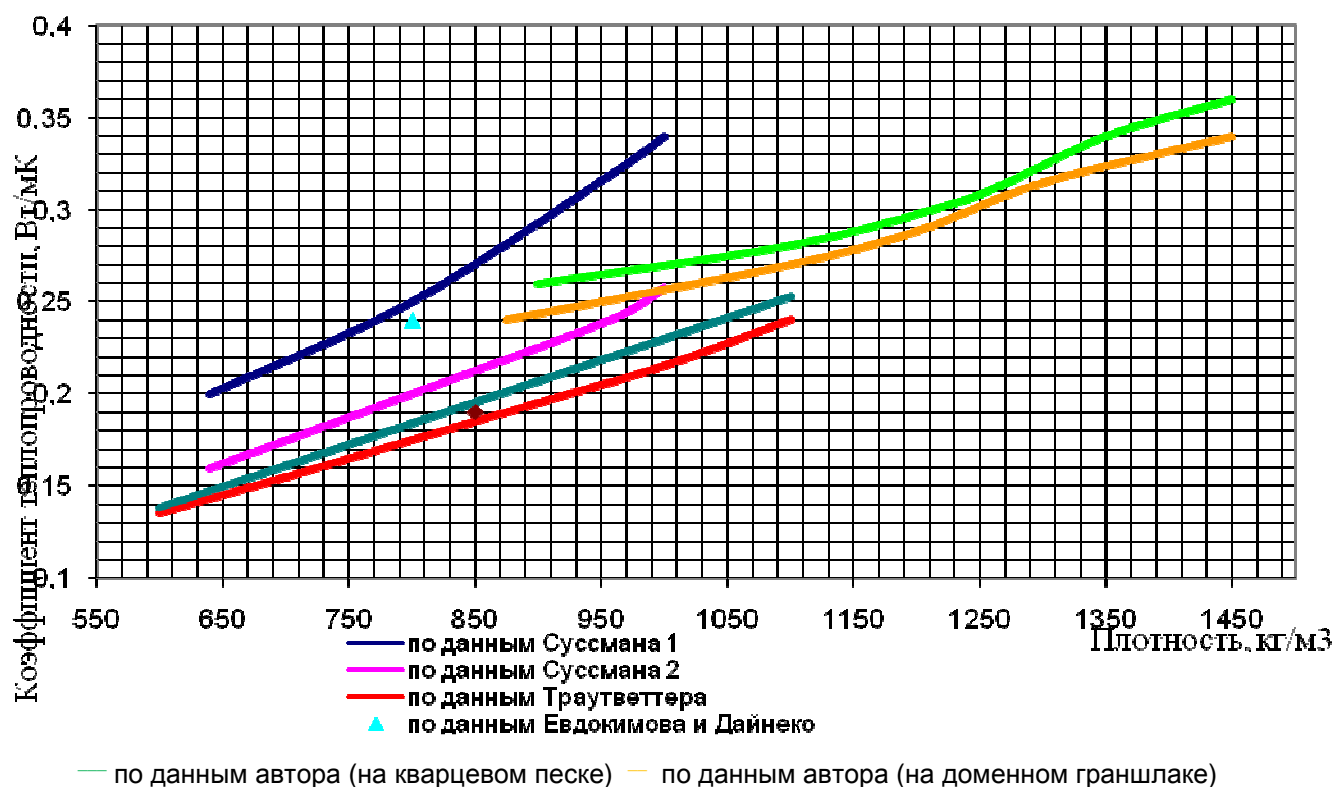


Рисунок 5.3.1 - Зависимость коэффициента теплопроводности от плотности полистиролбетона

Математическая модель для коэффициента теплопроводности, Вт/(м·К) в кодированных значениях (количество цемента обозначено x_1 , песка – x_2 , полистирола – x_3):

$$\lambda = 1,23x_1 + 0,51x_2 + 0,07x_3 - 0,93x_1 \cdot x_2 - 2,17x_1 \cdot x_3 - 0,65x_2 \cdot x_3 - 2,74x_1 \cdot x_2 \cdot x_3; \quad (5.3.12)$$

Результаты экспериментов представлены графически для изменения коэффициента теплопроводности (при температуре $25 \pm 5^\circ\text{C}$) – на рисунке 5.3.2. По наружным сторонам треугольников показано содержание компонентов полисти-

ролбетона в % по массе. Заштрихованные области на рисунках обозначают зоны, для которых справедлива математическая модель в иных кодированных значениях, применимая для изменения теплопроводности теплоизоляционного полистиролбетона при различном сочетании исходных компонентов.

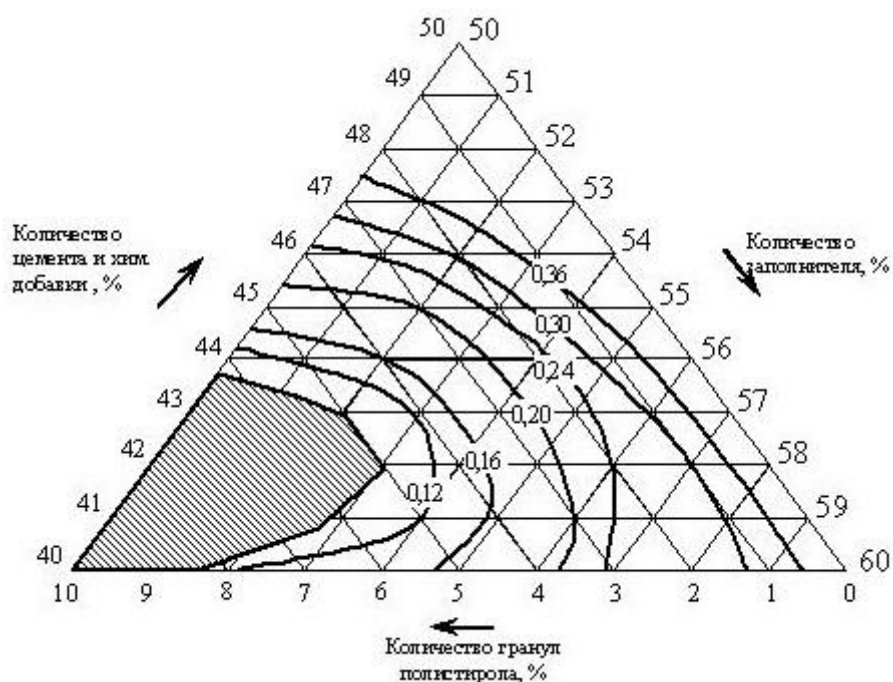


Рисунок 5.3.2- Изолинии коэффициента теплопроводности ПСБ, кг/м³

Проведенными нами исследованиями были выявлены линейные зависимости коэффициента теплопроводности ПСБ (сухого и 5 % влажности по массе) от его плотности и соответствующие уравнения регрессии в безразмерных величинах:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0,006 + 0,000268\gamma; \\ \lambda_2 &= 0,017 + 0,000272\gamma, \end{aligned} \quad (5.3.13)$$

где λ_1 - коэффициент теплопроводности сухого материала; λ_2 - коэффициент теплопроводности материала с $\omega=5\%$; γ – плотность, кг/м³.

С помощью данных зависимостей с достаточной достоверностью можно рассчитать значение коэффициента теплопроводности конструкционно-теплоизоляционного полистиролбетона при эксплуатационной влажности в стеновой конструкции.

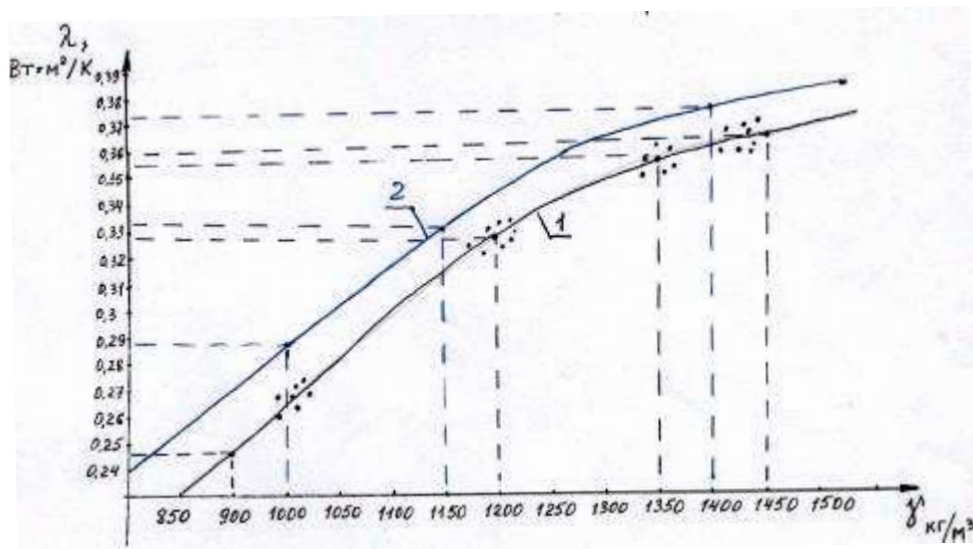


Рисунок 5.3.3 – Зависимость коэффициента теплопроводности (λ) конструкционного ПСБ от его плотности (γ): 1- сухого; 2- 5 % влажности

На основании полученных экспериментальных данных были установлены расчетные значения коэффициентов теплопроводности полистиролбетонов, которые могут быть предложены для теплотехнических расчетов несущих ограждающих конструкций из них:

- Коэффициент теплопроводности для зоны «А» составил при плотности:
 800 кг/м³ – 0,24 Вт/м·К;
 1100 кг/м³ - 0,33 Вт/м·К;
- Коэффициент теплопроводности для зоны «Б» составил при плотности:
 800 кг/м³ – 0,28 Вт/м·К;
 1100 кг/м³ - 0,36 Вт/м·К.

5.4 Паропроницаемость

Характеристики полистиролбетона в диапазоне плотностей от 800 кг/м³ до 1450 кг/м³ по паропроницаемости особенно необходимы при расчетах для применения данного материала в ограждающих строительных конструкциях.

Результаты испытаний выполненных нами в Испытательном центре ОАО институт «УралНИИАС» приведены в таблице 5.4.1 и на рисунке 5.4.1.

Таблица 5.4.1 - Расчетные коэффициенты паропроницаемости ПСБ в диапазоне плотностей 800-1450 кг/м³

№ п/п	Плотность, кг/м ³	Средняя прочность на сжатие (R_b), МПа		Коэффициент паропроницаемости μ г/м.ч.тор. (мг/м.ч.МПа)	
		на кварцевом песке	на доменном граншлаке	на кварцевом песке	на доменном граншлаке
1	800	5,6	6,4	0,036	0,038
2	900	6,5	7,2	0,034	0,034
3	1000	7,4	7,8	0,028	0,030
4	1150	9,0	9,8	0,025	0,026
5	1250	9,8	10,2	0,022	0,023
6	1350	12,5	12,8	0,019	0,019
7	1450	14,5	15,0	0,015	0,017

Т.И. Милых (НИИЖБ) [45] для полистиролбетона на заполнителе из кварцевого песка с добавкой СДО и извести средней плотностью 800 кг/м³ и прочностью на сжатие 3,5 МПа получен коэффициент паропроницаемости 0,13 кг/м.ч.МПа.

Исследованиями Р.В. Сакаева и В.В. Щербаченко в исследовательской лаборатории «УралпромстройНИИпроекта» [74, 92-94], а затем В.В. Щербаченко в ОАО «УралНИИАС» (бывший «УралпромстройНИИпроект») с участием автора [29] для полистиролбетона на зольном заполнителе плотностью 820 кг/м³ и

прочностью на сжатие 3,8 МПа получен коэффициент паропроницаемости 0,036 мг/м.ч.МПа.

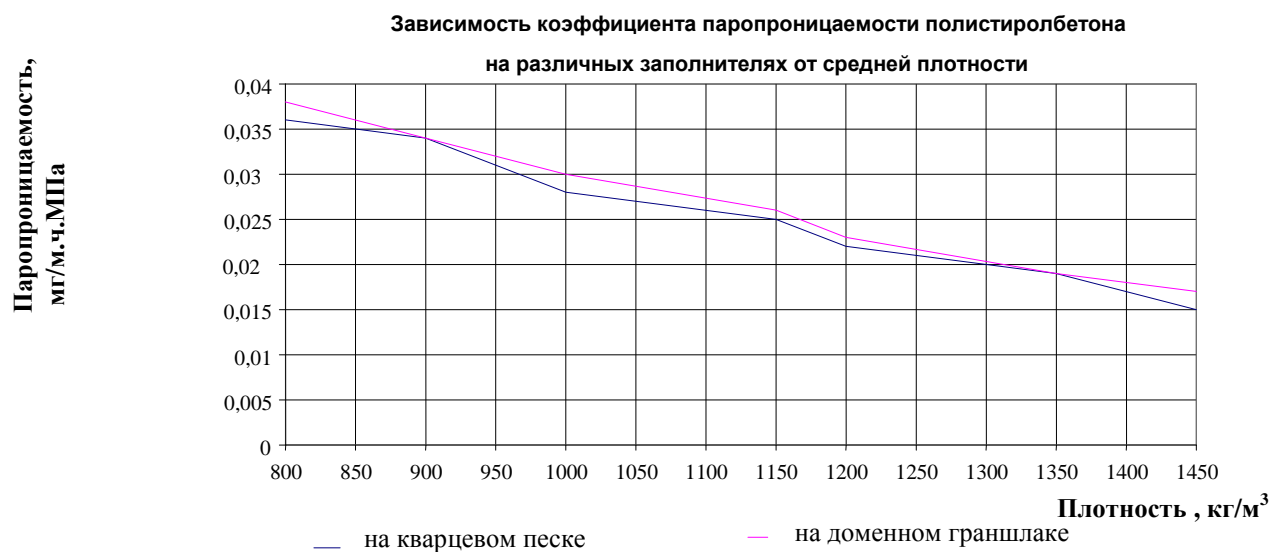


Рисунок 5.4.1 – Зависимость коэффициента паропроницаемости от плотности полистиролбетона на различных заполнителях

Среднестатистические показатели разброса результатов серии образцов Ц.П.1-1.11 для одной средней плотности, рассчитанные по формуле для малой выборки, составили: $\sigma = 0,0001$ мг/м.ч.МПа, $V = 2,8$ %, а для серии образцов Ц.Ш.1-1.11 - $\sigma = 0,0001$ мг/м.ч.МПа, $V = 3,2$ %.

Выводы

1 Морозостойкость

Анализируя все данные, полученные после проведения эксперимента, можно отметить, что полистиролбетон средней плотностью 850 кг/м^3 выдержал 50 циклов замораживания и оттаивания, а полистиролбетонные образцы со средними плотностями 950 кг/м^3 и 1000 кг/м^3 выдержали 100 циклов испытаний.

Проведенные 150 циклов замораживания и оттаивания не существенно повлияли на состояние поверхности образцов, особенно в случае с плотностями 1350 и 1450 кг/м^3 . Потеря прочности образцов-кубов состава полистиролбетона не превысила показатели нормируемые ГОСТ 10060.1 - 95. Потеря массы образцов-кубов составов полистиролбетона плотностью $800\text{-}1500 \text{ кг/м}^3$ меньше нормативного показателя для легких бетонов в 5 %.

Значение коэффициента морозостойкости по результатам опытов варьировалось от 0,81 до 0,91 и в среднем оказалось равным 0,86.

Установлено, что объем вовлеченного воздуха (V_v) – фактор, значительно влияющий на морозостойкость полистиролбетона. Увеличение V_v с 2 до 14 % повышает морозостойкость на 50% (100 циклов).

Прочность на сжатие контрольных и основных образцов исследовалась в зависимости от двух факторов: плотности ПСБ (X_1) и количества циклов замораживания и оттаивания (X_2).

На основании результатов испытания на морозостойкость получено шесть уравнений регрессии, описывающих изменение прочности материала при сжатии в диапазоне от 0 до 150 циклов замораживания-оттаивания в зависимости от плотности ПСБ образцов. Коэффициенты при неизвестных полученных уравнений приведены в таблицах 5.1.1 и 5.1.2. По уравнениям регрессии были построены поверхности откликов для каждого участка области исследования на основных уровнях варьирования второго фактора X_2 (количество циклов замораживания и оттаивания).

Для более полного представления о зависимости прочности на сжатие ПСБ от продолжительности испытаний, от вида применяемого инертного заполнителя

в материале (кварцевого песка или доменного гранулированного шлака) построены соответствующие графики зависимости. Вид графиков наглядно демонстрирует кинетику снижения прочности на сжатие материалов с увеличением продолжительности испытаний.

По данным сравнения полученных показателей морозостойкости серий образцов ПСБ на разных заполнителях, проведенных автором, установлено, что морозостойкость конструкционного полистиролбетона на заполнителе из доменного гранулированного шлака в основном не уступает, а в некоторых случаях превышает морозостойкость полистиролбетона на заполнителе из кварцевого песка.

Проведенные эксперименты позволяют сформулировать основные положения высокой долговечности полистиролбетона следующим образом:

Введение гранул пенополистирола в состав бетона существенно уменьшает их «эффективную» пористость, так как гранулы разобщают капилляры и в связи с их небольшой проницаемостью для воды способствуют незначительному поглощению влаги.

Для принятой нами в данной работе методики испытаний, пенополистирол, проницаемый для паров воды, практически не пропускает сквозь себя жидкую воду [64], что в немалой степени объясняет высокую морозостойкость полистиролбетона.

Вышеприведенные результаты испытаний ставят конструкционный полистиролбетон в ряд морозостойких материалов, который можно использовать в качестве наружной ограждающей конструкции.

2 Теплопроводность

1. Зависимость коэффициента теплопроводности от плотности конструкционного полистиролбетона при одинаковых условиях испытаний является относительно линейной.

2. Повышение влажности полистиролбетона на 1 % по объему приводит к увеличению теплопроводности на $0,001 \div 0,01$ Вт/(м·К) в зависимости от его плотности.

3 Паропроницаемость

Полученные результаты испытаний согласуются с имеющимися литературными данными (исследования Вайсбурда А.М., Тер-Осипянца Ф.Т) [11].

Величина коэффициента паропроницаемости уменьшается с увеличением доли полистирола в полистиролбетоне плотной структуры, и также как и у других легких бетонов, с повышением его плотности.

На основании анализа результатов проведенных автором работы исследований и результатов исследований авторов [11, 62, 82], установлено, что паропроницаемость конструкционного полистиролбетона в 4 раза меньше керамзитобетона и в 3 раза – ячеистого бетона на заполнителях из кварцевого песка при сопоставимых значениях средних плотностей (в сравнении со значениями коэффициентов из приложения 3 СНиП II-3-79*).

Данный показатель связан с особенностями внутренней композиционной структуры материала и говорит о высоких эксплуатационных качествах полистиролбетона при использовании его в ограждающих конструкциях зданий.

Результаты, полученные при исследовании теплоизоляционных характеристик полистиролбетона, были учтены при разработке Территориальных градостроительных норм Свердловской области «Бетонные и железобетонные конструкции из полистиролбетона» (см. Приложение 3).

6 Исследование работы полистиролбетона в изгибаемых элементах

6.1 Методика проведения испытаний

Опытные балки из полистиролбетона были изготовлены в Испытательном центре ОАО «УралНИИАС», в г. Екатеринбурге по технологии, использующейся на строительной площадке при монолитном строительстве.

Испытания проводились в соответствии с методикой, принятой в ГОСТ 8829-94. До начала испытаний все балки осматривались на предмет наличия имеющихся дефектов.

Картина трещинообразования при постепенном нагружении и последующем разрушении фиксировалась при испытаниях на изгиб балок - перемычек из ПСБ размером 200x300x1500 мм (см. рисунки 6.2.-6.3).

Сравнивалось трещинообразование железобетонных балок - близнецов, изготовленных из конструкционного полистиролбетона и ячеистого бетона одного условного класса по прочности В10. Результаты показаны в таблице 6.1.

Общее количество изготовленных и испытанных перемычек – 52 штуки. Рабочее армирование перемычек представлено арматурными каркасами из четырех стальных стержней марки А-III диаметром 10 и 16 мм (в нижней растягиваемой зоне) без предварительного напряжения, а в поперечном направлении хомутами из проволоки марки Вр-I.

Первоначально образцы арматурных каркасов были предварительно испытаны на изгиб вне среды бетона для дальнейшего сопоставления железобетонных элементов с этими каркасами. Полученные экспериментальные данные позволили определить прочность и деформативность каркасов.

Для испытания полистиролбетонных балок, на поперечные стержни хомутов каркаса каждой из балок крепились провода электрических датчиков-тензорезисторов для замера деформаций. Количество датчиков-тензорезисторов на одной балке-перемычке составляло 24 штуки. Схема установки приборов на бетоне и тензодатчиков на каркасе и бетоне опытных балок из конструкционного полистиролбетона приведена на рисунке 6.1.

Такая схема расположения позволяла оценить напряженно-деформированное состояние конструкций, определить распределение напряжений и деформаций в нормальном сечении зоны чистого изгиба. Определить степень участия арматурного каркаса в работе железобетонной балки.

Испытание балок проводилось на специальной установке с нагружением двумя домкратами поэтапно до момента разрушения опытных образцов. Нагрузка замерялась с помощью динамометров. Балки испытывались по одной схеме: двумя сосредоточенными грузами, приложенными на расстоянии 450 мм от края балки. Одна из опор балок делалась ножевой, другая катковой. В местах приложения нагрузки устраивались шаровые опоры.

Место приложения нагрузки выбиралось так, чтобы получить более явную картину разрушения, которая должна была позволить оценить возможность использования методики Пособия по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов для расчета балочных конструкций из полистиролбетона, изготовленных с использованием арматурных каркасов без предварительного напряжения. Поведение изгибаемых железобетонных элементов из полистиролбетона под статической нагрузкой при напряжениях в растянутой продольной арматуре выше предела упругости определялось диаграммой растяжения стали и работой бетона в сжатой зоне. Деформации и прогибы полистиролбетонных элементов с низкими значениями условной относительной высоты сжатой зоны ξ , зависят от упруго-пластических свойств арматурной стали.

При испытании опытных образцов помимо момента образования, ориентированности и длины трещины большое внимание уделялось таким параметрам трещинообразования, как ширина раскрытия и глубина распространения трещины по высоте поперечного сечения изгибаемого элемента. После испытания все образцы полистиролбетонных балок фотографировались.

Измерение ширины трещин проводилось переносным микроскопом с 25-кратным увеличением. Характер трещинообразования приведен в таблице 6.2.

Для упрощения расчета трещиностойкости наклонных сечений в полистиролбетонных балках было решено опробовать предложенное профессором В.В.

Михайловым [90] соотношение между моментами трещинообразования в нормальном и наклонном сечениях:

$$\frac{M_{T\alpha}}{M_T} = \frac{H^2}{h^2} = \frac{h^2 + c^2}{h^2} = 1 + \operatorname{tg}^2 \alpha, \quad (6.1.1)$$

где $M_{T\alpha}$ – момент образования трещины в наклонном сечении, образующем с нормальным сечением угол α ; M_T – момент образования трещины в нормальном сечении; H – высота наклонного сечения; h – высота нормального сечения; c – проекция наклонного сечения на продольную ось балки.

Прогибы полистиролбетонных балок в пролете измерялись прогибомерами системы «Максимова» механического типа.

Жесткость (кривизна) сечений полистиролбетонных балок рассчитывалась методом последовательных приближений с учетом следующих предпосылок. Балки по длине разбивались на участки длиной 100 мм, в пределах которых жесткость принималась постоянной. Длина участка принималась равной среднему расстоянию между трещинами. Жесткость участка для работы любого уровня загрузки определялась по формуле:

$$B = \frac{M}{1/r}; \quad (6.1.2)$$

где M – изгибающий момент, действующий на участке; $1/r$ – кривизна участка.

Жесткость оси участков с трещинами в эксплуатационной стадии определялась по вышеуказанной методике с использованием экспериментально установленных характеристик конструкционного полистиролбетона.

Сцепление полистиролбетона с арматурой испытывалось параллельно с испытаниями изделий балок на образцах балочках размером 100x100x400 мм, закрепленных в металлической обойме, с помощью разрывной машины Р-5 по методике НИИЖб. Использовались стержни арматуры периодического профиля диаметром 12 и 16 мм классов А-I и А-III, в центре и с краю призмы. Результаты испытаний прочности $R_{сц}$ сравнивались с данными по прочности сцепления арматуры с ячеистым бетоном плотности 1000-1200 кг/м³ и приведены в таблице П 2.8 Приложения 2. Выявлены повышенные значения прочности $R_{сц}$ конструкционного полистиролбетона на сцепление с арматурными стержнями.

6.2 Результаты испытания балок

По результатам проведенных испытаний было установлено, что величины фактических разрушающих нагрузок, полученные при испытании различных серий полистиролбетонных балок, превышали теоретически рассчитанные по формулам для изгибаемых элементов из ячеистого бетона, в среднем на 30-35 %.

Данный факт объясняется высокими прочностными и деформационными свойствами полистиролбетона, как композитного конструкционного материала.

Большая неоднородность в свойствах полистиролбетона означает большой разброс в наличии наименее прочных мест в структуре бетона. По С.М. Скоробогатову [84] для анализа вероятности и неопределенности в появлении трещин наиболее применима формула К.Э. Шеннона:

$$H_i = -P_1 \log_2 P_1 - P_2 \log_2 P_2 - P_3 \log_2 P_3 \text{ при } \sum P_i = 1. \quad (6.1)$$

Трехступенчатая формула (4.4.1) учитывает три характерных размера трещин и соответственно блочную структуру для наиболее расчетных высот сечений изделия. При этом предполагается, что высота сечения сжатой зоны $x \leq 30$ см. Высота сжатой зоны для средних деформаций в момент разрушения равнялась 170 мм, в результате размер растянутой зоны был меньше чем сжатой, что сказалось на повышенной трещиностойкости балки. Экспериментальная проверка формулы 6.1.1 показала хорошую сходимость с результатами расчета (до $\pm 15\%$).

Одновременно с деформациями в зоне чистого изгиба замерялись деформации у опор на поверхности бетона напротив расположения продольных стержней арматурного каркаса. Деформации проявились по всей длине полистиролбетонной балки, что свидетельствует о включении арматурного каркаса в общее сопротивление балки как несущего элемента (см. рисунки 6.2-6.3).

Исчерпание несущей способности арматурных каркасов в большинстве случаев происходило в результате потери устойчивости отдельных стержней решетки каркаса и в одном случае - в результате разрушения сварки в месте соединения поперечного и продольного стержней. Испытанные каркасы потеряли несущую способность до достижения ими предельных прогибов. Их прочность связана с устойчивостью стержней, из которых они состоят. Связь между прочностью каркасов и их жесткостью носит линейный характер.

Таблица 6.1 – Величины вероятностей и неопределенностей в появлении трещин в железобетонных балках

Уровень трещин	Микротрещины	Мезотрещины	Макротрещины
Балка из конструкционного полистиролбетона (по данным «УралНИИАС»)			
Вероятность появления трещин P_i	10/16	4/16	2/16
Частная неопределенность $-P_i \log_2 P_i$	0,415	0,4883	0,3197
Общая неопределенность			$H_i = 1,223$
Балка из ячеистого бетона (по данным С.М. Скоробогатова)			
Вероятность появления трещин P_i	8/16	5/16	3/16
Частная неопределенность $-P_i \log_2 P_i$	0,500	0,5243	0,4523
Общая неопределенность			$H_i = 1,477$

Таблица 6.2 -Характер трещинообразования ПСБ-балок

№ ступени	Нагрузка, т.с.	Трещины на поверхности полистиролбетонной балки марки БЗ-5 с $\gamma_{cp} = 1350 \text{ кг/м}^3$	
		нормальные, ширина раскрытия	наклонные, ширина раскрытия
0	0	магистральные трещины в растянутой зоне	отсутствуют
1	1,4	новые магистральные трещины в растянутой зоне $\delta=0,1 \text{ мм}$	отсутствуют
2	2,8	-	-
3	4,2	-	-
4	5,6	раскрытие до $\delta=0,25 \text{ мм}$	-
5	7	-	-
6	8,4	-	$\delta=0,2 \text{ мм}$
7	9,8	$\delta=0,4 \text{ мм}$	$\delta=0,4 \text{ мм}$
8	11,2	$\delta=0,45 \text{ мм}$	$\delta=0,6 \text{ мм}$
9	12,6	$\delta=0,45 \text{ мм}$	$\delta=0,75 \text{ мм}$
Выдержка в течение 30 минут			
9	12,6	$\delta=0,45 \text{ мм}$	$\delta=0,75 \text{ мм}$
10	14	$\delta=0,45 \text{ мм}$	$\delta=0,8 \text{ мм}$
11	15,4	$\delta=0,55 \text{ мм}$	$\delta=0,9 \text{ мм}$
12	16,8	$\delta=0,6 \text{ мм}$	$\delta=0,9 \text{ мм}$
13	18,2	$\delta=0,65 \text{ мм}$	$\delta=1,2 \text{ мм}$
14	19,6	$\delta=0,65 \text{ мм}$	$\delta=1,6 \text{ мм}$
Разрушение балки при нагрузке 21 тс			

Величины вероятностей и неопределенностей в появлении трещин подсчитывались математическими методами по методике исследования балок из ячеистого бетона, использованной в научно-исследовательской работе Домнина В.Д. [94], выполненной в научной части УралпромстройНИИпроекта (в настоящее время ОАО институт «УралНИИАС»).

Общая суммарная величина неопределенности для балки из полистиролбетона $N_i = 1,223$ оказалась на 20 % меньше, чем неопределенность для балки из ячеистого бетона $N_i = 1,477$. Интерпретировать эти результаты можно на основе различия в степени неоднородности разных видов легкого бетона.

Балки разрушались при резком распространении наклонных трещин от середины высоты элемента по направлению к опоре и месту приложения груза. Ширина раскрытия трещин при их образовании, как это видно из таблицы 6.2, была незначительной - 0,2 мм. Спустя две-три ступени нагружения одна из наклонных трещин сильно развивалась по высоте и раскрывалась, впоследствии по ней и наступало хрупкое разрушение балки.

В данном случае следует отметить, что трещинообразование бетона армированных конструкций в большей мере, чем от деформационных свойств самого бетона, зависит от расположения и характеристик примененной в них арматуры. Так как в данной работе область исследования была ограничена в основном неармированными изделиями из полистиролбетона, то трещинообразование ПСБ исследовалась в не полном объеме.

Расположение трещин на поверхности образцов свидетельствует о том, что разрушение балок происходит по наклонным сечениям на околоопорных участках от воздействия двух грузов, приложенных в средней части пролета. Трещиностойкость нормальных сечений испытанных балочных образцов из полистиролбетона превышала теоретически рассчитанную величину по СНиП 2.03.01-84* как для ячеистого бетона на 40%.

Разрушающая нагрузка для балок из ПСБ составила 16, 20 и 22 МПа в среднем при кубиковой прочности на сжатие полистиролбетона, замеренной в день испытания балок, равной 10,2 МПа, 13,2 МПа и 15,4 МПа соответственно.

В момент разрушения трещин по торцам балки не было, разделения конст-

рукции по слоям не произошло.

При нагрузке 16 тонн на один домкрат максимальный прогиб перемычки составил 5,253 мм, что меньше 1/200 пролета балки или 7,5 мм. Жесткость балки соответствует требованиям раздела 10 Прогнибы и перемещения СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия» (Дополнения).

Расчетный изгибающий момент на полистиролбетонную балку при пролете 1500 мм равен 14454 кгм, а величина изгибающего момента при разрушении равнялась 32000 кгм. Коэффициент безопасности равен 2,21, что больше требуемого 1,6, следовательно, прочность балки-перемычки, как и более длинных перемычек удовлетворяет требованиям ГОСТ 8829-94.

Дополнительно исследование трещинообразования ПСБ проводилось по методике, близкой к принятой в ГОСТ 29167-91 «Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости) при статическом нагружении» на образцах-призмах размером 100x100x400 мм при проведении испытаний на осевое растяжение.

По данным А.А. Евдокимова и О.С. Дайнеко [21] максимальные значения ширины раскрытия трещин по результатам испытаний стеновых панелей из ПСБ составили 0,05-0,2 мм, что также не превышает нормируемой величины.

Микротрещинообразование полистиролбетона при замораживании исследовалось В.Н. Панталеенко и Л.С. Крупенской [64]. Плотность материала образцов-кубов размером 100x100x100 мм изменялась в диапазоне 2180-2360 кг/м³, а принятые процентное содержание и размер гранул пенополистирола не превышали 8,5 % и 1 мм соответственно. Средние напряжения осевого сжатия, соответствующие началу образования микротрещин в бетоне R_m^0 составляли 0,21-0,31 R_b , а напряжения соответствующие началу интенсивного развития трещин разрушения R_m^v составляли 0,52 – 0,78 R_b .

Для выявления отличий в картине трещинообразования полистиролбетона под нагрузкой нами фиксировался характер трещин на поверхностях образцов призм после проведения испытаний на осевое сжатие, замерялись их ширина раскрытия и направление. Характер образующихся трещин у полистиролбетона плотностей 1200-1450 кг/м³ соответствует характеру трещин в тяжелом бетоне.

Для определения трещинообразования полистиролбетона несущих строительных конструкций, как материала в связи с развивающимися в нем температурными деформациями, автором предлагается сопоставлять величины предельной растяжимости и деформации удлинения с помощью критерия трещиностойкости:

$$k_{\text{тр}} = \frac{\varepsilon_{\text{п.р}} * c * \gamma}{Q * \alpha}; \quad (6.2.2)$$

где: $\varepsilon_{\text{п.р}}$ – величина предельной растяжимости полистиролбетона (по данным раздела 4.2 главы 4); γ – плотность материала, кг/м³; α – температурный коэффициент линейного расширения бетона (по данным раздела 4.7 главы 4); $c=0,8$ кДж/кг·К - удельная теплоемкость ПСБ; Q – тепловыделение ПСБ по ГОСТ 24316-80, ккал/м³.

Критерий трещиностойкости $k_{\text{тр}}$, являясь величиной условной, однако не отражает важные факторы влияющие на трещинообразование полистиролбетона конструкции, такие как влияние ползучести на величину общей предельной деформативности и изменение упруго-пластичных характеристик ПСБ с изменением температуры.

Таким образом, проведенные эксперименты позволяют сформулировать основные положения для трещинообразования полистиролбетонных элементов следующим образом:

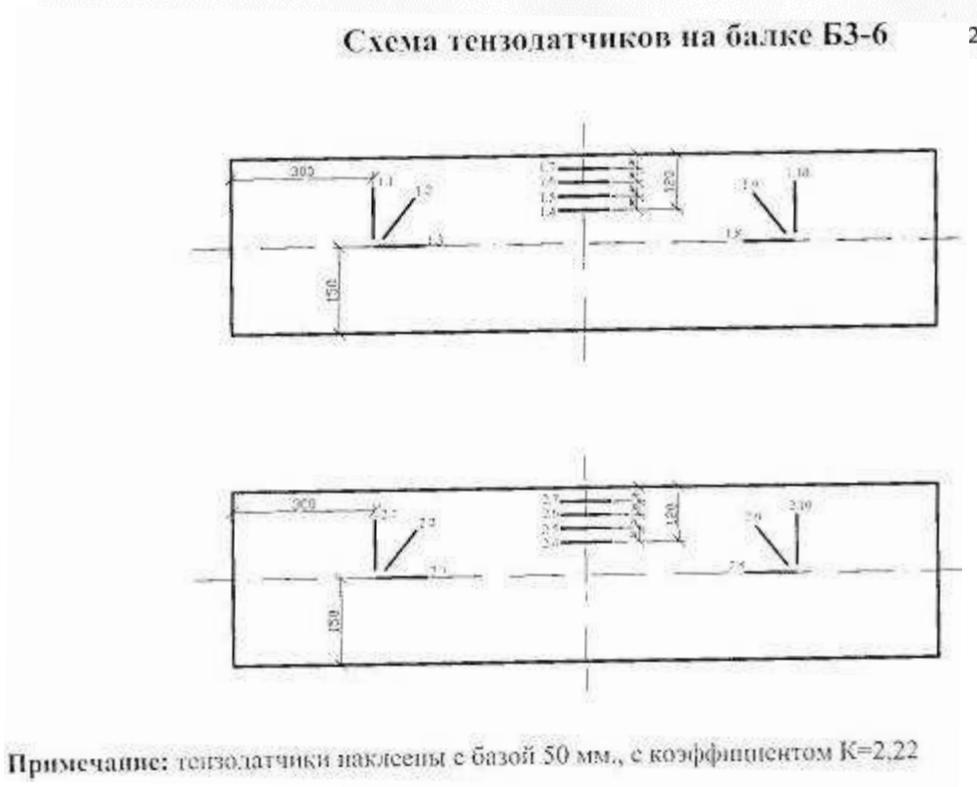
1. При введении в состав бетонной смеси, гранулы полистирола впоследствии изменяют общий характер пористости и равномерно распределяют мелкие замкнутые поры по всему объему цементно-песчаной матрицы, тем самым, улучшая ее структуру, вызывая повышение уровня области трещинообразования.
2. В процессе эксплуатации конструкции, являясь своеобразными резервами влаги, гранулы пенополистирола способствуют уменьшению внутренней усадки, что приводит к снижению количества микротрещин на границе цементный камень – заполнитель и тем самым способствует высокой долговечности бетона.

Результаты, полученные при исследовании трещинообразования полистиролбетона балок-перемычек из ПСБ, были учтены при разработке ТУ 5828-003-25057366-06 «Перемычки из полистиролбетона» (см. Приложение 3).

а)



б)

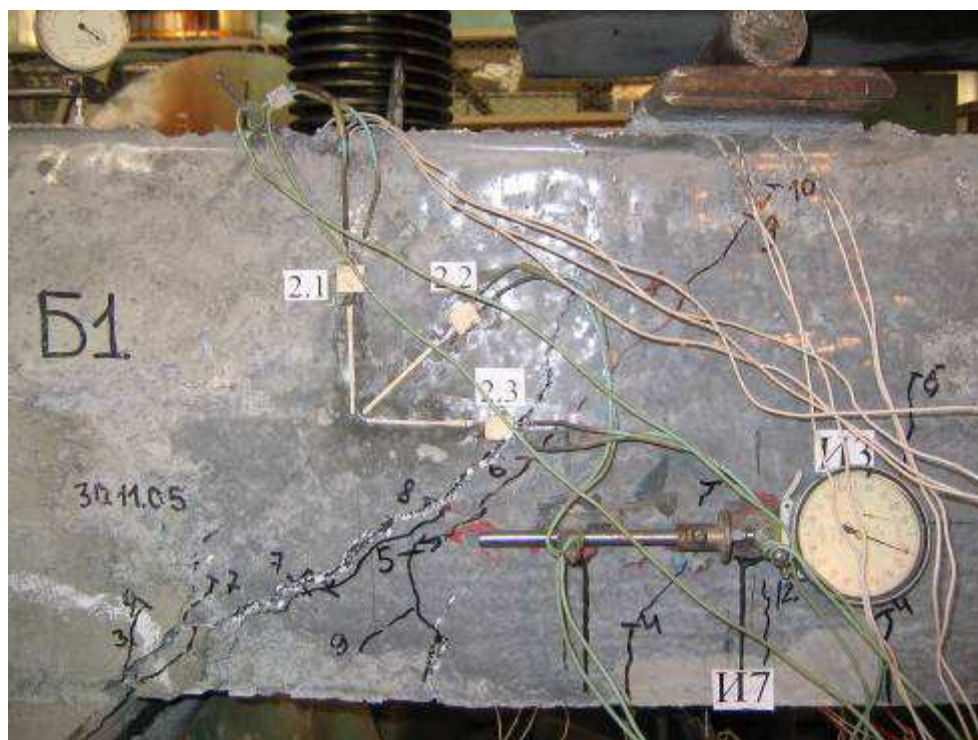


в)



Рисунок 6.1 – Схема установки приборов на бетоне и тензодатчиков на каркасе и бетоне опытных балок из конструкционного полистиролбетона

а)

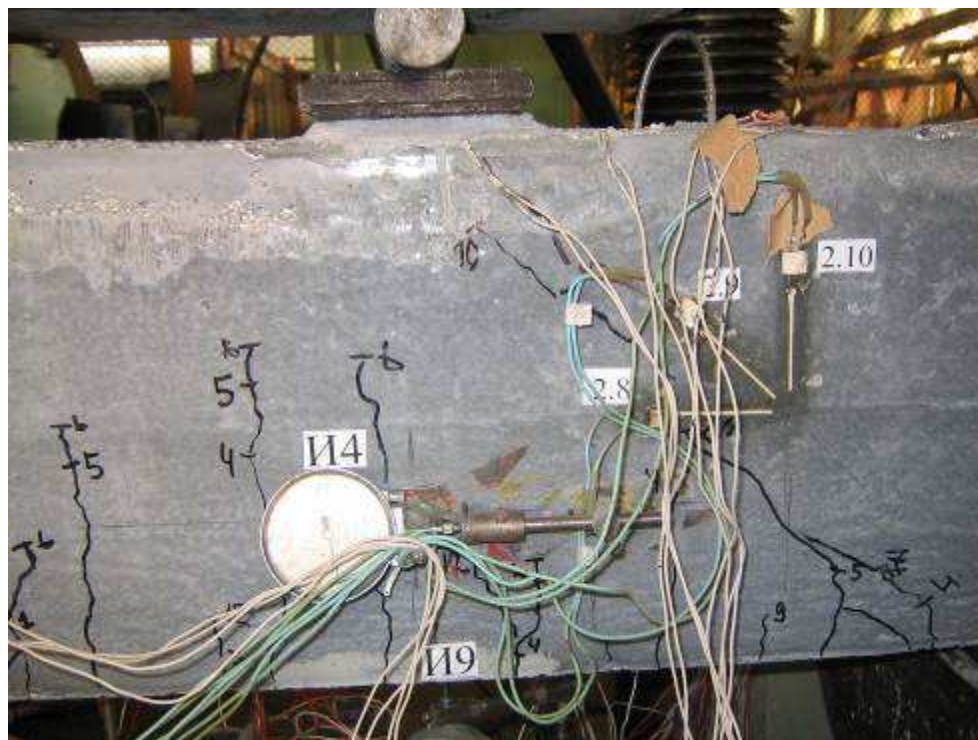


б)



Рисунок 6.2 – Характер трещинообразования материала в стадии разрушения при испытании на изгиб несущей балки - перемычки из ПСБ с $\gamma_{\text{ср}}=1220 \text{ кг/м}^3$ и кубиковой прочностью на сжатие соответствующей классу В7,5

а)



б)

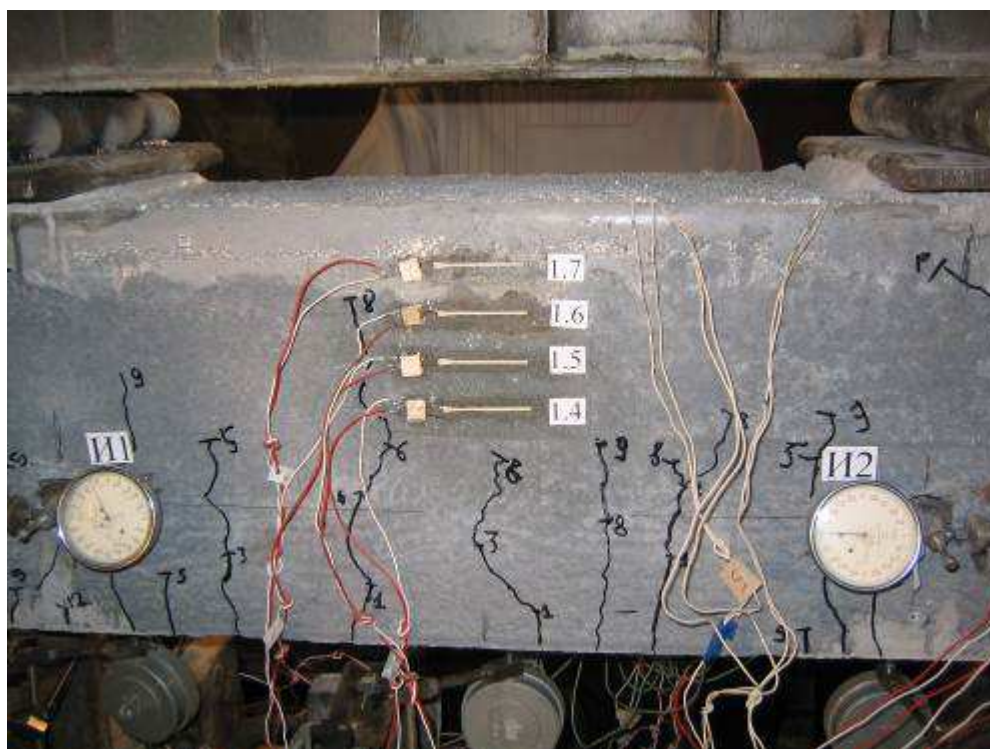


Рисунок 6.3 – Расположение трещин на поверхности материала в центральной части несущей балки - перемычки при испытании на изгиб, из ПСБ с $\gamma=1220$ кг/м³ и $R_b = 11,2$ МПа

Выводы

1. Получены новые экспериментальные данные о работе полистиролбетонных балок при изгибе. Установлено, что напряженно-деформированное состояние балок, изготовленных из полистиролбетона, отличается от напряженно-деформированного состояния железобетонных балок из ячеистого бетона и керамзитобетона, испытания которых послужили основой для разработки расчетных методик положенных в современные строительные нормы. Значения предельных деформаций в сжатой зоне в балках из полистиролбетона были в два раза выше значений аналогичных предельных деформаций в балках из ячеистого бетона той же плотности. Балки из полистиролбетона обладали повышенной трещиностойкостью.

2. Конструкционный полистиролбетон более однороден, в нем трещины развиваются более равномерно, за счет влияния основного заполнителя – гранул пенополистирола. Много трещин одного уровня, особенно микротрещин. Далее, когда микротрещины перестают сдерживать друг друга, возникают через стадию хрупкого разрушения мезотрещины. Их количество в 2,5 – 4 раза меньше. Далее при достаточном количестве мезотрещин появляются макротрещины.

В ячеистом бетоне более крупные мезо- и макротрещины появляются на более ранних стадиях нагружения.

Таким образом, полистиролбетон при одинаковом классе бетона по сравнению с ячеистым бетоном более предсказуем и поэтому более надежен. Приведенные анализ и вывод повлекли за собой необходимость формулировки рекомендаций в проектировании несущих конструкций из полистиролбетона.

3. При проектировании несущих конструкций из ПСБ, рекомендуется применять повышенные значения расчетного сопротивления на растяжение R_{bt} относительно величины, принятой для ячеистого бетона класса В10 в табл. Пособия по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов приблизительно на 20%. Это также соответствует полученным в результате экспериментов повышенным значениям прочности на осевое растяжение, данные о которых приводятся в главе 3.2.

7 Предложения по совершенствованию инженерной методики расчета изделий из полистиролбетона

7.1 Изделия из полистиролбетона, предложения к их расчету и рациональная область их применения

С 2002 года по 2008 год в ОАО институт «УралНИИАС» при участии автора данной работы были проведены испытания серий различных несущих конструкций из полистиролбетона плотностью 1000-1500 кг/м³ [51, 73, 74, 77, 78]. При изготовлении большинства из конструкций использовались составы ПСБ, разработанные в ходе написания данной работы.

В числе данных конструкций стеновая панель ЗПС 60.12.3, изготовленная по рабочим чертежам НП-054.01- КЖ.И (данные чертежи заменяют чертежи серии 1.030.1-1-88 для стеновых панелей толщиной 300 мм), простеночная панель ЗПС 15.21.30, изготовленная по рабочим чертежам НП-054.01- КЖ.И, простеночный блок ЗСБ 1.1 12.22.5, изготовленный по рабочим чертежам НП-086.01- КЖ.И (данные чертежи аналогичны чертежам серии 81 для крупных блоков толщиной 500 мм), перемычный блок ЗСБ 3.1 30.6.5, изготовленный по рабочим чертежам НП-086.01- КЖ.И, стеновая панель 10НСТ-11, изготовленная по рабочим чертежам НП-138.01- КЖ.И, (данные чертежи аналогичны чертежам серии 111-137-02 для стеновых панелей толщиной 400 мм).

При испытании балок экспериментальные величины разрушающих моментов были близки к теоретически рассчитанным, определенным по Пособию по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов без учета (для арматуры \varnothing 16 мм) коэффициента условий работы. При этом напряжения в стержневой арматуре при разрушении достигали предела текучести, а в проволочной арматуре каркаса - предела прочности.

Следовательно расчет прочности изгибаемых конструкций из конструкционно-теплоизоляционного полистиролбетона класса по прочности на сжатие В 5 - В7,5 можно проводить без учета для арматуры \varnothing 16 мм понижающего коэффициента γ_s (п. 2.23 табл. 14 Пособия по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов).

На основании полученных данных по повышенной трещиностойкости полистиролбетона балок при испытании их на изгиб, автором предлагается при определении момента сопротивления приведенного сечения, увеличить значение коэффициента, характеризующего соотношение модуля упругопластичности крайнего растянутого волокна полистиролбетона и модуля упругости ПСБ при сжатии ($E_{\sigma} = A E_{\sigma p}$).

Автором предлагается при определении значения коэффициента η , учитывающего влияние прогиба несущего полистиролбетонного элемента на величину эксцентриситета продольного усилия e_0 (п. 3.6 Пособия по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов), следует в формуле по определению коэффициента φ_I :

$$\varphi_I = 1 + \beta \frac{M_l}{M}, \quad (7.1)$$

принимать значение $\beta = 1,5$ (по табл. 30), как для легкого бетона на мелком пористом заполнителе или ячеистого неавтоклавного бетона.

При испытании образцов балок из полистиролбетона перемещения их при контрольной по жесткости нагрузке составляли $(1/310 - 1/480) l$, что меньше допускаемой величины. Перемещения элементов из полистиролбетона ($\mu = 0,09 - 0,25\%$) в стадии их работы до образования трещин превышали на 18-31% теоретические перемещения, рассчитанные по формулам п. 4.24 «Кривизна железобетонного элемента на участке без трещин в растянутой зоне» Пособия по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры и п.4.6 Пособия по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{1}{r}\right)_1 &= \frac{M}{\varphi_{b1} E_b I_{red}}; \\ \left(\frac{1}{r}\right)_2 &= \frac{M \varphi_{b2}}{\varphi_{b1} E_b I_{red}} \end{aligned} \right\} \quad (7.2)$$

$$\left(\frac{1}{r}\right)_3 = \frac{P e_{0p}}{\varphi_{b1} E_b I_{red}}; \quad (7.3)$$

где φ_{b1} принимали как для ячеистого бетона (0,85).

В связи с этим автором предлагается принимать значение коэффициента φ_{b1} равным 0,7, как для легких бетонов на пористом мелком заполнителе.

При значении эксплуатационной нагрузки установленной при 0,6 разрушающего момента опытные перемещения образцов балок из конструкционного полистиролбетона были ниже теоретически рассчитанных, как для балок из ячеистого бетона по формулам Пособия по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры на 30 %.

На жесткость балок из полистиролбетона в стадии после образования трещин оказывает влияние относительно высокое сцепление полистиролбетона с арматурой, поэтому автором предлагается для расчета коэффициента ψ_s , учитывающего работу растянутого бетона на участке с трещинами, использовать формулу для легких бетонов:

$$\psi_s = 1,25 - \varphi_{ls} \varphi_m - \frac{1 - \varphi_m^2}{(3,5 - 1,8\varphi_m) \times e_{s,tot} / h_0}; \quad (7.4)$$

где $e_{s,tot} / h_0 \geq 1,2 / \varphi_{ls}$ - эксцентриситет силы N_{tot} относительно центра тяжести площади сечения арматуры, соответствует моменту M ; h_0 – высота сечения балки до нижней рабочей арматуры, м; φ_m – коэффициент, принимаемый от 0,45 до 1,0 в зависимости от значений M_r и $M_{гр}$.

Предлагается в расчете принимать значение коэффициента φ_{ls} для полистиролбетона с классом В 7,5-В 12,5, в формуле равным 1,0 для стержневой арматуры периодического профиля при непродолжительной нагрузке, вместо 0,8, как для ячеистых бетонов более низкой прочности.

Расчет жесткости балок из конструкционного полистиролбетона с учетом предлагаемого значения коэффициента дает результаты, близкие к опытным.

По классификации легких бетонов принятой СЕВ и FIP [107] конструкционный полистиролбетон в диапазоне исследуемых плотностей от 800 до 1450 кг/м³ можно условно отнести к двум категориям:

- плотность от 1000 до 1450 кг/м³ – II категория.
- плотность от 800 до 1000 кг/м³ – III категория.

Рациональная область применения легких бетонов категории II.

Эти бетоны применяют, когда и прочность, и теплозащитные свойства материала являются одинаково важными характеристиками. Бетоны этой категории используют в конструктивных элементах, напряжения в которых относительно невелики.

Наиболее рациональная область применения этих бетонов за рубежом – панели наружных стен зданий. Плотность бетонов этой категории, как правило, бывает не выше 1600 кг/м^3 , а марочная прочность 10-20 МПа. Обычно предпочитают иметь бетон с плотностью порядка 1450 кг/м^3 .

Рациональная область применения легких бетонов категории III.

Бетоны этой категории в Европе применяют для плит перекрытий малого пролета и стеновых панелей зданий малой этажности. Прочность таких бетонов обычно лежит в пределах 0,75-5 МПа, в редких случаях 7,5 МПа. Плотность – не более 1450 кг/м^3 .

Эффективная область применения конструкционного полистиролбетона в России и странах СНГ, по мнению автора, ограничивается следующими несущими железобетонными конструкциями:

- 1) Для использования в строительстве коттеджей (здания до 3-х этажей):
 - ПСБ блоки с прочностью на сжатие соответствующей классу В 5;
 - ПСБ перемычки с прочностью на сжатие соответствующей классу В 7,5;
- 2) Для использования в строительстве жилых зданий из сборных элементов (от 5 до 9 этажей):
 - ПСБ перемычки с прочностью на сжатие соответствующей классу В 12,5;
 - однослойные и трехслойные панели из полистиролбетона для наружных стен зданий с прочностью на сжатие соответствующей классу В 7,5 (вместо керамзитобетонных панелей по сериям 1.030.1-1-88, 1.090.1-1 и 141СВ, а также панелей из автоклавных ячеистых бетонов по ГОСТ 11118-73);
 - однослойные панели из полистиролбетона для внутренних несущих стен и перегородок зданий прочности на сжатие соответствующей классу В 7,5 (вместо панелей из автоклавных ячеистых бетонов по ГОСТ 19570-74);
- 3) Для использования в строительстве промышленных зданий:

- стеновые панели из полистиролбетона прочности на сжатие соответствующей классу В3,5 – В5 для отапливаемых зданий, однослойные, плоские, плотностью 800-1000 кг/м³ (взамен панелей из ячеистого автоклавного бетона класса В2,5 плотности 700-800 кг/м³ по серии 1.432-5);

- стеновые панели из полистиролбетона прочности на сжатие соответствующей классу В5 - В7,5 для отапливаемых зданий, однослойные, плоские, плотностью 1000-1250 кг/м³ (взамен панелей из керамзитобетона или аглопоритобетона класса В2,5 – В3,5 плотностью 1000-1100 кг/м³ по серии 1.432-3);

- стеновые панели из полистиролбетона прочности на сжатие соответствующей классу В5 для отапливаемых зданий, однослойные, плоские, плотностью 800-1000 кг/м³ (взамен панелей из керамзитобетона класса В5 плотностью 1000-1100 кг/м³ по серии 1.432-3).

Преимущество применения полистиролбетона в несущих железобетонных конструкциях взамен ячеистого бетона обуславливается более простой технологией изготовления (возможностью изготовления прямо на строительной площадке), значительно более низкими влагопоглощением и паропроницаемостью и возможностью применения в многослойных железобетонных конструкциях.

7.2 Обоснование и расчет экономической эффективности внедрения в производство изделий из полистиролбетона

Факторы экономической эффективности применения полистиролбетона вместо тяжелого и группы из нескольких видов легких бетонов могут быть подразделены на три группы:

- а) связанные с уменьшением собственного веса конструкций;
- б) связанные с такими показателями, как эксплуатационные свойства, морозостойкость, теплопроводность, паропроницаемость и т. п.;
- в) технологические.

Применение более легких и тонких ограждающих конструкций из полистиролбетона дает дополнительную экономию на 5–15% бетона и дорогостоящей арматуры в несущих конструкциях зданий (фундаментах, железобетонных перекрытиях, стенах или колоннах).

Стоимость в эксплуатации однослойных наружных стеновых ПСБ панелей на 15-20%, трудозатраты на изготовление на 20-30%, а материалоемкость – на 20-25% ниже, чем трехслойных железобетонных панелей со средним слоем из теплоизоляционного керамзитобетона.

Экономия стоимости изготовления однослойной панели в сравнении при заводском изготовлении керамзитобетонной панели того же габарита со средним слоем из плитного полистирола составляет до 24 %. На одну 6-метровую секцию пятиэтажного жилого дома необходимо всего 300 кг полистирола.

По сравнению с керамзито-аглопорито-шунгзитобетонными стенами полистиролбетонные в 1,5-2 раза легче и дешевле. Расчеты показали, что использование стеновых панелей ленточной разрезки из полистиролбетона по сравнению с керамзитобетонными, позволяет уменьшить толщину конструкции в 2 раза, массу в 2,5 раза, снизить расход стали на 30%. При равном расходе цемента, приведенные затраты на 1 м³ панели из полистиролбетона ниже на 16,5 %, или на 4,7 р.

Практика показала, что организация приготовления полистиролбетона в северных районах страны требует капитальных вложений 0,4 -1,2 руб. (в ценах 1978 г.) на 1 м³ бетона, что в 11-12 раз меньше, чем для организации производства бетона на основе керамзита, перлита, вермикулита.

По данным В. Жука [24] в условиях Чукотского национального округа сметная стоимость 1 м² стены из конструкционного ПСБ плотностью 1200-1300 кг/м³ была ниже на 7% керамзитоблочной и на 80% - кирпичной. При устройстве стен универмага на 50 рабочих мест в г. Анадыре из ПСБ блоков вместо кирпичных было сэкономлено 27 тыс. руб. (в ценах середины 70-х г.). Замена керамзитобетонных стен телятника на 200 голов в совхозе «Северный» Анадырского района на панельные с применением конструкционного армированного полистиролбетона позволило сэкономить 125 тыс. руб.

По данным Евдокимова А.А. и Дайнеко О.С. [21, 22] при внедрении однослойных стеновых панелей из полистиролбетона для сельскохозяйственных зданий в объеме 3 тыс. м², экономический эффект составил 12 тыс. руб. в ценах 1985 года, что в ценах 2005 года составляет около 2460 тысяч рублей.

Пересчет цен производился в соответствии с индексами инфляции определенными МВК и УРЦЭЦС (до 1.01.95), а также письмом №33498-СК/08 Министерства регионального развития Российской Федерации.

Существенным преимуществом конструкции панели из ПСБ по сравнению с трехслойной панелью со средним слоем из керамзитобетона является то, что однослойная панель гарантирует качество ее термического сопротивления.

По данным Р.В. Сакаева и В.В. Щербаченко [74] при сравнении показателей стеновой панели со средним слоем из ПСБ с показателями стеновых панелей из керамзитобетона, изготавливаемыми по поточно-агрегатной технологии экономический эффект составляет 2,44 руб./м² (в ценах 1987 года), без учета сокращения массы здания, снижения транспортных расходов и эксплуатационных затрат.

Авторами также не учитывался народнохозяйственный эффект. В ценах 2005 года экономический эффект составляет не менее 500 рублей/м².

По данным современных исследований С.Е Аксенова., А.С. Щеловановой и Н.П. Домашниковой [2] технико-экономическое сравнение полистиролбетона с другими легкими бетонами показало, что исследуемый материал дешевле керамзитобетона на 37,5 %, пенобетона – на 42,5 %, газобетона – на 18,8 %.

В.Г.Парфенов и В.Д. Шантарин [65] подсчитали ожидаемый годовой экономический эффект от применения стеновых блоков из полистиролбетона плотностью 800 кг/м³ в ограждающих конструкциях взамен стеновых блоков из керамзитобетона. Годовой экономический эффект составил 321900 руб. по ценам 1991г.

Относительная простота вспенивания сырья – суспензионного (бисерного) полистирола позволяет организовывать производство легкого заполнителя как в заводских и полигонных условиях, так и на строительной площадке.

Легкообрабатываемость (механическая) полистиролбетона способствует ускорению работ по установке отопительных приборов и прочего технологического оборудования, так как высверливание отверстий из тяжелого бетона является достаточно трудоемкой операцией, а предварительная закладка в панели всех крепежных элементов не всегда возможна.

Расчет экономической эффективности от применения стеновых блоков из ПСБ плотностью 850 кг/м³ для ограждающих конструкций взамен керамзитобетона М50 нами производился по формуле (3) «Инструкции по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений» СН 509-78:

$$\mathcal{E} = [(Z_1 + Z_{c1})\varphi + \mathcal{E}_э - (Z_2 + Z_{c2})] \cdot A_2, \quad (6.1)$$

где Z_1 и Z_2 – приведенные затраты на заводское изготовление конструкций по сравниваемым вариантам базовой и новой техники, р./м²; φ – коэффициент изменения срока службы новой строительной конструкции по сравнению с базовым вариантом; $\mathcal{E}_э$ – экономия в сфере эксплуатации конструкций за срок их службы, р./м²; A_2 – годовой объем выпуска ограждающих новых строительных конструкций в расчетном году, м²; Z_{c1} и Z_{c2} – приведенные затраты по возведению конструкций на стройплощадке (без учета стоимости заводского изготовления) по сравниваемым вариантам базовой и новой техники, р./м².

Экономия в сфере эксплуатации конструкций за срок службы определялась нами по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{(I_1 - I_2) - E_n(K_2 - K_1)}{P_2 + E_n}, \quad (6.2)$$

где I_1 и I_2 – годовые издержки в сфере эксплуатации на 1 м² ограждающей конструкции по базовому и новому вариантам, р.; K_1 и K_2 – сопутствующие капитальные вложения в сфере эксплуатации 1 м², ограждающей конструкции по сравниваемым вариантам, р.; P_2 – доля сметной стоимости строительной конструкции по новому варианту в расчете на 1 год службы – 0,0102. Эта величина принимается по приложению 2 СН 509-78; E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, равный 0,15.

Вместо приведенных затрат Z_1 и Z_2 принимаем среднюю оптовую цену в Урало-Сибирском регионе. Оптовая цена 1,0 м³ стеновых блоков из ПСБ плотностью 850 кг/м³ составляет 2400 руб. по данным производителя ООО Корпорации «Маяк». Средняя оптовая цена 1,0 м³ стеновых блоков из керамзитобетона М50 составляет 2480 руб. (по данным Компании «Бетон-Экспресс»). Оптовые цены взяты для региона Екатеринбурга и Свердловской области на конец 2008 года.

Приведенные эксплуатационные затраты на отопление зданий, для возмещения потерь тепла через стены, в сравниваемых вариантах рассчитывались по СНиП П-03-79* по формуле:

$$Z_{\text{э}} = A \frac{(t_{\text{в}} - t_{\text{от.пер}}) \cdot z_{\text{от.пер}} \cdot m \cdot C_{\text{T}} \cdot l_{\text{T}}}{R_0 \cdot E_{\text{НП}}}, \quad (6.3)$$

где $Z_{\text{э}}$ – приведенные эксплуатационные затраты на отопление в р. на м^2 блока в год; A – переводной коэффициент, равный 3600 в единицах СИ и 1 – в единицах, применявшихся ранее; $t_{\text{в}}$ – расчетная температура внутреннего воздуха в жилом помещении – 18°C ; $t_{\text{от.пер}}$ – средняя температура наружного воздуха за отопительный период, равна для Екатеринбурга минус $6,4^{\circ}\text{C}$ по СНиП 23-01-99*; $z_{\text{от.пер}}$ – продолжительность отопительного периода, составляет для Екатеринбурга 5472 час в год (228 сут.) по СНиП 23-01-99*; m – коэффициент, учитывающий дополнительные потери тепла на инфильтрации наружного воздуха, равный 1,05 по СНиП П-3-79*; C_{T} – стоимость тепловой энергии принята в расчете 681,67 руб. за 1 Гкал ($1 \cdot 10^6$ ккал) или $\frac{681 \cdot 10^{-6}}{4186,8}$ р/Дж по данным решения Региональной энергетической комиссии с 1.01.2009; l_{T} – коэффициент, учитывающий изменение стоимости тепловой энергии на перспективу, равен 1,2 по СНиП П-3-79*; $E_{\text{НП}}$ – норматив для определения разновременных затрат, (1/год), равный 0,08 по СНиП П-3-79*; R_0 – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, $\frac{\text{м}^2 \cdot \text{K}}{\text{Вт}}$.

Расчетная зимняя температура наружного воздуха холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92 для Екатеринбурга $t_{\text{н}} = -35^{\circ}\text{C}$; Нормативный температурный перепад $\Delta t_{\text{н}} = 3^{\circ}\text{C}$.

Коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждения $\alpha_{\text{в}} = 8,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$; $R_{\text{в}} = 1/\alpha_{\text{в}}$. Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждения $\alpha_{\text{н}} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$; $R_{\text{н}} = 1/\alpha_{\text{н}}$. Коэффициент зависимости положения наружной поверхности $n=1$;

Расчетные коэффициенты теплопроводности ограждающих конструкций при условиях эксплуатации «А» равны:

- для полистиролбетона с $\gamma = 850 \text{ кг}/\text{м}^3$ – $0,24 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{K}$;
- для керамзитобетона М50 – $0,44 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{K}$;

Толщина блоков в обоих вариантах – 400 мм (0,40 м).

Тогда термическое сопротивление для полистиролбетона $\gamma = 850 \text{ кг/м}^3$:

$$R_0 = \frac{0,40}{0,24} = 1,67 \frac{\dot{\lambda}^2 \cdot \hat{E}}{\hat{A} \delta},$$

а для керамзитобетона М 50:

$$R_0 = \frac{0,40}{0,44} = 0,91 \frac{\dot{\lambda}^2 \cdot \hat{E}}{\hat{A} \delta}.$$

Приведенные эксплуатационные затраты по формуле 6.3 на отопление в течение года, отнесенные к 1 м^2 материала, составят для базовых блоков (с керамзитобетоном М50) и разрабатываемых блоков (с полистиролбетоном $\gamma = 850 \text{ кг/м}^3$) соответственно:

$$C_{\dot{\lambda}}^{\text{эксп.}} = 3600 \frac{(18 + 6,4) \cdot 5472 \cdot 1,05 \cdot 681 \cdot 10^{-6} \cdot 1,2}{0,91 \cdot 0,08 \cdot 4186,8} = 1242,8 (\text{р./} \dot{\lambda}^2),$$

$$C_{\dot{\lambda}}^{\text{эксп.}} = 3600 \frac{(18 + 6,4) \cdot 5472 \cdot 1,05 \cdot 681 \cdot 10^{-6} \cdot 1,2}{1,67 \cdot 0,08 \cdot 4186,8} = 676,91 (\text{р./} \dot{\lambda}^2).$$

Разность приведенных эксплуатационных затрат на отопление зданий (экономика в сфере эксплуатации \mathcal{E}_3) по сравниваемым вариантам составляет:

$$\mathcal{E}_3 = 1242,8 - 676,91 = 565,89 (\text{р./м}^2 \text{год}),$$

или в перерасчете на 1 м^3 блока стены (толщина стены 0,40 м):

$$\mathcal{E}_3 = \frac{565,9}{0,40} = 1414 (\text{р./м}^3 \text{год}),$$

Экономический эффект по формуле 6.1:

$$\mathcal{E} = [(2480 + 1414) - 2400] \cdot 10000 = 14940000 (\text{р}).$$

Таким образом, ожидаемый экономический эффект от применения стеновых блоков из ПСБ плотностью 850 кг/м^3 в ограждающих конструкциях монолитного железобетонного девятиэтажного одноподъездного здания взамен блоков из керамзитобетона М50 составит 14940000 руб. по ценам 2009 г.

Экономическая эффективность от применения несущих перемычек из полистиролбетона плотностью 1250 кг/м^3 для ограждающих конструкций взамен несущих перемычек из ячеистого бетона плотностью 1200 кг/м^3 с одинаковыми геометрическими размерами очевидна. Оптовая цена 1 перемычки из ячеистого бетона, изготавливаемой на ОАО «Пермском Заводе Силикатных Панелей» по рабочим чертежам ОАО «УралНИИАС», составляет около 760 рублей (без стои-

мости перевозки), а стоимость 1перемычки, изготавливаемой ООО Корпорацией «Маяк» в г. Екатеринбурге также по рабочим чертежам ОАО институт «Урал-НИИАС», составляет около 440 рублей. Цены изделий взяты на момент написания работы (конец 2006 года).

По данным журнала «Стройка» за август 2008 года компания «Комплекс С» предлагает к продаже перемычки из ячеистого бетона марки ЗПП 17-2 Я, геометрическими размерами 1720x380x220 мм по оптовой цене 1022,71 руб. за штуку. ООО Корпорация «Маяк» в г. Екатеринбурге для нужд собственного строительства производит полистиролбетонные перемычки аналогичных размеров и армирования по себестоимости в 560 рублей за штуку. Компания «ЖБИ-информ» производит и предлагает к реализации перемычки керамзитовые (аналог ячеистобетонных) ПК12я-ПК30я по оптовой цене от 1040 руб.

Срок службы полистиролбетона и ячеистого бетона примерно равных плотностей и себестоимость строительного-монтажных работ по установке перемычки в ограждающую конструкцию по базовому и новому вариантам одинаковы.

Расчетные коэффициенты теплопроводности ограждающих конструкций при условиях эксплуатации «А» равны:

- для полистиролбетона плотностью 1250 кг/м³ – 0,28 Вт/м·К (по данным исследований приведенных в гл. 5.2);

- для ячеистого бетона плотностью 1200 кг/м³ – 0,29 Вт/м·К (по данным СНиП П-03-79* «Строительная теплотехника»).

Проведем сравнение сопротивления теплопередаче трехслойной полистиролбетонной панели с утеплителем из пенополистирола для жилого дома в г. Екатеринбурге и аналогичной керамзитобетонной панели, выпускающейся в настоящее время по серии 141СВ на ОАО «завод ЖБИ Бетфор». Сопротивление теплопередаче трехслойной полистиролбетонной панели толщиной $\delta=250$ мм с внутренним и наружным слоем из полистиролбетона толщиной $\delta_1= \delta_3=50$ мм и слоем утеплителя толщиной $\delta_2=150$ мм будет:

$$R_0 = R_s + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + R_u = \frac{1}{8,7} + \frac{0,05}{0,26} + \frac{0,15}{0,041} + \frac{0,05}{0,26} + \frac{1}{23} = 0,158 + 3,66 + 0,38 = 4,2$$

м²·ч·К/ккал

Для условий эксплуатации «А» - $\lambda_1 = \lambda_3 = 0,26$ Вт/мК (для полистиролбетона плотностью $\gamma=1000$ кг/м³ по данным исследований автора, проведенных в Испытательном центре ОАО институт «УралНИИАС»).

Сопrotивление теплопередаче трехслойной керамзитобетонной панели толщиной $\delta=280$ мм с внутренним слоем толщиной $\delta_1=50$ мм и наружным слоем толщиной $\delta_3=80$ мм из керамзитобетона и слоем утеплителя толщиной $\delta_2=150$ мм будет:

$$R_0 = R_s + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + R_n = \frac{1}{8,7} + \frac{0,05}{0,33} + \frac{0,15}{0,041} + \frac{0,08}{0,33} + \frac{1}{23} = 0,158 + 3,66 + 0,151 + 0,242 = 4,21 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{К/ккал}$$

Для условий эксплуатации «А» - $\lambda_1 = \lambda_3 = 0,33$ Вт/мК (для керамзитобетона плотностью $\gamma=1000$ кг/м³ по данным таблицы «Теплотехнические показатели строительных материалов и конструкций» Приложения 3 СНиП П-3-79*).

Как видно, сопротивление теплопередаче будет одинаковым у трехслойных самонесущих навесных панелей при уменьшении толщины материала внутреннего слоя на 30 мм с заменой керамзитобетона наружных и внутренних слоев на полистиролбетон с лучшими теплотехническими показателями.

Прочности на сжатие керамзитобетона и полистиролбетона при плотности 1000 кг/м³ примерно одинаковы и их значения соответствуют классу В 3,5-В5 (М50-М75). При геометрических размерах стеновой панели 6х2,8 м экономия материала на 1 панель при уменьшении ее толщины на 0,03 м составит около 0,5 м³ полистиролбетонной смеси. Стоимость 1 м³ полистиролбетонной смеси ориентировочной плотностью 1000 кг/м³ составляет 2300 руб., а стоимость 1 м³ керамзитобетонной смеси той же плотности составляет 2430 руб.

Таким образом, стоимость керамзитобетона в составе стеновой панели серии 141СВ составляет 5307 руб., а стоимость полистиролбетона составит 3864 руб.

Применение одной стеновой трехслойной панели из полистиролбетона взамен керамзитобетонной позволит получить экономию в 1443 руб. Себестоимость строительно-монтажных работ по установке стеновой панели в здании по базовому и новому вариантам одинакова.

Выводы

1. На основании обработки результатов испытаний полистиролбетонных изделий, установлено, что расчет несущих стеновых конструкций из полистиролбетона по методике, используемой Пособием по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов с введением необходимых изменений и дополнений в виде поправочных коэффициентов в формулах, учитывающих свойства материала при работе изгибаемых и сжатых элементов, позволяет оценивать их прочность, жесткость и трещиностойкость с необходимым запасом.

2. Зависимости между плотностью и прочностью на сжатие, плотностью и модулем упругости для ячеистых бетонов естественного твердения и полистиролбетонов в диапазоне плотностей от 800 до 1500 кг/м³ близки, что является косвенным свидетельством о применимости скорректированных методик расчета конструкций из ячеистого бетона к расчету конструкций из полистиролбетона.

3. Применение строительных изделий из конструкционного полистиролбетона экономически эффективно, как по затратам при производстве и монтаже изделия, так и при его эксплуатации. Экономическая эффективность при эксплуатации от улучшенных показателей по энергосбережению составит не менее 15%.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Подобраны необходимые сырьевые материалы из местных техногенных отходов предприятий Уральского региона и выбрана оптимальная химическая добавка - пластификатор «Реламикс-2» в количестве 0,6-1,0 % от массы цемента для проектирования составов полистиролбетона, позволяющая на 30% улучшить технологические свойства бетонной смеси. Полистиролбетонные смеси соответствуют требованиям разработанных ТУ 5745-001-20875427-02.

Разработаны 20 рациональных составов конструкционного полистиролбетона в диапазоне плотностей от 800 кг/м^3 до 1500 кг/м^3 на основе заполнителей из металлургических доменных и феррохромных шлаков и кварцевого песка, выбраны технологические параметры и рациональная технология тепловлажностной обработки строительных изделий.

2. На основании полученных результатов испытаний прочности на сжатие и растяжение полистиролбетона в диапазоне плотностей от 800 кг/м^3 до 1500 кг/м^3 , не регламентирующихся ГОСТ Р 51263-99, разработаны математические модели зависимости предела прочности ПСБ от состава смеси. Установлено, что по прочности на сжатие полистиролбетон соответствует классам В 5,0-В 12,5, как автоклавный ячеистый бетон, превышает на 10-15% прочность ячеистого бетона естественного режима твердения и на 20-30% прочность керамзитобетона. Прочность на осевое растяжение и растяжение при изгибе выше на 10-30% аналогичных показателей, установленных нормативными документами для данных видов легких бетонов.

3. Значение коэффициента линейной температурной деформации полистиролбетона на 15-20% меньше характеристик для керамзитобетона и близко к характеристикам для ячеистого бетона. Характеристики предельной деформативности, усадки и ползучести не превышают показатели для легких бетонов в диапазонах плотностей от 800 до 1500 кг/м^3 , принятые согласно Пособию по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистого бетона.

4. Определены характеристики морозостойкости, теплопроводности и паропроницаемости полистиролбетона в диапазоне плотностей от 800 кг/м^3 до 1500

кг/м³, позволяющие отнести его к долговечным материалам. Разработана математическая модель зависимости коэффициента теплопроводности полистиролбетона от состава смеси. Морозостойкость полистиролбетона классов по прочности В 5,0 - В 12,5 составляет не менее 150 циклов, что соответствует требованиям СНиП II-3-79*, а коэффициент теплопроводности для условий эксплуатации групп «А» и «Б» 0,2-0,34 Вт/м·К, что ниже, чем λ ячеистого бетона в 1,2-1,4 раза.

5. Перемещения балок из полистиролбетона ($\mu = 0,09-0,25\%$) в стадии их работы до образования трещин превышали на 18-31% теоретические перемещения, рассчитанные в соответствии с п.4.6 «Определение кривизны железобетонных элементов на участках без трещин в растянутой зоне» Пособия по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов, где φ_{b1} принимали как для ячеистого бетона (0,85). В связи с этим предлагается принимать значение коэффициента φ_{b1} равным 0,7, как для легких бетонов на пористом мелком заполнителе.

Предлагается при расчете перемычек из полистиролбетона при определении значения коэффициента η , учитывающего влияние прогиба несущего полистиролбетонного элемента на величину эксцентриситета продольного усилия e_0 (п. 3.6 Пособия по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов), в формуле по определению коэффициента φ_l , принимать значение $\beta = 1,5$, как для легкого бетона на мелком пористом заполнителе или ячеистого неавтоклавного бетона.

Установлено, что на жесткость балок из полистиролбетона в стадии после образования трещин оказывает влияние высокое сцепление полистиролбетона с арматурой, поэтому предлагается принимать значение коэффициента φ_{ls} (В 7,5-В 12,5), учитывающего влияние данного фактора, вместо 0,8 равным 1,0. Расчет жесткости балок из полистиролбетона с учетом предлагаемого значения коэффициента дает результаты, соответствующие экспериментальным.

6. С учетом изученных прочностных, деформационных и эксплуатационных свойств полистиролбетона в диапазоне плотностей от 800 кг/м³ до 1500 кг/м³, его рекомендуется использовать в природно-климатических условиях Урало-Сибирского региона для изготовления таких сборных несущих конструкций 2-5

этажных зданий, как стеновые блоки, перемычки и панели, которые раньше изготавливались из ячеистого, крупнопористого шлакового бетона и керамзитобетона.

7. Разработанные нормативные рекомендации по применению полистиролбетона в составе конструкций, ТУ 5745-001-20875427-02 «Смеси полистиролбетонные», ТУ 5767-002-20875427-02 «Блоки полистиролбетонные» и ТУ 5828-003-25057366-06 «Перемычки из полистиролбетона» подтверждены опытно-промышленными испытаниями, проведенными на базе ОАО «Завод ЖБИ Бетфор» и ООО «Корпорация Маяк».

8. Ожидаемый годовой экономический эффект от применения стеновых блоков из ПСБ плотностью 850 кг/м^3 в ограждающих конструкциях жилого 9-этажного одноподъездного здания из монолитного железобетона взамен керамзитобетона М50 составит 14,94 млн. руб. (в ценах 2009 г.) для завода ЖБИ с годовым объемом выпуска изделий в 10000 м^3 .

Список использованных источников

- 1 Азелицкая Р.Д., Спасских А.А., Тарадыменко А.С., Черных В.Ф. Механические и деформативные свойства керамзитополлистиролбетона // Бетон и железобетон. – 1973. - № 2. – С. 16-17.
- 2 Аксенов С.Е., Щелованова А.С., Домашникова Н.П. Экспериментальные исследования свойств полистиролбетона различного состава // Сборник статей Достижения, проблемы и перспективные направления развития теории и практики строительного материаловедения. Материалы десятых чтений РААСН / Казань – Пенза, 2006. - С. 95-98.
- 3 Ананьев А.И., Лобов О.И. Влияние технологических и эксплуатационных факторов на долговечность стен и покрытий, утепленных пенополистиролом // Отчет о НИР / НИИСФ. – М., 2003. – 10 с.
- 4 Аракелян А.А. Прочностные и деформативные свойства легких бетонов в зависимости от свойств заполнителей Автореферат дис. канд. техн. наук – М., 1986. - 24 с.
- 5 Беляков В.А. Перспективы развития исследований конструкционных и теплотехнических свойств полистиролбетона. Актуальные проблемы современного материаловедения // Сб. Материалов докладов всероссийской научной конференции молодых ученых Наука. Технологии. Инновации. - Новосибирск: НГТУ, ч. 2. – 2003. - С. 74-75.
- 6 Беляков В.А., Руднов В.С. Изготовление полистиролбетона. Экологическое значение использования отходов металлургического производства. р. Конструкционные материалы для стен // СтройПрофиль № 2(32) – Санкт-Петербург, 2004. – С. 14.
- 7 Беляков В.А. Проектирование составов конструкционного полистиролбетона с использованием современных химических добавок // Сб. статей Научные труды VII отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ / ГОУ ВПО УГТУ-УПИ – Екатеринбург, 2005. – Ч.2 – С. 218-219.
- 8 Беляков В.А. Руднов В.С. Изучение влияния состава и структуры полистиролбетона на его прочностную модель // Сб. тезисов докладов Всероссийской

конференции «Химия твердого тела и функциональные материалы» и IV семинара СО РАН - Уро РАН «Термодинамика и материаловедение». – Екатеринбург: Уро РАН, 2004. – С. 41-42.

9 Бугрим Ф.С., Зеликин С.Н., Пантелеенко В.Н. Использование стиропорбетона для изготовления объемных блоков в нефтегазовом строительстве. Обзор. – М.: Информнефтегазстрой. 1980. – 48 с.

10 Ванчиков К.В., Тимофеев А.А. Пенополистиролбетон. Актуальные проблемы современного материаловедения // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых Наука. Технологии. Инновации. - Новосибирск: НГТУ, ч. 2. - 2004. - С. 92-94.

11 Вайсбурд А.М., Тер-Осипянц Ф.Т. Применение полистиролбетона в СССР и за рубежом. Обзорн. инф. / Уз НИИНТИ – Ташкент, 1976. – 40 с.

12 Влияние возраста бетона в момент загрузки на его ползучесть / Госстрой СССР – Киев: НИИСП, - 1970. – 64 с.

13 Волков Ю.Г. Диссертация: Подготовка, защита, оформление: М.: Гардарики, 2002. – 160 с.

14 Гейданс И.У. Исследование способов облегчения теплоизоляционно-конструкционных стеновых материалов (применительно к строительству в отдаленных районах): Автореферат дис. канд. техн. наук – М., 1974. - 24 с.

15 Довгалюк В.И., Кац Г.Л. Конструкции из легких бетонов для многоэтажных каркасных зданий / М.: Стройиздат – 1984. – 223 с.

16 Довжик В.Г. Факторы, влияющие на прочность и плотность полистиролбетона // Бетон и железобетон. - 2004. - № 3. - С. 5-11.

17 Довжик В.Г., Россровский В.Н., Савельева Г.С., Иванова Ю.В. Хаймов И.С., Семенова Т.Д., Сафонов А.А. Технология и свойства полистиролбетона для стеновых конструкций // Бетон и железобетон - 1997. № 2. - С. 5-9.

18 Дорф В.А. Довжик В.Г. Высокопрочный керамзитобетон (Обзор опыта производства, особенностей технологии и свойств) // ЦНИИТЭСтром – М.: Главполиграфпром, 1968. – 52 с.

19 Евдокимов А.А. Физико-механические свойства теплоизоляционных легких бетонов на пористых заполнителях для многослойных ограждающих конструкций Автореферат дис. канд. техн. наук. – М., 1989. - 21 с.

20 Евдокимов А.А., Брускова Л.Н. Физико-механические свойства теплоизоляционного полистиролбетона и прочность его сцепления с констр. керамзитобетоном // Новое в технологии и свойствах легких бетонов – М.: НИИЖБ, 1980. – С. 99-109.

21 Евдокимов А.А., Дайнеко О.С., Приезжев В.А. Укрупненные панели из полистиролбетона для сельскохозяйственных зданий // Бетон и железобетон. - 1985. - № 10. – С. 4-5.

22 Евдокимов А.А., Дайнеко О.С. Прочностные и деформативные свойства конструкционно-теплоизоляционного керамзитобетона и полистиролбетона пониженной плотности / Сб. научн. тр. Эффективные легкие бетоны и конструкции из них – М.: НИИЖБ, 1984. – С. 15-24.

23 Ермилова В.С., Антропова В.А., Степанова В.Ф. Шлакополистиролбетон для наружных стеновых панелей // Материалы XXIII Международной конференции в области бетона и железобетона (16-23 мая 1991 г.) Волго-Балт-91 - М.: Стройиздат, 1991. – С. 60-61.

24 Жук В. Применение стиропорбетона на Чукотке // Сельское строительство. – 1974. - № 1. – С. 12-13.

25 Журба О.В., Архинчеева Н.В., Щукина Е.Г., Константинова К.К. К вопросу об адгезии цемента к пенополистиролу // Сб. статей Международной научно-практической Интернет-конференции Проблемы и достижения строительного материаловедения – Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2005. – С. 74-77.

26 Журба О.В. Легкие бетоны на основе регенерированного пенополистирольного сырья: Автореферат дис. канд. техн. наук – Улан-Удэ, 2007. - 22 с.

27 Зайцев Ю.В. Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушений - М.: Стройиздат, 1982. – 196 с.

28 Исследование прочности трехслойной стеновой панели из полистиролбетона, изготовленной на ДГУП 137 КЖИ МО РФ / Отчет о НИР от 28 марта 2002

г./ ОАО институт «УралНИИАС»; Рук. Никишкин В.А.- Екатеринбург, - 2002. - 53 с.

29 Исследование свойств полистиролбетона, как строительного материала на основе техногенных отходов металлургических предприятий и ТЭС Уральского региона: Отчет о НИР (промежуточ.) / ОАО институт «УралНИИАС»; Руководитель В.В. Щербаченко., В.П. Филиппов. В.А. Беляков. - Инв. 12745. – Екатеринбург, 2003. – Ч.1.- 39 с.

30 К нормированию модулей упругости легких бетонов / Курасова Г.П., Волков И.В., Истомин А.С., Кузнецова Л.А. // Расчет и конструирование элементов железобетонных конструкций из легких бетонов. – М.: Стройиздат, 1961. – С. 36-52.

31 Капустин Ф.Л., Спиридонова А. М., Жулидов В. Л., Ежов В. Б. Свойства строительных материалов и изделий / Федер. агентство по образованию. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. - 33 с.

32 Кириченко В.А. Оценка влияния режимов электропрогрева на физико-механические свойства полистиролбетонов // Бетон и железобетон. - №3. - 1995. – С. 13-14.

33 Клем В.Р. Подбор состава и технология производства пенополистиролбетона / Применение ячеистых бетонов в жилищном строительстве: Сб. научных трудов / ЛенЗНИИЭП, 1991. - с. 151-155.

34 Королева М.А., Беляков В.А., Аузинь И.А. Экономические аспекты решения теплотехнических проблем в современном строительстве // Проблемы и перспективы экономического развития России: инновации, финансирование, управление производством: Сборник научных трудов – Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2004. – С. 270-272.

35 Королев А.С., Волошин Е.А., Трофимов Б.Я. Оптимизация состава и структуры конструкционно-теплоизоляционного ячеистого бетона // Строительные Материалы. - №3. - 2004. - С. 30-32.

36 Король Е.А. Прочностные и деформативные свойства теплоизоляционного полистиролбетона для трехслойных ограждающих конструкций // Сб. научных

трудов / МЛТИ вып. 204. Комплексное использование древесины при производстве древесноцементных материалов. – М., 1983. - С. 60-66.

37 Король Е.А. Трехслойные ограждающие железобетонные конструкции из легких бетонов и особенности их расчета – М.: АСВ, 2001. – С. 52-69.

38 Кузьменков М.И., Бахир Е.Н. О возможности использования каустического доломита и сульфатсодержащих отходов при производстве полистиролбетона // Тез. докл./ Мин-во архитектуры и стр-ва респ. Беларусь. 1998. – С. 88-90.

39 Кузьменков М.И., Куницкая Т.С., Махницкая Е.Н. Полистиролбетон на магниальном вяжущем из доломита // Матер. науч-техн. конф. БГТУ / часть 2. Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии.- 1999. – С. 67-71.

40 Лаймов И.С., Ченцов М.А., Косяков С.А., Фотин О.В. Полистиролбетон. Исследование прочности на магниальном вяжущем // Сборник докладов VII научной конференции по актуальным проблемам строительной теплофизики. С. 214-216.

41 Легкие бетоны в сельском строительстве / Киселев Д.П., Мамонтов В.Н., Соколов В.А., Лapidус М.А., Ожгибесов Ю.П. – М.: Стройиздат, 1978. – С. 60-62.

42 Ли А.В. Долговечность энергоэффективных полимерсодержащих ограждающих конструкций: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: / Дальневост. гос. техн. ун-т. - Хабаровск, 2003 – 22 с .

43 Магдеев У.Х., Лившиц А.В., Штейн Б.Я., Бирман А.Р. Конструкционный золопесчаный бетон и теплоизоляционный полистиролбетон для трехслойных панелей наружных стен // Строительные материалы. – 1990. - № 2 –С. 9-12.

44 Филиппов В.П. Беляков В.А. Рекомендации по применению полистиролбетона в строительстве / ОАО институт «УралНИИАС», - Екатеринбург, - 2002. – 13 с.

45 Милых Т.И. Конструкционно-теплоизоляционный полистиролбетон // Бетон и железобетон. – 1988. - № 10. - С. 11-13.

46 Мелихов В.И., Козловский А.И., Россковский В.Н. Возможности получения особо легкого пенополистирольного заполнителя//Бетон и железобетон. – 1997. - №2. - С. 17-18.

47 Мелихов В.И., Девятое В.В., Шумилкин В.И. Энергосберегающая технология тепловой обработки полистиролбетонных изделий//Бетон и железобетон. – 1997. - №2. - С. 19-21.

48 Методика расчета несущей способности стен зданий с применением полистиролбетона (основные положения). ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко и ВНИИжелезобетон (согласована НИИЖБ), 2000 г.

49 Несущая способность простенков с применением полистиролбетонных блоков в многоэтажных зданиях при действии на них ветрового напора / Заключение ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко от 28.12.2000 г.

50 Нехорошев А.В., Меркин А.П., Гейданс И.У., Пучков В.Н. Стиропорбетон в отдаленных районах Арктики. // Строительные материалы. – 1973. - № 1. – С. 18-20.

51 Никишкин В.А. Исследование работы стеновых панелей ленточной резки из полистиролбетона // Строительный комплекс Среднего Урала. – 2002. - № 5. – С. 34-35.

52 Никишкин В.А. Влияние структуры и плотности на прочность и деформативность плотного строительного бетона // УГТУ-УПИ, – Екатеринбург, ООО «Издательство УМЦ УПИ» - 2009. – 269 с.

53 Нормали на проектирование и строительство зданий системы «Юникон» с применением полистиролбетонных изделий.// ВНИИжелезобетон, МНИИТЭП – М.,1999. - 60 с.

54 Носков А.С., Беляков В.А., Щербаченко В.В. Перспективы развития исследований конструкционных и теплотехнических свойств полистиролбетона. Строительные конструкции, основания и фундаменты // Строительство и образование: Сб. научн. тр. – Екатеринбург, УГТУ-УПИ, – 2003. - № 6. - С. 37-38.

55 Носков А.С., Беляков В.А. Исследование ползучести конструкционного полистиролбетона при длительном действии нагрузки. Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения: Сб. тр. VI международной конференции – Санкт-Петербург, СпбГПУ, - 2005. - С. 92-93.

- 56 Носков А.С., Беляков В.А. Конструкции из полистиролбетона для строительства жилых зданий // Жилищное строительство. – М., - 2008. - № 5. - С. 24-25.
- 57 Носков А.С., Филиппов В.П., Беляков В.А. Проектирование составов конструкционного полистиролбетона с использованием современных химических добавок // Бетон и железобетон в Украине. – 2005. - № 4 (26). – С. 8-13.
- 58 Овчаренко Е.Г., Петров – Денисов В.Г., Артемьев В.М. Основные направления развития производства эффективных теплоизоляционных материалов. // Строительные материалы. – 1996. - № 6. – С. 2-5.
- 59 Овчаренко Е.Г. Тенденции в производстве утеплителей в России // ЭСКО Экологические системы – М.: 2004. - № 6. - 6 с.
- 60 Однослойная стеновая панель из пенополистиролбетона: Информационный листок / МособлЦНТИ – 1985. - № 305. – 2 с.
- 61 Ольховская А.А., Макарец О.Н., Черных В.Ф. Изготовление стеновых блоков из стиропорбетона для строительства малоэтажных сельских зданий // Строительные материалы. – 1989. - № 8. – С.21.
- 62 Отчет испытания качества симпролит изоляционных панелей / Институт материалов и конструкций при Строительном факультете Белградского университета; Рук. М. Муравлев, Д. Йевтич – Инв. 13094. – Белград, 2001. – 8 с.
- 63 Павлов В.А. Пенополистирол / Изд-во Химия. М.: - 1973. - 12 с.
- 64 Панталеенко В.Н., Крупенская Л.С. Исследование режимов микротрещинообразования стиропорбетона / Сб. научн. тр. Способы строительства и материалы, применяемые при нефтегазовом строительстве в условиях севера./ ВНИИСТ – М.: 1980. – С. 123-130.
- 65 Парфенов В.Г. Исследование и разработка ресурсо- и энергосберегающих композиционных теплоизоляционных материалов на основе пенополистирола: Автореферат дис. канд. техн. наук. Тюмень, 2000. – 22 с.
- 66 Парфенов В.Г., Левинская Е.Я., Стефурак Б.И. Стиропорбетонные блоки. // Строительство трубопроводов. – М.: 1990. - № 11. – С. 31-33.

67 Патент. 2278096 Россия, Кириченко Виктор Алексеевич, Крылов Борис Александрович.-№2004119356/03; Заявл. 24.06.2004; Опубл. 20.06.2006. Способ изготовления строительных изделий из полистиролбетонной смеси.

68 Пирадов А.Б. Конструктивные свойства легкого бетона и железобетона – М.: Стройиздат, 1973. – 133 с.

69 ПК ЛИРА, версия 9.0 Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций. Справочно-теоретическое пособие / Под ред. А.С. Городецкого. – К.-М.: 2003. – 464 с.: ил.

70 Планирование эксперимента. Сборник докладов первого Всесоюзного совещания по планированию эксперимента / Под ред. Г.К. Круга – М.: Наука, 1966. – 423 с.

71 Полистиролбетонные армированные перемычки для теплоэффективных стен зданий системы «Юникон» ВНИИжелезобетона. Рабочие чертежи полистиролбетонных перемычек с армированием растянутой зоны стальными каркасами (шифр 22-2000).

72 Почапский Н.Ф. Зуйков Г. Г. Легкий цементный бетон на щебне из отходов пенополистирола // Известия вузов А.Н. СССР Сер. Строительство и архитектура. – 1969. - № 6. - С. 65-69.

73 Провести оценку прочности и теплотехнических свойств стеновых блоков, изготовленных по рабочим чертежам шифра НП-086.01-КЖИ при уменьшении средней плотности бетона / Заключение №16 от 4 марта 2002 г./ ОАО институт «УралНИИАС»; Рук. Никишкин В.А. - Екатеринбург, - 2002 г.- с.56.

74 Разработать технологический регламент на трехслойные стеновые панели со средним слоем из полистиролбетона, изготавливаемые методом безопалубочного формования: Отчет о НИР по теме 86-26 / Уральский ПромстройНИИпроект; Рук. Сакаев Р.В. - № 01870000861. - Екатеринбург, 1987. – 94 с.

75 Рахманов В. А., Довжик В. Г., Амханский Г. Я. Улучшение свойств и оптимизация составов полистиролбетона // П-я Всероссийская (Международная) конференция по бетону и железобетону, «Бетон и железобетон - пути развития». – М., 2005. - С. 35-47.

76 Рахманов В.А. Козловский А.И. Варламова А.В. Об экологической безопасности применения полистиролбетона в строительстве. – М.: Бетон и железобетон. – 1997. - № 2. – С. 18-20.

77 Результаты испытания на прочность, жесткость и трещиностойкость перемычек, изготовленных с использованием блоков несъемной опалубки из полистирола по ТУ-5835-002-71577039-2004: Отчет о НИР / ОАО институт «УралНИИАС»; Руководитель В.А. Никишкин. - №65 от 23 июня 2005 г. - Екатеринбург, 2005. - с. 44.

78 Результаты испытания на прочность, жесткость и трещиностойкость простенков, изготовленных с использованием блоков несъемной опалубки из полистирола по ТУ-5835-002-71577039-2004/ Заключение №67 от 28 июля 2005 г./ ОАО институт «УралНИИАС»; Руководитель В.А. Никишкин - Екатеринбург, - 2005. - с. 36.

79 Результаты испытания опытной стеновой панели из полистиролбетона на косою изгиб / Заключение №27 от 28 апреля 1999 г./ ОАО институт «УралНИИАС»; Рук. Никишкин В.А. - Екатеринбург, - 1999 г. - с. 27.

80 Результаты испытания простеночной панели ЗПС 15.21.30 из полистиролбетона, изготовленной ООО «Бетам» г. Новоуральск / Заключение №70 от 20 августа 1999 г./ ОАО институт «УралНИИАС»; Рук. Никишкин В.А. - Екатеринбург, - 1999 г. - с. 30.

81 Рекомендации по обеспечению пожарной безопасности ограждающих конструкций зданий и сооружений с использованием блоков из полистиролбетона ВНИИжелезобетона. НИИЖБ, 1998 г.

82 Савин В.И. Теплофизические свойства полистиролбетона для ограждающих конструкций // Сборник докладов второй научно-практической конференции «Проблемы строительной теплофизики систем микроклимата и энергосбережения в зданиях», т. III. – М.: НИИСФ, 1997. - С. 239-245.

83 Силаенков Е.С. Долговечность изделий из ячеистых бетонов. – М.: Стройиздат, 1986. – 175 с.

84 Скоробогатов С.М. Принцип информационной энтропии в механике разрушения инженерных сооружений и горных пластов. – Екатеринбург: УРГУПС, 2000. – 420 с.

85 Смирнов В. А. Опыт использования полистиролбетона для утепления ограждающих конструкций зданий в Нижегородской области // 2 Всероссийская (Международная) конференция. Бетон и железобетон - пути развития, Москва, 5-9 сент., 2005. Т. 4. Секционные доклады. Секция. Легкие и ячеистые бетоны. - М., 2005. - С. 290-292.

86 Стефурак Б.И., Левинская Е. Я., Парфенов В.Г. Формирование стиропорбетонной смеси методом электротермообработки. // Научно-технический сборник / Проблемы нефти и газа Тюмени. – Тюмень, 1979. - № 44. – С. 73-75.

87 Территориальные градостроительные нормы Свердловской области «Бетонные и железобетонные конструкции из полистиролбетона» - Екатеринбург: Правительство Свердловской области, ОАО институт «УралНИИАС», 2009. – 68 с.

88 Тонков Игорь Леонидович. Исследование физико-механических свойств полистиролбетона как материала для ремонта стен из ячеистых бетонов: Автореферат дис. канд. техн. наук / Пермь: ПермГТУ. - 2000.- 20 с.

89 Указания по проектированию перемычек из полистиролбетона для наружных стен зданий системы «Юникон»/ВНИИжелезобетон. – М., 2000. – 85 с.

90 Холмянский М.М. Бетон и железобетон: Деформативность и прочность. – М. Стройиздат, - 1997. - 576 с.

91 Чиненков Ю.В., Король Е.А. Трехслойные панели ленточной разрезки с утеплителем из полистиролбетона // Бетон и железобетон. – 1997. -№ 4. – С.2 – 5.

92 Щербаченко В.В., Филиппова И.В., Гурьева О.Я. Влияние гранулометрического состава полистирола на свойства полистиролбетона // Тезисы докладов научно-технической конференции – Свердловск, 1988. – С. 60-61.

93 Щербаченко В.В., Филиппова И.В., Гурьева О.Я. Влияние жесткости полистиролбетонной смеси на физико-механические свойства бетона // Совершенствование железобетонных конструкций для промышленного и гражданского

строительства и технология их изготовления на Среднем Урале: Тезисы докладов областной научно-технической конференции – Свердловск, 1988. – С. 35-36.

94 Щербаченко В.В., Гурьева О.Я. Полистиролбетон для замоноличивания стыков стеновых панелей // Совершенствование железобетонных конструкций для промышленного и гражданского строительства и технология их изготовления на Среднем Урале: Тезисы докладов областной научно-технической конференции – Свердловск, 1988. – С. 37-38.

95 Ямлеев У.А. Анцмферов Г.В. Технология производства легкобетонных конструкций – М.: Стройиздат, 1985. - 216 с.

96 Ярмаковский В.Н., Шапиро Г.И. Монолитный полистиролбетон - надежная теплозащита зданий // Промышленное и гражданское строительство. – М., 2002. - № 9. – С. 31-33.

97 Ярмаковский В.Н., Хаймов И.С., Петров В.Г. Модифицированный полистиролбетон // Наука и технология в промышленности. 2001. № 2.

98 Яхонтова. Н.Е., Авдеев Г.К., Клоков В.А., Ансерова Г.П. / Легкий бетон с заполнителем из полистирольного пенопласта // Строительные материалы. – М., 1968. - № 12. - С. 13-14.

99 Muravljev M., Dragica J. Primena EPS betona armiranog polipropilenskim vlaknima kao materijala za proizvodnju montažnih elemenata // IX Kongres Saveza Društava građevinskih konstruktora Jugoslavije / istraživača Institutu za materijale i konstrukcije Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu -1991., Cavtat 09. – 12, T-64.

100 Свойства цементной композиции, содержащей гранулы пенополистирола и полипропиленовое волокно. Properties of cement based composite made with expanded polystyrene grains and polypropylene fibers / Muravljev Mihailo A., Jevtic Dragica Lj., Zakic Dimitrije M, // Hem, ind. -2000. № 11. С. 501-504.

101 Batge W., Niemeyer W. Styroporbeton aus Transportbetonwerken // Beton – 1974. № 1 – s. 15-18.

102 Eick H. Styropor-beton // Zement-Kalk-Gips. – 1959. - Vol. 6. - P. 253-257.

103 Gvuzd M. Polystyrenovy beton // Pozemni stavby. – 1970. - Vol. 12 - P. 350-353.

- 104 Köhling K. Die Herstellung von Leichtbeton unter Verwendung von vorexpandierten Stiropor-Partikeln als Zuschlagstoff // Betonstein – Zeitung Heft. – 1960. – № 5. – S. 212.
- 105 Kohling K., Hohweller D. Styropor Concrete, A New Building Material // The BASF Review, Munich, - Sept. 1970. – Vol. 20, P. 69-76.
- 106 Litzka I. Hinterschlager Bezirksstraße KM 0.300 - Versuchsabschnitt Styroporbeton // Viennen Technologic University – 1998. - № 8. - 12 s.
- 107 Lightweight Aggregate Concrete. CEB/FIP Manual of Design and Technology. A. Short, P.W. Abeles, B. K. Bardhan Roy, P. Beckman, J. Bobrowski, S. Karl, M. Leewis, N.R. Sharpe, H. Weigler // Comité Euro-International du Béton (CEB) – 1977. – 240 p.
- 108 Mackenzie J.K. The elastic constants of a solid containing spherical holes. // Proc. Physical Society., - 1950. - series B, vol. 63.
- 109 Okada K., Ohama Y. Improvements in performance of concrete by use of polymers in Japan // The International Journal of Cement Composites. – 1979. - Vo1. 3, P. 181-190.
- 110 Sussman V. Lightweight Plastic-Aggregate Concrete // ACI Journal, Proceedings. - 1975. – Vol. 72. – № 7. - P. 321-323.
- 111 Sussman V., Baumann G.H. Expanded Polystyrene Beads Lighten the Load // SPE Journal. – 1972. – Vol. 28. - № 3. - P. 18-21.
- 112 Trautvetter R. Polystyrol als Lieghtzuschlagstoff // Baustoffindustrie. – 1961. - № 10. - S. 262-265.
- 113 Wienckowshi A, Stek F. Porowatose meszanin cial sypkich. Mies zaniny wieloskladnikove // Chemia stosowana. – 1966. – T. 113, 95.
- 114 Wienckowshi A, Stek F. Porowatose meszanin cial sypkich. Mies zaniny wieloskladnikove // Chemia stosowana. – 1966. – T. 413, 431.
- 115 Mag. Andrej Šušteršič FRAGMAT IZOLIRKA TRGOVINA // Komisija za uveljavljanje pravice do pokojnine pod ugodnejšimi pogoji. – 2003. - № 7. - T. 22-32.

**Предложения к проектированию составов конструкционного
полистиролбетона, примеры расчета**

Расчет рациональных составов конструкционного полистиролбетона

Определяющими требованиями при подборе составов полистиролбетона являлись:

- проектная марка или прочность при сжатии;
- заданная плотность в свежееуплотненной смеси, определяемая по формуле:

$$\gamma = V_{\text{п.с.}} \gamma_{\text{п.с.}} + V_{\text{р}} \gamma_{\text{р}}, \quad (1.1)$$

- жесткость полистиролбетонной смеси.

Требовалось рассчитать составы полистиролбетона класса В5(М75) по прочности на сжатие при плотности (γ) = 1000 кг/м³, класса В7,5(М100) на заполнителях доменном гранулированном шлаке ОАО «Металлургический завод им. А.К. Серова» и кварцевом песке ЗАО «Карьер Гора Хрустальная».

1 Определяем необходимые для расчета характеристики сырьевых компонентов **цементно-шлакового раствора.**

1.1. Нормальная густота цементного теста составляет 27 % (воды затворения, от массы цемента).

1.2. Водопотребность доменного граншлака фракции 0-5 мм, рассчитанная по ГОСТ 9758-86*, равна 23%.

Определялся коэффициент водопоглощения и смачиваемости заполнителей - $\lambda_{\text{п}}$ (водопотребность):

Брался раствор состава 1:3 (заполнитель к цементу) при В/Ц около 0,40 и растекаемостью на встряхивающем столике после 25 встряхиваний – до 15 см. После установления пластичности в раствор засыпалось 300 г заполнителя. Смесь тщательно перемешивалась и снова определялась пластичность. Чтобы обеспечить первоначальную пластичность добавлялась вода, после чего определялись коэффициент водопоглощения и смачиваемости заполнителя по формуле:

$$\lambda_{\text{п}} = В/П_3,$$

где В – добавка воды для получения первоначальной пластичности; П₃ – навеска заполнителя.

При определении водопотребности заполнителя использовалось цементное тесто с химической добавкой Реламикс Т-2 0,6 % по массе сухого вещества (цемента), выбранной наиболее оптимальной по результатам сравнения добавок.

2 Задаем К - цементно - шлаковое отношение равным 3:1.

3 Вычисляем состав цементно-шлакового раствора по уравнениям:

$$\frac{Ц}{3,1} + \frac{Ш}{2,41} + В = 1, \quad (1.2)$$

где 3,1 и 2,41 – истинные плотности цемента и шлака используемых фракций, определенные с помощью прибора Ле Шателье

$$Ц/Ш = К \quad (1.3)$$

(оптимальное соотношение выбрано на основании результатов постановочного эксперимента)

$$Ц \times НГ + Ш \times W_{\text{ш}} = В, \text{ где} \quad (1.4)$$

НГ = 0,27 – нормальная густота цементного теста в %;

$W_{ш}$ – водопотребность доменного гранулированного шлака в %.

Расход материала на 1,0 литр раствора составляет:

Цемент марки 400 - 1230 г., доменного граншлака – 410 г, воды – 426 мл.

Плотность раствора - 2066 г/л

4 Количество раствора составляет для плотности **1000 кг/м³**:

$$1000/2066 = 0,483$$

Задаем количество растворной части = 0,483

5 Расход материалов на 0,483 раствора составляет:

- Цемент Сухоложский + 0,6 % Реламикс Т-2 – 596 г

- Доменный гранулированный шлак ОАО «Металлургический завод им. А.К. Серова» – 198 г.

- Вода – 206 мл

6 Необходимое количество полистирола вычисляем в следующей последовательности

6.1 Определяем межзерновую пустотность полистирола ($V_{п}$, %) по формуле:

$$V_{\bar{i}} = \left(1 - \frac{\rho_i}{1000\rho_{\bar{c}}} \right) 1000;$$

где $\rho_{н.п}$ — насыпная плотность полистирола, кг/м³; ρ — истинная плотность полистирола, кг/м³.

Пустотность полистирола выбранной фракции 2-5 мм составляет 40 % и определяется в соответствии с ГОСТ 9758-86* «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний».

Количество полистирола данной фракции принимаем 0,88 л/л в насыпном состоянии

Таким образом, искомый состав полистиролбетона на 1 м³ :

- Цемент Сухоложский + 0,6 % Реламикс-2 – 596 кг;

- Доменный гранулированный шлак ОАО «Металлургический завод им. А.К. Серова» – 198 кг;

- Вспененные гранулы полистирола фракцией 3-5 мм – 880 л;

- Вода – 206 л.

Водоцементное отношение у всех подобранных составов полистиролбетона равнялось 0,35 и соответствовало подвижности бетонной смеси П с ОК=5-9 см, определенной в соответствии с требованиями ГОСТ 10181-2000 «Смеси бетонные. Методы испытаний».

7 После испытания отформованных образцов-кубов на прочность при сжатии и плотность состав может быть уточнен. Корректировка может быть произведена изменением цементно-шлакового отношения или изменением количества растворной составляющей (ϕ_p).

1 Определяем необходимые для расчета характеристики компонентов **цементно-песчаного раствора**.

- Нормальная густота цементного теста составляет 27 % (воды затворения, от массы цемента).

- Водопотребность дробленого кварцевого песка фракции < 2,5 мм, рассчитанная по ГОСТ 9758-86*, равна 23%. При определении водопотребности заполнителя использовалось цементное тесто с добавкой 0,6 % С-3 по массе сухого вещества (цемента).

2 Задаем цементно - песчаное отношение равным 3:1.

3 Вычисляем состав цементно-песчаного раствора по уравнениям:

$$\frac{Ц}{3,1} + \frac{П}{2,5} + В = 1,$$

где 3,1 и 2,41 – истинные плотности цемента и песка используемых фракций, определенные с помощью прибора Ле Шателье

$$Ц/П = 3:1 (3,1:1)$$

(оптимальное соотношение вяжущего и заполнителя выбрано на основании результатов постановочного эксперимента, см. Приложение 2)

$$Ц \times 0,27 + П \times 0,15 = В$$

Расход материала на 1 литр раствора составляет:

Цемент марки 400 - 1290 г., дробленого кварцевого песка – 430 г, воды – 413 мл.

Плотность раствора - 2133 г/л

4 Количество раствора составляет:

$$1200/2133 = 0,562$$

Задаем количество растворной части = 0,565

5 Расход материалов на 0,483 раствора составляет:

Цемент Сухоложский + 0,6 % Реламикс Т-2 – 730 г

Дробленый кварцевый песок ЗАО «Карьер Гора Хрустальная» – 243 г

Вода – 233 мл

6 Необходимое количество полистирола вычисляем в следующей последовательности с учетом ранее разработанных формул:

6.1 Определяем межзерновую пустотность полистирола ($V_{п}$, %) по формуле:

$$V_{п} = \left(1 - \frac{\rho_i}{1000\rho_{\phi}} \right) 1000;$$

где $\rho_{н.п}$ — насыпная плотность полистирола, кг/м³; ρ — истинная плотность полистирола, кг/м³.

Пустотность полистирола выбранной фракции 2-5 мм составляет 40 % и определяется в соответствии с ГОСТ 9758-86* «Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний».

Количество полистирола данной фракции принимаем 0,88 л/л в насыпном состоянии

Таким образом, искомый состав полистиролбетона на 1 м³ :

Цемент Невьянский + 0,6 % С-3 – 730 кг;

Дробленый кварцевый песок – 243 кг;

Вспененные гранулы полистирола фракцией 3-5 мм – 880 л;

Вода – 233 мл.

Водоцементное отношение у подобранного состава полистиролбетона равнялось 0,32 и соответствовало подвижности бетонной смеси П с ОК=5-9 см, определенной по методике требуемой ГОСТ 1018.1-2000 «Смеси бетонные. Методы испытаний».



МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ЦЕНТР ГОСУДАРСТВЕННОГО САНИТАРНО-ЭПИДЕМИОЛОГИЧЕСКОГО НАДЗОРА
В СВЕРДЛОВСКОЙ ОБЛАСТИ
620078 г. Екатеринбург, пер. Отдельный, 3

(наименование и реквизиты учреждения)

Гигиеническое заключение на продукцию, товар

№ 66.01.ОТ.570.П.00592.08.99 от 25.08.99

Продукция **ШЛАК ГРАНУЛИРОВАННЫЙ ДОМЕННЫЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЦЕМЕНТА**

(наименование)

допущена к производству, поставке, реализации, использованию на территории Российской Федерации (ненужное зачеркнуть)

Организация – разработчик нормативной документации
НП «Серовский металлургический завод», РОССИЯ, г.Серов, Свердловской области,
ул.Агломератчиков, 6

Организация – изготовитель
НП «Серовский металлургический завод», РОССИЯ, г.Серов, Свердловской области,
ул.Агломератчиков, 6

Получатель гигиенического заключения
НП «Серовский металлургический завод», РОССИЯ, г.Серов, Свердловской области,
ул.Агломератчиков, 6

Нормативная и технологическая документация:
ГОСТ 3476-74, ТИ 135-Д-01-95

Протоколы исследований №10.9.1225/4/1825-пр от 14.07.99 ИЛЦ Центра госсанэпиднадзора в Свердловской области, аттестат
"Системы" № ГСЭН. RU. ЦОО. 065 от 26.08.96г., в Госреестре регистрационный № РОСС RU. 001.
510116 от 26.08.96г.

Реквизиты импортной продукции:

№ 0105328

Гигиеническая характеристика продукции

Вещества, Показатели (факторы)	Гигиенический Норматив (СанПиН, МАУ, ПДК и др.)
1. ПДК рз по пыли шлама по ГОСТ 12.1.005	0,0 мг/м ³
2. Класс опасности по ГОСТ 12.1.007	4
3. Уровень запаха	< 2 баллов
4. Количество химических элементов, мигрирующих в модельные среды (подвижные формы)	мг/дм ³
- медь	3,0
- никель	4,0
- кобальт	5,0
- хром	6,0
- цинк	23,0
5. Острая токсичность водных вытяжек	70-120 %
6. Эффективная концентрация естественных радионуклидов	< 370 Бк/кг

Область применения:
В качестве материала применяемого в производстве цемента и наполнителя в строительстве
блоках зданий 1 – 2 этажных категории "А - В"

Необходимые условия использования, хранения, транспортировки и меры
Согласно инструкции пользования.

Информация, наносимая на этикетку:
Наименование, ГОСТ, ТУ, ТО, артикул.

Настоящее заключение действительно до 01.12.2002 г. на серийное производство

Главный государственный санитарный врач
(заместитель главного государственного санитарного врача)

Никонов Б. И.
Ф. И. О. _____

ОАО "УРАЛЬСКАЯ ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ"

Аналитический испытательный центр.

Г. Екатеринбург, ул. Куйбышева 55, тел. (3432) 22-54-61

Аттестат аккредитации Госстандарта России № РОСС RU. 0001.510866 от 28.10.99

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Заказчик ОАО институт "УралНИИАС"

Объект анализа цемент

№ МВИ ГОСТ 8269.1-97

№ лаб. Заказа 62-2-03 Содержание в %

№		Na ₂ O%	K ₂ O%	P ₂ O ₅ %	SiO ₂ %	Сера% ^а	Сера% ^б		
1	домениный гранулирует	0,36	0,61	0,012	34,99	≤ 0,10	0,81		
2	феррохромовый шлаковос.	≤ 0,050	≤ 0,050	≤ 0,005	26,90	≤ 0,10	≤ 0,10		
		Fe ₂ O ₃ %	FeO%	MgO%	CaO%	Сl%	Fe ₂ O ₃ об.ч. ^а	рН зр.	своб. Св ^б
1		0,38	2,18	5,56	40,80	≤ 0,05	2,80	11,56	н/обн.
2		≤ 0,050	0,36	12,29	48,71	≤ 0,05	0,40	11,60	н/обн.

Характеристика погрешности результатов анализа: в соответствии с ГОСТ 8269.1-97

Исполнители Трунова, Филиппова, Иванова

Начальник ХАЛ Филиппова Н.В. / Филиппова Н.В. Ген. директор ОАО "УЦЛ" Ермак А.А. / Ермак А.А.

30 апреля 2003 г.



Результаты статистической обработки экспериментальных данных

В процессе статистической обработки результатов постановочного эксперимента для ориентации симплексов в факторном пространстве координаты вершин определялись из теоретической числовой матрицы (см. табл. П2.1).

Таблица П2.1 - Теоретическая числовая матрица

Номер опыта в исходном симплексе	Значения факторов		
	X_1	X_2	X_3
1	+ 0,500	+0,289	0,204
2	- 0,500	0,289	0,204
3	0	-0,578	0,204
4	0	0	- 0,612

При переходе к матрице с именованными значениями учитывали интервалы варьирования изучаемых независимых переменных и координаты центра эксперимента (табл. П2.2)

Таблица П2.2 – Интервалы варьирования переменных

Факторы		Наименование факторов	Нулевой уровень факторов ($x=0$)	Интервалы варьирования факторов (E)
обозначения в кодированных величинах	в именованных величинах			
X_1	Ц_1 , кг	кол-во цемента с добавкой	380	10
X_2	З_2 , кг	кол-во инертн. заполнителя	230	10
X_3	В_3 , л	кол-во воды	140	10

Связь кодированных и именованных значений факторов характеризовалась следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
 \text{Ц} &= 400 + 70X_1 \\
 \text{В} &= 150 + 20X_3 \\
 \text{П} &= 250 + 60X_2
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Именованные значения факторов первых четырех опытов подсчитаны по формулам 2.1. Результаты приведены в табл. П2.3.

Таблица П2.3 – Результаты именованных значений факторов

Номер опыта	Ц, кг	З, кг	В, л	γ , кг/м ³	$\sigma_{сж}$, МПа
1	650	350	250	1220	10,8
2	665	375	270	1250	11,4
3	630	360	230	1210	10,5
4	620	330	210	1190	10,7

В опытах 3, 4 прочность полистиролбетона представляется недостаточной при плохой удобоукладываемости смеси. К оптимуму приближались постепенно, отбрасывая плохие вершины (3 и 4).

Координату каждой (K+2) – й новой точки определяем по формуле:

$$X_{ji}^{(K+2)} = \frac{2}{K - (n - 1)} \cdot \sum_{i=1}^{K-(n-1)} X_{ji} - X_{ji}^*, \quad (2.3)$$

где $X_{ji}^{(K+2)}$ - координата новой точки; X_{ji}^* - координата точки с минимальным параметром оптимизации;

Значения факторов всех следующих опытов подсчитаны по формуле 2.3. Результаты даны в табл. П2.4.

Таблица П2.4 – Значения факторов

Рабочая матрица

Номер опыта	X_1	X_2	X_3	γ , кг/м ³	$\sigma_{сж}$, МПа
1	2	3	4	5	6
1	600	255	245	1150	9,2
2	600	270	250	1175	9,7
3	650	350	250	1220	10,8
4	665	375	270	1250	11,4
5	620	330	210	1190	10,7
6	650	375	250	1275	11,4
7	640	330	220	1210	10,2
8	780	365	270	1350	12,5
9	700	370	280	1375	12,8
10	720	375	300	1410	15,5
11	820	375	310	1450	15,8
12	720	375	300	1400	15,4

Эксперимент был закончен на 12 опыте.

Лучшими являются составы полистиролбетона, приведенные в таблицах 2.2.1 - 2.2.3 в главе 2.

Таблица П2.5 - Коэффициенты при неизвестных уравнений регрессии прочностных характеристик конструкционного полистиролбетона

Выходной параметр		Коэффициенты уравнений регрессии					
Наименование	Обозначение	и их значения					
		B_0	B_1	B_2	B_{12}	B_{11}	B_{22}
Кубиковая прочность на сжатие	R_{800}	0,62	0,28	0,05	0	0	0,19
	R_{1000}	1,09	0,35	0	0	0	0,43
	R_{1250}	1,27	0,42	0	0	0	0,54
	R_{1450}	1,42	0,47	0	0	0	0,65
Призменная прочность На сжатие	R_{800}	0,49	0,16	0,03	0	0	0,17
	R_{1000}	0,99	0,32	0	0	0	0,41
	R_{1250}	1,16	0,36	0	0	0	0,52
	R_{1450}	1,35	0,42	0	0	0	0,61
Прочность на местное смятие (центральное)	R_{cm1200}	1,14	0,49	0	0	0	0,59
Прочность на осевое растяжение	R_{1000}	0,24	0,09	0,01	0	0,02	0
Прочность на растяжение при изгибе	R_{1000}	0,46	0,07	0,09	0	0	0,08

Таблица П2.6 - Коэффициенты при неизвестных уравнений регрессии деформационных характеристик конструкционного полистиролбетона

Выходной параметр		Коэффициенты уравнений регрессии					
Наименование	Обозначение	и их значения					
		B_0	B_1	B_2	B_{12}	B_{11}	B_{22}
Начальный модуль упругости	R_{800}	0,62	0,28	0,05	0	0	0,19
	R_{1000}	1,09	0,35	0	0	0	0,43
	R_{1250}	1,22	0,41	0	0	0	0,52

Окончание таблицы П2.6

	R ₁₄₅₀	1,35	0	0	0	0	0,59
Трещиностойкость	R ₁₂₅₀	0,12	0,05	0,01	0	0	0
	R ₁₃₅₀	0,19	0,07	0,01	0	0,01	0
	R ₁₄₅₀	0,24	0,09	0,01	0	0,02	0
Усадка	R ₁₀₀₀	0,46	0,17	0,05	0	0	0,24
Ползучесть	R ₁₀₀₀	0,58	0,23	0,08	0	0	0,32

Таблица П2.7 - Коэффициенты при неизвестных уравнений регрессии эксплуатационных характеристик конструкционного полистиролбетона

Выходной параметр		Коэффициенты уравнений регрессии и их значения					
Наименование	Обозначение	B ₀	B ₁	B ₂	B ₁₂	B ₁₁	B ₂₂
		Морозостойкость	R ₈₀₀	0,24	0,11	0,05	0
R ₁₀₀₀	0,36		0,16	0	0	0	0,12
R ₁₂₅₀	0,45		0,21	0	0	0	0,17
R ₁₄₅₀	0,54		0,26	0	0	0	0,20
Теплопроводность	R ₁₂₅₀	0,09	0	0	0	0	0,05
	R ₁₃₅₀	0,16	0	0	0	0	0,08
	R ₁₄₅₀	0,24	0,09	0,01	0	0,02	0
Паропроницаемость	R ₁₀₀₀	0,39	0,13	0	0	0	0,07
Линейная температурная деформация	R ₁₀₀₀	0,34	0,19	0	0	0	0,15
	R ₁₂₅₀	0,43	0,27	0	0	0	0,23
	R ₁₃₅₀	0,52	0,35	0	0	0	0,26
	R ₁₄₅₀	0,65	0	0	0	0	0,29

Таблица П 2.8 – Результаты испытания образцов на сцепление полистиролбетона с арматурой

Марка образца	Плотность, кг/м ³	Арматура		Нагрузка, кг		Напряжение в арматуре при N _{сдв}	Сцепление при N _{сдв} , кг/см ²	Сдвиг ненагруженного конца арматуры при N _{сдв} , микрон
		сечение	длина заделки l _{сп} , см	Максимальная Nr	в момент начала сдвига ненагруженного конца арматуры N _{сдв}			
				<u>Изгибаемые образцы</u>				
Б1-1	1250	10 А-I	38	3200	3040	2050	28	12
Б1-2	1240							
Б2-1	1250	10 А-III	38	3850	3650	2140	36	9
Б2-2	1260							
Б3-1	1250	10 А-III	42	3920	3700	2170	42	9
Б3-2	1230							
Б4-1	1250	10 А-III	42	3800	3610	2150	42	10
Б4-2	1250							
Б5-1	1230	16 А-III	38	4080	3870	2180	38	14
Б5-2	1240							
Б6-1	1250	16 А-III	38	4220	4000	2200	45	14
Б6-2	1250							
Б7-1	1240	16 А-III	38	4120	3910	2170	45	15
Б7-2	1250							
Б8-1	1300	16 А-III	42	4350	4130	2210	48	18
Б8-2	1310							
Б9-1	1300	16 А-III	42	4200	3990	2200	48	15
Б9-2	1300							

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Материалы о внедрении



Утверждаю
Генеральный директор
ОАО институт "ВНИИАС"
Ф.А. Селезнев
09 2002 г.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ПОЛИСТИРОЛБЕТОНА В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

должность	подпись, дата	и.о. фамилия
Зав. отделом №9		В.П. Филиппов
Исполнитель работ		В.А. Беляков

Екатеринбург
2002г.



Союз предприятий строительной
индустрии Свердловской области

620219 Россия, г. Екатеринбург
ул. Мамина-Сибиряка, 111, оф. 425
тел./факс 350-40-23, 350-31-06, 350-54-76, 350-54-29
E-mail: spsi@mail.ur.ru

№ _____ от 29 октября 2009 г.

На № _____ от « _____ » _____ 2009 г.

Генеральному директору
ОАО институт «УралНИИАС»
канд. техн. наук Селезнёву Ф. А.

Уважаемый Фёдор Алексеевич!

Сообщаю Вам, что Проект Территориальных градостроительных норм «Бетонные и железобетонные конструкции из полистиролбетона», разработанный Вашим институтом (к. т. н. В. А. Никишкин, мл. научн. сотр. В. А. Беляков, инж. Н. А. Галанина) в настоящий момент находится в стадии утверждения в Техническом комитете по стандартизации Тк 465 «Строительство» Российской Торгово-промышленной палаты Российской Федерации.

С уважением,

Директор



Ю.Н. Чумерин

Открытое акционерное общество
Уральский научно-исследовательский институт
архитектуры и строительства
ОАО институт "УралНИИАС"

ОКП 582826

Группа Ж 33

УТВЕРЖДАЮ:
Президент
ООО Корпорация «Маяк»

УТВЕРЖДАЮ:
Директор по научной работе
ОАО институт "УралНИИАС"
канд. техн. наук



В.А.Коньков

_____ 2006 г.



А.Н.Цетверкин

" " _____ 2006 г.

ПЕРЕМЫЧКИ ИЗ ПОЛИСТИРОЛБЕТОНА

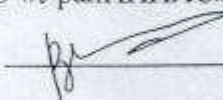
ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

ТУ 5828-003-25057366-2006

Введены впервые

Срок действия с « 24 » мая 2006 г.

Заведующий отделом
строительных материалов и изделий
ОАО «УралНИИАС» канд. техн. наук

 В.А. Никишкин

Мл.научный сотрудник

_____ В.А. Беляков

Екатеринбург 2006

ОАО «Бетфор»

ИНН 6660076494, ОКПО 01217316, ОКОНХ, 16140, КПП 667001001
620072, г. Екатеринбург, ул. 40 лет Комсомола, 34
Телефон/Факс: /343/ 215-99-33, 215-99-44, 215-89-89
E-mail: betfor@betfor.ru



www.betfor.ru

Исх. № 02-9 от «13» 02 2009 г.
На № _____ от « » _____ 200 г.

ОАО Институт «УралНИИАС»		
Кому	Дата	Роспись
Генеральному директору	Ф.А. 14.02.	
Белякову В.А.	19.12.	<i>[Signature]</i>

Генеральному директору
ОАО институт «УралНИИАС»
Ф.А. Селезеву

Сообщаем Вам, что материалы диссертационной работы «Прочностные, деформационные и эксплуатационные свойства полистиролбетона для строительных конструкций» сотрудника Вашей организации Белякова В.А. использовались при подборе составов и опытной формовке образцов конструкционного полистиролбетона для внешних слоев трехслойной стеновой панели в соответствии с договором № 08-2536 от 31 октября 2008 г.

Гл. инженер

О.Ф. Федотов

ОАО институт «УралНИИАС»

Вх. № 371 от 14.02.09