

Министерство образования и науки РФ
Южно-Уральский государственный университет (НИУ)
Институт «Архитектурно-строительный»
Кафедра «Строительные материалы и изделия»

ПРОЕКТ ПРОВЕРЕН

Рецензент

/ /

« » 2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

И.О. Зав. кафедрой

/Б.Я. Трофимов/

« » 2018 г.

Пояснительная записка к диссертационной работе

08.04.01.2018.252.00.00.ПЗ

**Особенности использования легких бетонов
для зданий в жарком климате**

/А.А. Орлов/

« » 2018 г.

Автор проекта

Студент группы АС –269

/ Альшибанах Маджид А. Абдулхуссейн/

« » 2018 г.

Нормоконтролёр

/А.А. Орлов/

« » 2018 г.

Руководитель проекта

АННОТАЦИЯ

Альшибанах Маджид А. Абдулхуссейн
Особенности использования легких бетонов
для зданий в жарком климате – Челябинск:
ЮУрГУ, Строительные материалы, 2018,
97 с., 6 ил., 2 табл.

Библиографический список – 95 наименований.

В дипломной работе представлен обзор особенностей производства и применения легких бетонов в условиях жаркого климата. Выявлены взаимосвязи основных технических свойств ячеистых бетонов. Обоснована экологическая целесообразность применения легких бетонов, в том числе, в условиях жаркого климата.

					<i>08.04.01.2018.252.00.00.ПЗ</i>			
<i>Изм</i>	<i>Дата</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Особенности использования легких бетонов для зданий в жарком климате</i>	<i>Литера</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>		<i>Альшибанах</i>				<i>ДР</i>	<i>4</i>	<i>97</i>
		<i>Маджид А. А.</i>				<i>ЮУрГУ Кафедра «Строительные материалы и изделия»</i>		
<i>Проверил</i>		<i>Орлов А.А.</i>						
<i>Н.контр.</i>		<i>Орлов А.А.</i>						
<i>Утв.</i>		<i>Трофимов Б.Я.</i>						

СОДЕРЖАНИЕ

[СОДЕРЖАНИЕ](#) **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

[ВВЕДЕНИЕ](#)..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

[1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЛЕГКИХ БЕТОНАХ](#)**ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

[1.1 Классификация легких бетонов](#)..... **Error! Bookmark not defined.**

[1.2 Материалы производства легкого бетона](#)**Error! Bookmark not defined.**

[1.3 Особенности ячеистых бетонов](#)..... **Error! Bookmark not defined.**

[1.4 Поризованный легкий бетон](#)..... **Error! Bookmark not defined.**

[1.5 Свойства легких бетонов](#)..... **Error! Bookmark not defined.**

[1.6 Технология производства легкого бетона](#)**Error! Bookmark not defined.**

[1.7 Выводы по литературному обзору](#)..... **Error! Bookmark not defined.**

[2 ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ В УСЛОВИЯХ
ЖАРКОГО КЛИМАТА](#) **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

[2.1 Сырье для производства легких бетонов в условиях жаркого
климата](#)..... **Error! Bookmark not defined.**

[2.2 Особенности применения легких бетонов в условиях жаркого
климата](#)..... **Error! Bookmark not defined.**

[2.3 Проблемы возникающие при производстве легких бетонов в
условиях жаркого климата](#)..... **Error! Bookmark not defined.**

[3 АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ В УСЛОВИЯХ
ЖАРКОГО КЛИМАТА](#) **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

[3.1 Экономические аспекты](#)..... **Error! Bookmark not defined.**

[3.2 Экологические аспекты](#)..... **Error! Bookmark not defined.**

[4 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ](#)..... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

[5 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОЗАВИСИМОСТЕЙ ЯЧЕИСТОГО
БЕТОНА](#) **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

[БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК](#)**ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

ВВЕДЕНИЕ

Бетон – это искусственный камень, полученный в результате заделки рационально подобранной смеси, состоящей из вяжущего, воды и заполнителей (песка, щебня). Смесь этих материалов перед отверждением называется бетоном.

Из-за активности связующего и воды происходит образование цементного камня и монолита. Поскольку наполнители используют в основном местные дешевые материалы (песок, гравий, щебень). Совокупность в большинстве случаев не входит в химическое соединение с цементом и водой, ведет себя инертно, поэтому их часто называют инертными материалами. В дополнение к заполнителям бетон может также содержать специальные добавки, которые улучшают свойства бетона, особенно увеличивая пластичность бетонной смеси или морозостойкость бетона[1].

Основное разделение бетона производится в соответствии со средней плотностью (по объему), в зависимости от плотности цементного камня и типа заполнителя. С этим индикатором связаны и такие свойства, как прочность, морозостойкость, водопроницаемость, теплопроводность и т. д.

Средняя плотность бетона делится на 4 типа:

1. Особо тяжелые кг/м^3 – в качестве наполнителя используются стальные опилки или барит (BaSO_4) – тяжелый шпат и баритовый бетон.
2. Тяжелый (обычный) бетон – от 2000 до 2500 кг/м^3 –заполнители: кварцевый песок, щебень или гравий из плотных каменных пород.
3. Легкий кг/м^3 , содержащий легкие заполнители (шлак, пемза, туф), обычно плотная структура или крупная пористая структура.
4. Особо легкий кг/м^3 , бетон очень пористый, ячеистый (пена, газобетон) или крупнопористый (чаще от 500 – 600 кг/м^3)[4].

По структуре:

1. Плотная структура – все пространство между зернами заполнителя занято цементным компонентом с пористостью не более 6 %.

2. Структура пористости – все пространство между зернами заполнителей заполнено пенно или газообразователями цементирующим компонентом не более 6 %.

3. Крупнозернистая структура – пространство между зернами крупного заполнителя заполняется только частично затвердевшим цементным компонентом.

4. Ячеистая структура – объем материала составляет 60 – 90 %, заполненный порами ячеек (0,5 ... 2 мм) [15].

По назначению:

1. Конструкционные (обычные) – бетонные (предъявляющие обычные требования к прочности и долговечности).

2. Специальный–гидротехнический, дорожный, аэродромный, высокопрочный, жаростойкий, химически стойкий, радиационно – защитный и т. д.).

Легкий бетон является эффективным материалом, который имеет большую перспективу. Легкие бетоны все чаще используются в строительстве [19]. Строительство из легкого бетона позволяет улучшить тепловые и акустические свойства зданий, значительно снизить их вес, успешно решить проблему объемного и многоэтажного строительства, а также строительство в сейсмических районах страны. Использование легкого бетона позволяет снизить затраты на строительство на 10... 20 %, снизить затраты на рабочую силу на строительных площадках до 50 %, повысить производительность труда на 20 %.

Перед отраслью строительных материалов задача заключается в повышении эффективности, качества и долговечности изделий, экономии энергии, сырья, снижении потребления металла и веса конструкций и зданий и снижении затрат на рабочую силу.

Одним из способов решения этой проблемы является значительное увеличение доли производства и применения конструкций и деталей из легкого бетона.

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЛЕГКИХ БЕТОНАХ

Легкие бетоны на пористых заполнителях имеют принципиальные отличия от обычного тяжелого бетона, который обусловлен характеристиками пористых заполнителей. Последние имеют меньшую плотность, чем плотная порода, гораздо меньшую прочность, имеют высокоразвитую и шероховатую поверхность. Эти качества легкого заполнителя влияют как на свойства легких бетонных смесей, так и на свойства бетона [31]. В зависимости от заполнителя (плотного или пористого), потребность в воде и содержание воды в бетонной смеси резко меняются, а основные свойства легкого бетона меняются. Одним из решающих факторов, от которых зависит прочность легкого бетона, является поток воды: по мере увеличения количества воды до оптимального возрастает прочность бетона. Оптимальный расход воды в легких бетонах соответствует самой высокой плотности смеси, уложенной в заданных условиях, и устанавливается в соответствии с наивысшей прочностью бетона или наибольшей объемной плотностью уплотненной смеси. Если количество воды превышает оптимальное для данной смеси, плотность цементного камня уменьшается, а прочность бетона уменьшается вместе с ним.

Для легкого бетона оптимальный расход воды может быть установлен в соответствии с наибольшей объемной плотностью уплотненной бетонной смеси или самой маленькой бетонной выемки. Следует также иметь в виду, что в легком бетоне, в отличие от тяжелого бетона, некоторая избыточная вода менее вредна, чем ее недостаток [3]. Оптимальное потребление воды для бетона этого состава соответствует лучшей обрабатываемости, при которой компоненты бетона наиболее компактно распределены. Стремление нанести наполнитель наиболее плотным образом объясняется тем, что самый легкий бетон данной прочности получается с минимальным потреблением связующего вещества и самым близким приближением пористых зерен заполнителя, т. е. с предельной степенью уплотнения смеси [1].

Хорошая герметизация достигается за счет вибрации с применением равномерно распределенной перегрузки на поверхности формованной массы

(виброуплотнение, вибро-штамповка). Оптимальное количество воды для приготовления легких бетонов зависит в основном от потребности в воде заполнителя и связующего, интенсивности уплотнения смеси и состава бетона. Потребность воды в совокупности, в свою очередь, зависит от состава зерна и пористости, и, как правило, чем больше, тем больше общая поверхность и открытая пористость зерен. Всасывание воды из цементной пасты с пористыми наполнителями при подготовке и укладке бетонной смеси вызывает относительно быстрое ее утолщение, что делает смесь жесткой и трудно укладываемой [2].

Это особое свойство усиливается шероховатой, развитой поверхностью пористого заполнителя. Чтобы увеличить подвижность смеси, необходимо ввести в нее больше воды, чем в обычные (тяжелые) бетоны [12]. Объемная плотность и прочность легкого бетона зависят в основном от сыпучего веса и состава зерна заполнителя, связующего вещества и расхода воды, а также от способа уплотнения легкой бетонной смеси.

По качеству пористого заполнителя можно приблизительно оценить, какая сила легкого бетона может быть получена. В строительной практике ограждающие и несущие конструкции получают из относительно плотного легкого бетона значительной прочности 50 – 150 кг/см². Уменьшение объема их веса достигается путем тщательного выбора зерновой композиции заполнителя, а также минимального расхода связующего вещества для бетона с заданной прочностью, то есть максимального заполнения объема бетона пористым заполнителем. Объем бетона, который наиболее насыщен заполнителем, может быть получен с правильным соотношением больших и малых фракций заполнителя. Для разных видов он имеет оптимальную зерновую композицию, выбранную экспериментально [3].

Оптимальное содержание мелких фракций соответствует наименьшей объемной плотности бетона и минимальному расходу цемента. Однако следует иметь в виду, что с увеличением количества мелких фракций заполнителя объемная плотность бетона увеличивается выше оптимального, а

обрабатываемость смеси ухудшается. Чтобы уменьшить объемную плотность бетона без снижения его прочности, выгодно использовать высокоактивные связующие. Согласно исследованиям Н. А. Попова и других ученых, наиболее подходящим вяжущим является активность, при котором в заданных условиях закалка в 4 – 6 раз выше, чем у разработанного бренда бетона. Особенностью легкого бетона является то, что их прочность зависит не только от качества цемента и от его количества. С увеличением потребления цемента растет не только прочность, но и насыпная плотность бетона [4]. Это связано с тем, что при увеличении количества цементной пасты легкие бетонные смеси лучше уплотняются, а содержание бетона в самом твердом и тяжелом компоненте, цементном камне также увеличивается. Теплоизоляционные свойства легкого бетона зависят от степени их пористости и порового характера, в легком бетоне тепло передается через твердую сердцевину и воздушные пространства, заполняющие поры, а также в результате конвективного движения воздуха в замкнутом объеме.

Следовательно, чем меньше объем пор, тем меньше подвижность воздуха в бетоне и лучшие теплоизоляционные свойства, которыми он обладает. Легкие бетоны из-за высокой пористости менее выносливы, чем тяжелые. Тем не менее, их морозостойкость достаточна для использования в стенах и других сооружениях зданий и сооружений. Высокая морозостойкость легкого бетона обеспечивает использование искусственных пористых заполнителей, которые имеют низкое водопоглощение, например, керамзит, а также пористость цементного камня. Повышение морозостойкости также за счет введения гидрофобизирующих добавок. Легкие бетоны на пористых заполнителях из-за универсальности их свойств применимы в различных строительных элементах зданий и сооружений [15].

Таким образом, из них изготавливаются панели для стен и потолков отапливаемых зданий, конструкции изготавливаются как с обычной арматурой, так и с предварительным напряжением (балки, балки, лестницы и платформы),

а также из армированных железобетонных конструкций мостов, фермы, плиты для проезжей части мостов.

1.1 Классификация легких бетонов

Легкий бетон называется искусственными конгломератами, полученными в результате затвердевания уплотненных смесей из цементного компонента, крупных пористых заполнителей (гравия или щебня) и пористого или плотного песка. Эти смеси называются легкими смесями перед уплотнением и затвердеванием. Таким образом, основное различие между составом легкого бетона и тяжелого бетона заключается в использовании пористых заполнителей, необходимых для снижения его средней плотности или, что то же самое, увеличения общей пористости и снижения теплопроводности [5].

Легкие бетоны – это все типы бетона со средней плотностью в сухом состоянии до 2000 кг/м³.

Для основной цели:

- конструкционные – для возведения несущих конструкций, включая конструкционную и теплоизоляцию, к которым требуются дополнительные требования к теплопроводности;
- специальные – обладают специальными свойствами (теплоизоляция, термостойкость, химическая стойкость) [16].

По типу связующего:

- цемент, известь, шлак, полимер и т. д.

По форме большого пористого наполнителя:

-керамзитовый бетон, цементный бетон, перлитовый бетон, на измельченной породе пористых пород, вермикулитовый бетон, термолитный бетон, пористый шлак, на золотистом гравии, арболит.

По структуре:

- плотный, пористый, крупнопористый, ячеистый.

Легкие бетоны на пористых заполнителях представляют собой бетоны, изготовленные из смеси связующего, воды, большого пористого заполнителя и песка (плотного или пористого)[20].

1.2 Материалы производства легкого бетона

Для изготовления легкого бетона используется портландцемент, быстротвердеющий портландцемент и шлаковый портландцемент.

В качестве наполнителей для легких бетонных, натуральных и искусственных рыхлых пористых материалов с объемной плотностью не более 1200 кг/м^3 при размере зерна до 5 мм (песок) и не более 1000 кг/м^3 при размере зерна 5 – 40 мм (щебень, гравий).

По происхождению пористые неорганические заполнители делятся на три группы: природные, искусственные (специально изготовленные) и заполнители из промышленных отходов [4].

Природные пористые заполнители изготавливаются путем дробления и сортировки легких пород (пемза, вулканический шлак и туф, пористый известняк, известняковая ракушка, известняковый туф и т. д.).

Искусственные пористые заполнители получают из промышленных отходов или путем термической обработки силикатного сырья, подвергнутого просеиванию или дроблению и просеиванию. К ним относятся:

1. Керамзит и его разновидности, шунгизит, зольный гравий, глинистый керамзит, расширенный азерат, полученный путем обжига с набуханием готовых гранул из глинистых и песчано-глинистых пород (глины, суглинки, глинистые сланцы, аргиллит, алевролит), шунгитосодержащие сланцы, трепел, зольно-шлаковая смесь или летучая зола ТЭЦ;

2. Термолит, полученный при обжиге без набухания щебня или готовых гранул кремнистых опаловых пород (диатомит, трепел, колба и т. д.);

3. Перлит расширенный, полученный путем обжига гранул из вулканических водоносных пород (перлита, обсидиана и других водосодержащих вулканических стекол);

4. Вермикулит расширенный, полученный при обжаривании полученных зерен из природных гидратированных слюд. Из отходов промышленности песок и гравий используются в основном из гранулированного или вспученного

металлургического шлака, а также крупнодисперсной зольной золы и зольных и шлаковых смесей ТЭЦ [6].

Гранулированный шлак представляет собой мелкозернистый пористый материал, полученный быстрым охлаждением расплавов металлургических шлаков.

Плуг из шлака (терморезактивный) получают в виде кусков ячеистой структуры путем набухания расплава шлака водой, воздухом или их смесью.

Существующие методы пористости делятся на две основные группы. Первые включают способы пористости расплава, проводимые в периодически действующих заполнителях, например в бассейнах; во втором - методы пористости расплава в непрерывно действующих заполнителях (например, гидрокрекинга). Фиксация пористой структуры осуществляется путем быстрого охлаждения расплава [19]. Кусочки шлаковой пемзы измельчаются и разбрасываются на щебне и песке. В зависимости от объемной плотности щебня (400 ... 800 кг/м³), прочность заполнителя составляет 0,4 ... 2,0 МПа.

Аглопорит - это искусственный пористый заполнитель с размером гранул 5 ... 20 мм, объемная плотность 400 ... 700 кг/м³ и предел прочности при растяжении 0,4 ... 1,5 МПа. Сырьем для производства аглопорита являются глинистые породы (суглинок, супесь, аргиллит, глинистые сланцы), а также промышленные отходы – отходы глины от добычи и обогащения угля, сожженные породы, топливный шлак, летучая зола и другие породоподобные силикатных пород. [17] Технология производства аглопоритного гравия из золы ТЭЦ методом спекания сырых гранул на сетках машин для альгомеризации позволяет получить искусственный пористый заполнитель в форме гранул круглой формы определенного зернового состава с застывшей поверхностной оболочкой повышенной прочности.

Гравийный и песчаный керамзит относится к специально изготовленным заполнителям – это круглый материал, который получается при производстве глины. Создание пористой структуры достигается путем набухания глинистого вещества, нагретого до пиропластического состояния, газами, выделяемыми из

него во время нагрева. Увеличенный глиняный гравий производится с прочностью 0,6 ... 6 МПа, объемная плотность 150 ... 800 кг/м³, средняя прочность 2,6 МПа [19]. Песок Keramzit получают путем дробления и просеивания расширенного глинистого гравия или щебня или как самостоятельной фракции при обжиге.

Гравий керамический полый - круглый материал - получается путем обжига специально изготовленных полых гранул глины.

Расширенный перлит выполнен в виде щебня и песка путем кратковременного сжигания вулканических водосодержащих стекловидных пород. Процесс термической обработки перлитов в зависимости от свойств сырья и типа готового продукта (щебня и песка) осуществляется одно- и двухступенчатым обжигом в коротко вращающихся печах и в состоянии взвешивания в вертикальном печи [7].

По форме и характеру поверхности пористые заполнители могут иметь круглую, относительно гладкую или угловатую и грубую (трещиноватую) поверхность. По размеру зерна они делятся на следующие фракции: песок - до 1,2 и 1,2 ... 5,0 мм, щебень или гравий – 5... 10, 10 ... 20 и 20... 40 мм. По объемной плотности в сухом состоянии (кг/м³) пористые заполнители делятся на М100 ... 1200 марок для щебня (гравия) и до М1200 для песка. Пористые заполнители, в зависимости от прочности, определяемой сжатием в цилиндре, делятся на классы.

Выбор крупного заполнителя производится на основе выбора конкретного состава с учетом формы зерен (гравия, щебня), типа и свойств мелкого заполнителя, а также структуры и типа бетона (тепло -изоляционные, структурно-теплоизолирующие, структурные).

Содержание водорастворимых соединений серы в пересчете на SO₃ в заполнителях, предназначенных для армированного легкого бетона, не должно превышать 1 мас.% [5].

В качестве добавок для легкого бетона используются тонкостенные доменные гранулированные шлаки, диатомит, трилистник, колбы, туф, пемза,

склоны. В дополнение к бетону, указанному в легких, вводятся добавки, которые являются замедлителями или ускорителями упрочнения. В качестве порообразователей для снижения плотности легких бетонов вводят алюминиевый порошок, пергидрол, тарозапониновый вспенивающий агент и другие добавки.

Для подготовки и увлажнения легкого бетона используется питьевая вода, которая соответствует тем же требованиям, что и для тяжелого бетона [33].

Защита стальной арматуры в легких бетонах. Повышенная пористость легкого бетона способствует возникновению и развитию коррозии арматуры в железобетонных изделиях. Поэтому в агрессивной среде легкий железобетон должен быть плотным. Как показывает практика, в таком бетоне содержание цемента должно быть не менее 250 кг/м^3 . Иногда арматура покрыта различными соединениями: суспензия цемент-казеин с нитритом натрия; битумная мастика с молотым песком, золой и растворителем - толуолом, битумной цементной мастикой [36].

Пористые заполнители: природные, промышленные отходы и искусственные.

Природные пористые заполнители - дробление, фракционирование скрининга измельчения пористых пород вулканического или осадочного происхождения.

Заполнители из отходов промышленности – пористые шлаки, грубодисперсные золы-уноса, золошлаковые смеси и др.

Искусственные пористые заполнители – специально изготавливают путем термической и другой обработки с последующим рассевом или дроблением и рассевом.

Керамзитовый гравий – это искусственный керамический материал ячеистой структуры с преобладанием закрытых пор.

Получают путем обжига глинистого сырья во вращающихся цилиндрических печах длиной 60 м.

Во время процесса обжига гранулированное сырье раздувается двумя факторами: смягчением глины до оптимального состояния и интенсивным газообразованием в керамическом расплаве.

Песок керамзитовый - получают путем дробления или обжаривания.

Частицы глины набухают в реакторе в подвешенном состоянии под действием горячего воздуха, вдуваемого через решетку[52].

Аглофорит – это искусственный пористый материал, полученный термической обработкой силикатных сырьевых материалов методом спекания (процесс протекания сыпучего топлива, содержащего заряд его щекочущим горением при продувании воздуха через воспламенившийся слой в течение 10-15 минут).

Шихта – глина, суглинок, суглинок, шлак, промышленные отходы. В качестве добавки используется антрацит, уголь или опилки [3].

Плуг из шлака представляет собой искусственный пористый материал, полученный путем пористости пламенно-жидкого минерального расплава во время его быстрого охлаждения. Сырьем являются шлаки цветной и горнодобывающей металлургии.

Расширенный перлит – это искусственный пористый материал, полученный набуханием при термообработке вулканических водосодержащих стекол: перлит, обсидиан и т. д. Механизм процесса набухания похож на расширенную глину [8].

1.3 Особенности ячеистых бетонов

Пенопласт и пеносиликат готовят путем смешивания предварительно приготовленной смеси с технической пеной. Пена получают энергичным взбиванием водного раствора поверхностно-активных веществ, которые снижают поверхностное натяжение воды [14]. Качество пены оценивается по множественности, прочности и стабильности во времени.

Множество пены представляет собой отношение ее объема к объему водного раствора вспенивающего агента. Чем выше множественность пены, тем больше объем ячеистой массы может быть получен из заданного

количества пенообразователя. Прочность и стабильность (стабильность) пены определяются ее способностью не осаждаться и не отделяться, по крайней мере, в начальный период схватывания бетонной массы. Стабильность пены увеличивается с введением животного клея, растворимого стекла или сульфата железа.

Для производства пены применяют клеянифольный, алюмосульфонафеновый, таросапониновой пенообразователи, а также гидролизованную кровь. В последние годы синтетические вспенивающие агенты, например сульфонол, становятся все более распространенными. Смесь бетонных пеноматериалов на цемент или известь с кремнистой добавкой обычно готовят в трех барабанных бетономешалках. В двух верхних барабанах смесителя отдельно готовят пену и раствор, которые затем смешивают в нижнем барабане. Полученную сотовую массу выливают в формы, выдерживают до получения требуемой структурной прочности и подвергают термообработке в автоклавах [9].

Структура ячеистого бетона представляет собой газонаполненный искусственный камень с развитой пористой системой. Пористость ячеистого бетона достигает очень высоких значений 70...80 % или более, что предопределяет низкую теплопроводность этого материала. Наиболее важными характеристиками ячеистого бетона являются средняя плотность и прочность [17]. Для средней плотности установлены следующие марки: для теплоизоляционного ячеистого бетона – D300 ... D500, структурная и теплоизоляция – D600 ... D900, структурная – D1000 ... D1200. Классы прочности на сжатие находятся в диапазоне B0.35 ... B 12.5.

Высушивающая усадка автоклавного ячеистого бетона марки D500 ... D1200 достигает 0,5 ... 0,7 мм/м, неавтоклавных – 3 мм/м. Это намного выше, чем у тяжелого бетона. Ячеистый бетон также обладает отличной ползучестью, обладает высокой сорбционной влажностью, паропроницаемостью и воздухопроницаемостью. Поэтому при использовании их для ограждающих

конструкций внешняя поверхность защищена более плотными слоями раствора, керамической плитки и гидрофобных покрытий.

Сотовый бетон используется для наружных стен и покрытий промышленных, гражданских и жилых зданий в виде больших панелей и небольших стеновых блоков [10].

Для производства газобетона и силиката используется химический метод набухания. В результате взаимодействия агента, аддитивно-газообразующего и связующего, происходят химические реакции с выпуском газа, расширяющейся пластиковой смеси. Наиболее распространенным из всех газогенераторов был алюминиевый порошок, который, реагируя с гидроксидом кальция, выделяет водород.

Расход алюминиевого порошка для производства 1 м³ газобетона со средней плотностью 600 ... 700 кг/м³ составляет 0,4 ... 0,5 кг. Порошковый порошок PАР-1 покрыт тонкой пленкой парафина и поэтому не смачивается водой. Для придания гидрофильным свойствам его обрабатывают водными растворами поверхностно-активных веществ. Производство продуктов из газобетона или силиката газа с использованием традиционной (формовочной) технологии заключается в следующем [61]. Исходные материалы - вяжущий, кремнистый компонент и вода – тщательно перемешивают до получения жидкой смеси, которая содержит 50 ... 60 % воды (в расчете на массу сухих компонентов). После этого к смеси добавляют водную суспензию алюминиевого порошка и снова смешивают для равномерного распределения порошка. Затем смесь выливают в металлические формы, но не на полную высоту, но таким образом, что после набухания форма заполняется доверху. Для ускорения процесса газирования и затвердевания массы после набухания температура заполняемой смеси должна составлять около 40 °С.

После установки, т. е. через 3 ... 6 часов избыточная смесь («горбушка») разрезается с натянутыми струнами или обернута, а продукты направляются на обработку теплом и влажностью, которая обычно проводится в автоклавах в насыщенной воде пара при температуре 175 ... 200 °С и давлении 0,8 ... 1,3

МПа. При повышенной температуре во влажной среде компонент кремнезема проявляет химическую активность, взаимодействуя с гидроксидом кальция, что приводит к образованию гидросиликатов кальция [47]. Это дает ячеистому бетону достаточно высокую прочность и морозостойкость.

Также можно обрабатывать ячеистый бетон (на цементе) в паровой камере при температуре 80 ... 100 °С и атмосферном давлении. Неавтоклавированные бетоны, полученные в этом случае, несколько уступают автоклавированию по прочности, трещиностойкости и морозостойкости. Технология впрыскивания ячеистого бетона имеет ряд недостатков, связанных с чрезмерно большим количеством воды, которое вводится при закрытии смеси. Полученные продукты имеют высокую влажность (25 ... 30 % вместо 15 %, стандартизованные стандартом), высокая усадка, вызывающая появление трещин. Производственный цикл производства изделий продлевается из-за медленной эволюции газа и установки смеси.

Эти недостатки в значительной степени лишены более прогрессивных вибрационных технологий. Он отличается тем, что при перемешивании в смесителе и при набухании в пресс-форме газированная бетонная масса подвергается вибрации. Под воздействием вибрационных импульсов связь между частицами ослабляется и смесь тиксотропно разбавляется. Это позволяет уменьшить сброс сбросной воды на 25 ... 30 %. Процесс выделения газа в смеси, подверженной вибрации, значительно ускоряется: набухание заканчивается через 5 ... 7 мин вместо 15 ... 20 мин с технологией впрыска. После того, как вибрация прекратилась, смесь из газобетона быстро приобретает прочность конструкции, позволяя разрезать изделие на блоки. Также сокращается продолжительность автоклавной обработки [44]. Все это способствует повышению производительности предприятий, снижению затрат и повышению качества продукции.

В нашей стране были разработаны и совершенствуются другие передовые технологические методы производства ячеистого бетона, в частности

использование холодных смесей, автоклавная обработка при низких давлениях (до 0,4 МПа) и применение крупнозернистого песка.

Сотовый бетон получают в результате затвердевания предварительно вспененной смеси связующего, компонента диоксида кремния и воды. Набухание смеси достигается путем введения в ее состав небольшого количества порообразователя. Структура, образованная во время расширения, характеризуется наличием большого количества воздушных пор-ячеек диаметром от десятых до нескольких миллиметров. Эта структура называется сотовой. Из-за высокой пористости ячеистый бетон имеет низкую теплопроводность. Это делает его эффективным материалом для ограждающих конструкций. Целесообразно, чтобы ячеистый бетон разделялся на теплоизоляционный со средней плотностью в сухом состоянии не более 500 кг/м³, конструкционно-теплоизоляционный со средней плотностью 500 ... 900 кг/м³ и конструкционный – 1000 .. 1200 кг/м³ [11].

В качестве связующего в ячеистом бетоне чаще используется портландцемент (цементный ячеистый бетон) или смесь измельченной негашеной извести кальциевой извести с кремнистым компонентом (цементным или силикатным ячеистым бетоном). Компонент кремнезема вводится в бетон в виде земляного кварцевого песка, измельченной золы от тепловых электростанций. Экспериментально установлено соотношение между кремнистым компонентом и связующим. При использовании портландцемента кремнеземный компонент и связующее обычно берут в равных частях, в силикатном ячеистом бетоне отношение компонента кремнезема к извести достигает 3 ... 4,5.

Кварцевый песок размалывают обычно мокрым способом до удельной поверхности 2000...3000 см²/г, что резко повышает его способность к химическому взаимодействию с Са(ОН)₂. Зола – унос, как правило, не нуждается в помоле, поскольку ее удельная поверхность редко бывает менее 2500 см²/г. Химический состав золы должен обеспечивать достаточное содержание активного компонента - оксида кремния; одновременно в составе

золы ограничивают содержание веществ, вызывающих химическую коррозию и неравномерность изменения объема. Поэтому в составе пылевидной золы ТЭС должно быть не менее 40 % SiO₂, а вредных примесей (оксида магния, сернистых и сернокислых соединений) не более 2...3 % по массе [42]. Вместе с тем установлен верхний предел содержания частиц несгоревшего угля (5 %).

Этот бетон получается путем затвердевания бетонной смеси, состоящей из цемента, крупного заполнителя и воды. Из-за исключения песка из состава бетона и ограниченного потребления цемента (всего 70 ... 150 кг/м³) средняя плотность крупного пористого бетона составляет 1700 ... 1900 кг/м³, как кирпичная кладка. В структуре крупнопористого бетона имеется много относительно больших пустот, образованных из-за того, что межзеренное пространство в крупном заполнителе не полностью занято связующим. Теплопроводность крупнопористого бетона составляет 0,64 ... 0,95 Вт / (м°С). Класс бетона для прочности на сжатие не более В7.5; прочность на растяжение не нормируется.

Большой пористый бетон используется только в структурах, которые воспринимают сжимающие силы. Из него возводились монолитные и сборные (блокирующие) наружные стены зданий. Чтобы избежать выброса, стены большого пористого бетона должны быть оштукатурены с обеих сторон; используется в качестве фильтрующего материала [5].

Если для производства крупнопористого бетона используются пористые заполнители (керамзитовый гравий, топливные шлаки и т. д.), Получается теплоизоляционный материал средней плотности 500 ... 700 кг/м³. Он используется в виде пластин для теплоизоляции стен и покрытий зданий.

1.4 Поризованный легкий бетон

Этот бетон получается путем образования тонких пор в цементном камне. Для этого используются добавки пенообразующих или газообразующих веществ. Из-за появления дополнительного объема пор (не менее 6%) средняя плотность и теплопроводность пористого бетона существенно снижаются.

Бетонные марки со средней плотностью D800 ... D1400, классы прочности при сжатии B2.5 ... B7.5 [19].

Легкий бетон пористой структуры (например, керамзитовый пенобетон, керамзитовый заполнитель) наиболее целесообразно использовать в конструкциях внешних ограждений - стен, покрытий, где их теплозащитные свойства наиболее эффективны.

1.5 Свойства легких бетонов

Основные свойства легкого бетона:

1. Средняя плотность - метки D200 - D2000;
2. Прочность - классы B0.35 - B40 (см. График);
3. Теплопроводность - зависит от пористости и влажности (см. График);
4. Водонепроницаемость – W0,2 – W1,2;
5. Устойчивость к агрессивным средам [14].

Деформирующие свойства легких бетонов лучше, чем у тяжелых. С той же силой предельная сжимаемость легких бетонов составляет 1,5 ... 2 мм/м, что в 1,5 ... 2 раза выше, чем для тяжелого бетона. Предполагается, что предельная растяжимость легкого бетона составляет 0,2 мм/м (против 0,1 мм/м для тяжелого бетона), его фактические значения достигают 0,3 ... 0,4 мм/м. Из-за большей ограничивающей расширяемости Легкие бетоны более устойчивы к растрескиванию по сравнению с тяжелым бетоном. В то же время следует иметь в виду, что легкий бетон имеет большую усадку и ползучесть и в этом отношении уступает тяжелым бетонам. При использовании легкого бетона во внешних ограждающих конструкциях жилых и промышленных зданий, гидротехнических сооружений, мостов и других сооружений, дополнительных требований к морозу и водонепроницаемости предъявляются к материалу. Установлены марки легкого бетона: морозостойкость F25 ... F500, водостойкость W0,2 ... W1,2 [13]. Фактическая водостойкость легкого бетона плавленной конструкции может быть еще выше. Например, по словам Г. И. Горчакова, керамзитовый бетон с расходом цемента около 350 кг/м³ не фильтрует воду даже при давлении 2 МПа [12].

Низкая теплопроводность является важным преимуществом легкого бетона перед тяжелым. В связи с этим во внешних ограждающих конструкциях из легкого бетона дополнительный теплоизоляционный слой не подходит, как это обычно делается в конструкциях из тяжелого бетона. Конструкционные легкие бетоны классов В12,5 ... В40 производятся на обычных или быстротвердеющих портландцементов, шлаке Портландцемент М400 ... М600. Заполнитель, например керамзитовый или аглопористый гравий, более прочен и плотнее со средней плотностью 600 ... 800 кг/м³. Для увеличения прочности раствора бетона в качестве мелкого заполнителя используется кварцевый песок. Средняя плотность конструкционного легкого бетона на кварцевом песке достигает 1700 ... 2000 кг/м³. При такой же прочности с тяжелым бетоном коэффициент конструктивного качества легкого бетона на 20 ... 40 % выше [37]. Следовательно, выгодно использовать его в конструкциях пролетных конструкций мостов и ферм. Снижение нагрузки из собственного веса конструкций может значительно снизить потребление стальной арматуры в легком железобетоне.

Качество легкого бетона оценивается двумя наиболее важными показателями: класс прочности и знак средней плотности. Классы конструктивного легкого бетона плотной конструкции для прочности на сжатие В2,5 ... В40, прочность для осевого растяжения – В 0,8 ... В3,2. Степень легкого бетона в соответствии со средней плотностью выражает максимальное значение этого показателя (в кг/м³). Для конструкционного легкого бетона устанавливаются классы средней плотности от D800 до D2000 с шагом 100 кг/м³ [8]. Характерно, что для структурного бетона с определенными сортами средней плотности классы прочности на сжатие нормируются в ограниченном диапазоне. Так, для классов D1000 и D1100 классы могут находиться в диапазоне В2,5 ... В 12,5.

Нормирование средней плотности и, следовательно, пористости легкого бетона обусловлено необходимостью получения определенной

теплопроводности, поскольку такой бетон используют в основном для изготовления наружных ограждающих конструкций.

Минимальный коэффициент выхода – важнейший признак, по которому быстро определяется оптимальный расход воды затворения в легком бетоне на пористых заполнителях.

Легкобетонные смеси характеризуются пониженной удобоукладываемостью как при недостатке, так и при избытке воды затворения. При расходе воды, меньшем оптимального, пластичность вяжущего теста недостаточна для сближения составляющих смеси и образования слитной структуры. Избыток воды вызывает расслоение бетонной смеси и, следовательно, неоднородность свойств бетона в различных зонах бетонируемой конструкции.

Зависимость прочности легкого бетона от основных факторов - качества цемента, пористого заполнителя и значения Ц/В–описывается такой же формулой, как и для тяжелого бетона, однако значения эмпирических коэффициентов А и В другие [48]. При оптимальном расходе воды затворения, подобранном для применяемых цемента и заполнителей, зависимость упрощается.

Прочность легкого бетона зависит от тех же факторов, что и прочность тяжелого, т. е. от качества примененных материалов и пористости цементного камня. Для определения состава легкого бетона удобно пользоваться экспериментальной зависимостью, связывающей прочность бетона с расходом воды, а не с водоцементным отношением, потому что при заданном расходе пористого заполнителя водопотребность легкобетонной смеси оказывается примерно постоянной величиной, мало зависящей от расхода цемента. Это связано с тем, что водопотребность пористого заполнителя существенно выше водопотребности цемента.

При определении оптимального количества воды затворения используют установленную Н. А. Поповым зависимость прочности легкого бетона и коэффициента выхода от расхода воды.

Из легких бетонов изготавливают разнообразные конструкции. Из конструкционно – теплоизоляционного бетона делают панели и блоки стен зданий, плиты совмещенных кровель и другие конструкции. Стеновые панели выпускают с наружными (фасадными) поверхностями, не требующими дополнительной отделки в построечных условиях. Отделку панелей плитками, декоративным бетоном, окраской производят непосредственно на заводе [39]. Из конструкционного легкого бетона изготавливают несущие конструкции: плиты перекрытий и покрытий, другие элементы жилых и общественных зданий.

Используют легкобетонные конструкции и изделия в различных областях строительства: для мостовых конструкций в транспортном строительстве, в элеваторостроении и элементах животноводческих помещений, для дренажных труб в водохозяйственном строительстве, для ряда конструкций промышленных зданий.

1.6 Технология производства легкого бетона

Существуют три основных метода изготовления легкого бетона. В первом обычный заполнитель с удельным весом около 2,6 заменяют пористым легким заполнителем с малым удельным весом. Полученный таким образом бетон обычно называют по виду применяемого легкого заполнителя.

Второй метод получения легкого бетона заключается в создании больших пор в бетоне или растворе. Эти поры следует отличать от мелких пор, образованных в результате воздухововлечения. Такой вид бетона известен как газобетон, ячеистый бетон или пенобетон [18].

По третьему методу мелкий заполнитель исключают из смеси, что способствует образованию большого количества промежуточных пор. При этом применяют обычный крупный заполнитель. Этот бетон обычно называют беспесчаным (крупнопористым). Таким образом, уменьшение объемной массы происходит во всех случаях вследствие наличия пор в заполнителе, цементном растворе или в промежутках между частицами заполнителя. Очевидно, что

наличие этих пор снижает прочность легкого бетона по сравнению с обычным, в ряде случаев высокая прочность не нужна [12].

Легкий бетон является хорошим теплоизоляционным материалом, обладает достаточной долговечностью, не стоек к истиранию. В целом легкий бетон стоит дороже, чем обычный. Приготовление бетонной смеси, ее транспортировка и укладка требуют значительно больше заботы и внимания, чем обычная бетонная смесь. Однако во многих случаях преимущества легкого бетона превосходят его недостатки и во всем мире сейчас заметна тенденция к более широкому применению легких бетонов, а также к применению их в новых областях.

Недостатком полученного легкого бетона является то, что использование воздухововлекающих добавок приводит к образованию развитой открытопористой структуры материала и, как следствие, получаемый пенобетон имеет низкую прочность и высокое водопоглощение - использование этого материала для наружных работ требует защиты от атмосферного воздействия.

Сегодня перед строительной отраслью стоит важная задача – уменьшать массу строительных материалов и снижать материалоемкость строительства, не занижая несущие способности и другие эксплуатационные свойства возводимых объектов. Решение этой задачи позволит повысить эффективность отрасли, в том числе и в вопросах экономии финансов.

Снижение материалоемкости и массы строительных материалов особенно актуально при высотном строительстве, поскольку именно высотное строительство приводит к высокой нагрузке нижних этажей, «удерживающих» верхние [16].

Один из способов решить важную строительную задачу – разработка и применение новых материалов – высокопрочных легких бетонов, в которых выше относительный показатель прочности на единицу плотности по сравнению с другими, ставшими уже традиционными легкими бетонами.

Высокопрочность бетона напрямую связана с объемной массой материала. Если под термином «высокопрочные» понимать такие бетоны, в которых прочность материала выше границ нормы, тогда термин должен быть объясним некой «базовой» объемной массой в сухом состоянии.

На западе высокопрочные легкие бетоны получили самое обширное применение. К примеру, одна только Норвегия с 1989 по 1997 годы использовала около 200 тысяч м³ легких бетонов, имеющих класс от LC45/50 до LC60/66. Из высокопрочных легких бетонов возводят даже уникальные объекты, так при возведении Нью-Йоркского международного аэропорта использовался железобетон на керамзитобетоне. Четыре секции 90x60 м возведены с использованием данного материала – керамзитобетона прочностью 410 кгс/см² и плотностью 1850 кг/м³[45].

А в Иллинойском университете применение легкого бетона вместо тяжелого на куполе зала собраний снизило вес всего здания на 6800 тонн.

Легкие бетоны активно применяются при возведении высотных зданий не только в США, и в Англии, Австралии, Японии, Голландии. В частности, в Хьюстоне легкобетонные конструкции предварительно напряженные позволили построить здание, высотой 220 м, в Сиднее – 180 м, в Лондоне – 142 м и т.д. [17].

По оценкам экспертов, при использовании легкого бетона себестоимость строительства снижается в 1,5 – 2,5 раза по сравнению с тем, если бы использовался обычный тяжелый бетон того же класса прочности, что и легкий бетон. Сегодня стационарные бетононасосы, оборудование бетонных работ пользуется повышенным спросом во всем мире, поскольку легкие бетоны становятся все более популярны и востребованы. Стоит также учитывать, что отдельные архитектурные задумки невозможно реализовать, применяя обычный тяжелый бетон, для этого подходит только высокопрочный легкий бетон. Проиллюстрировать эту мысль можно, если вспомнить находящееся в Дюссельдорфе здание главного офиса пристани. Именно высокопрочные легкие бетоны позволили на территории старинного порта реки Рейн в зоне

причала возвести здание, объемом 35 тысяч м³. При этом в здании два подвальных этажа и пять наземных.

Интересен с точки зрения архитектурного исполнения криволинейный висячий фасад, находящийся на южном фронте данного офиса. Его создает монолитная железобетонная конструкция, длина которой 52 м, высота – чуть более 16 м, а толщина и вовсе всего 0,375 м. Искривление фасада составляет 45 м. Данный фасад с одной стороны монолитно соединен с несущей системой здания на всей его высоте, а с другой стороны – с плитами балконов на четырех верхних этажах.

Высокопрочный бетон имеет заполнитель класса LC 35/45, удельный вес которого – 1,35 кг/дм³. Он позволил уменьшить вес криволинейного висячего фасада на 40%. За счет этого сократилась вертикальная нагрузка на балконы.

Прочность на сжатие в легких бетонах зависит от плотности, прочности и жесткости строительного раствора. Однако прочность самой цементной матрицы и дробимость заполнителей у высокопрочных легких бетонов должны быть если не идентичные, то близкие. Представлены возможности влияния на такие показатели, как прочность при сжатии и объемная масса материала.

К преимуществам высокопрочного легкого бетона можно отнести следующее:

– Высокая продолжительная прочность, которая не меняется при суровых климатических условиях.

– Высокий уровень сцепления цементного камня и легких заполнителей. Возникновение пуццоланических реакций между цементным клеем и алюмосиликатными легкими обожжёнными заполнителями. Это обеспечивает большую долговечность эксплуатации материала.

– Низкая влагоотдача высокопрочных легких бетонов приводит к тому, что внутри самого материала происходит процесс, получивший название «внутренний уход» [13].

Микрокремнезем как добавка содержится во многих высокопрочных легких бетонах. Его содержание доходит от 10% от массы цемента. Это

позволяет защитить арматуру от коррозии. При этом использование микрокремнезема позволяет бетонной смеси оставаться удобообрабатываемой, а однородность материала сохраняется на высоком уровне.

Высокопрочные конструкционные бетоны должны отвечать тем же требованиям, которые предъявляются и к тяжелым бетонам. Помимо прочности на сжатие высокопрочные легкие бетоны должны обладать и одинаковой объемной массой.

Высушивание легкого бетона напрямую зависит от плотности растворной массы – чем она плотнее, тем, соответственно, медленнее сохнет материал.

Определить расчетную объемную массу высокопрочного легкого бетона (срок изготовления материала – 28 суток) можно, увеличив объемную массу взятого в сухом состоянии бетона на 0,2 кг/дм³. Эти расчеты позволят учесть остаточную влажность конечного продукта – высокопрочного легкого бетона.

Чтобы рассчитать обычное армирование необходимо расчетную объемную массу повысить на 0,1 кг/дм³, если другое не прописано в нормативных документах. В возведенных из высокопрочных легких бетонов зданиях и сооружениях коэффициент сухой объемной массы может колебаться в диапазоне не более 1–2%.

Теплопроводность легкого бетона более низкая по сравнению с теплопроводностью традиционного тяжелого бетона. В легком бетоне теплопроводность ниже в среднем на 30%. Соответственно при почти идентичном составе легкого и тяжелого бетона теплопроводность первого при гидратации нужно рассчитывать с учетом температуры массива выше на 10–20 градусов по сравнению с тяжелым бетоном. Причем чем меньше объемная масса материала, тем ниже теплопроводность материала. Бывали случаи, при которых во время бетонирования конструкций из легкого высокопрочного бетона достигалась температура 90 градусов (при этом толщина конструктивных элементов составляла 40 см, а расход цемента – не более 400 кг/м³).

Но стоит учитывать, что изменение в сторону уменьшения долговременной прочности тяжелого бетона на сжатие при таких температурах (имеется в виду нарушение целостности структуры за счет замедленного образования этtringита) у легких бетонов не наблюдается (эффективное отношение водоцементное выглядит следующим образом: $V/C= 0,35$, при этом микрокремнезем в конечном продукте составляет не более 5% от массы цемента).

Если же для иллюстрации изложенной информации вспомнить о вышеописанных норвежских проектах возведения мостов с использованием легких высокопрочных бетонов, то ограничение максимально допустимой температуры бетона (65 градусов) достигалось благодаря технологическим, организационным и конструктивным мероприятиям.

Модуль упругости в легких высокопрочных бетонах зависит от объемной массы материала и в значительно меньшей степени от прочности при сжатии. В традиционных же тяжелых бетонах модуль упругости напротив больше зависит именно от прочности на сжатие. В легком бетоне марки DIN 4219 имеется зависимость модуля упругости непосредственно от объемной массы. При этом установленные в этом случае зависимости модуля упругости от массы объемной на 25 % недооценивают реально существующее значение легких высокопрочных бетонов.

1.7 Выводы по литературному обзору

В условиях сухого и жаркого климата можно получить качественный бетон, используя набор конструктивных технологических мер, направленных на обеспечение гидратации цемента. Выявлено, что легкий бетон отличается от тяжелого бетона конструкцией, свойствами, технологией. Установлено, что легкие бетоны подразделяются на легкие и ячеистые структуры.

Большое внимание следует уделить выбору материалов. Для бетона, уложенного в жарких и сухих условиях, следует использовать быстротвердеющий, не усаживаемый портландцемент, который плохо дает воду и уменьшает усадку. Обычный портландцемент рекомендуется

использовать с добавлением хлорида кальция. Шлак Портландцемент и пуццолановый портландцемент не должны использоваться в этих условиях, и запрещается использовать безвинтовые связующие (например, известковый шлак или цемент из известково-золяного).

Перед приготовлением бетонной смеси наполнители должны быть защищены от солнечного излучения. Пористый щебень (гравий) рекомендуется увлажнять. При укладке бетона, заполнитель рекомендуется охлаждать, добавляя к ним измельченный лед.

Следует также учитывать, что бетоны на мелкозернистых песках имеют большую усадку и более пористые. Поэтому для критических структур рекомендуется использовать мелкие пески для обогащения более крупными фракциями песка или щебня.

Композиции бетонов для районов с сухим и жарким климатом выбираются обычными методами.

Цель: исследовать использование легкого бетона для строительства в жарком климате.

Задания:

- проанализировать результаты исследований по подвижности бетонных смесей с различными органическими и минеральными добавками в сухом жарком климате;
- исследовать влияние этих добавок на прочность бетона, отвержденного в таких условиях;
- изучить особенности использования легкого бетона в жарком климате;
- исследовать проблемы, возникающие при производстве легкого бетона в жарком климате;
- дать рекомендации по сокращению деструктивных процессов в бетоне в ранних сроках упрочнения и экономии цемента при производстве работ в регионах с сухим жарким климатом.

2 ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ В УСЛОВИЯХ ЖАРКОГО КЛИМАТА

Сухие жаркие климатические условия характеризуются летней температурой наружного воздуха 35 ... 40 °С при относительной влажности 10 ... 25%, интенсивной солнечной радиации и частых ветрах. Сочетание этих климатических факторов приводит к быстрому обезвоживанию (сушке) бетона, что замедляет и даже останавливает гидратацию цемента [64]. При быстрой сушке бетона его прочность снижается почти на 50 % по сравнению с упрочнением бетона при нормальных условиях температуры и влажности. Интенсивное раннее обезвоживание приводит к образованию капилляров, направленных на испаряющуюся поверхность, что ухудшает пористую структуру бетона и, следовательно, снижает его прочность. Обезвоживание также приводит к отслаиванию наружных слоев бетонной конструкции.

Необходимое качество бетона в условиях сухого жаркого климата может быть обеспечено с использованием таких методов подготовки, транспортировки и ухода за бетоном, которые позволили бы свести его возможное обезвоживание до минимума [41].

При приготовлении бетонной смеси необходимо применять меры, обеспечивающие сохранение требуемой консистенции при монтаже в опалубке. Это может быть достигнуто путем снижения температуры смеси во время ее приготовления и принятия мер, которые исключают обезвоживание при транспортировке, укладке и удержании бетона.

Было обнаружено, что при температуре воздуха до 40 °С и низкой относительной влажности температура бетонной смеси может быть уменьшена до 20 ... 25 °С путем смачивания заполнителя охлажденной водой и продувки их холодным воздухом подаются в смеситель. Такими же целями могут быть добавление до 50 % льда в массу воды [5].

Сохранение консистенции бетонной смеси может быть достигнуто путем введения поверхностно–активных веществ в бетонную смесь во время ее

приготовления. Они не только уменьшают обезвоживание смеси, также пластифицируют ее, уменьшая потребность в воде.

Продолжительность смешивания бетонной смеси в условиях сухого и жаркого климата увеличивается на 30 – 50 %. В то же время наполнитель загружается в бетоносмеситель, а также 2/3 от рассчитанного количества воды и перемешивается в течение 1–2 минут. Затем добавьте цемент, оставшуюся часть воды, добавьте добавки и снова помешайте в течение 3 – 4 минут [8].

Готовая смесь бетона перемещается в закрытом контейнере. Для этих целей наиболее подходящие смесители для грузовиков и автобетоносмесители. Необходимо избегать транспортировки междугородних смесей, поскольку во время транспортировки он обезвоживает и теряет определенные свойства.

Перед укладкой бетонной смеси опалубка увлажняется. Полученная поверхность из влагопоглощающих материалов должна быть покрыта специальными соединениями или полимерными пленками, которые предотвращают адгезию к бетону, а также поглощение воды из него.

Для подачи и распределения бетонной смеси существуют методы, которые устраняют ее множественную перегрузку или быстрое обезвоживание. Например, не рекомендуется подавать смесь с открытых конвейеров, а также на длинные поддоны и вибрирующие лотки. Наиболее подходящим является подача смеси бетононасосами или в больших ваннах с помощью кранов [73]. Свободное падение смеси не должно превышать 1,5 – 2 м. Бетонирование предпочтительно следует продолжать непрерывно. В случае перерывов особое внимание следует уделять качеству подготовки рабочих швов. Тщательное вибрационное уплотнение смеси должно обеспечивать плотную структуру бетона и уменьшать испарение воды.

Особое внимание следует уделять уходу за бетоном, для которого открытые поверхности свежеложенного бетона покрыты мешковиной, матами, брезентом, а после регулярной укладки бетона их систематически увлажняют каждые 3 – 4 часа. В отличие от увлажнения бетона в средней зоне в жарком и сухом климате, его часто поливают, а продолжительность орошения

увеличивается до 28 дней. Бетонные поверхности также покрыты песком с последующим систематическим увлажнением [19]. Если позволяют условия, бетон наливается водой через 6 – 12 часов после укладки.

При нехватке воды увлажнение бетона связано со значительными затратами, поэтому целесообразно использовать так называемые безвредные методы бетонирования. К ним относятся бетон под специальными воздухо непроницаемыми пленками или покрытие бетонных поверхностей различными соединениями.

Малые конструкции сразу после бетонирования покрыты светлыми капюшонами, каркас которых выполнен из стальных труб или стержней диаметром 16 – 20 мм, а покрытие выполнено из ПВХ–пленки толщиной не менее 0,2 мм. Коэффициент заполнения камеры (отношение объема бетонной конструкции к объему камеры) должен составлять 0,70 ... 0,85. При обеспечении герметичности в камере создаются условия, близкие к режиму медленного испарения. Обезвоживание бетона может быть сведено к минимуму и за счет сокращения времени, необходимого путем интенсификации процесса затвердевания [65]. Для этого используются высокоактивные цементы с низкой усадкой, химические добавки – ускорители упрочнения и методы термообработки. Метод термообработки может оказаться наиболее эффективным, поскольку он позволяет не только снизить риск обезвоживания, и получить необходимую прочность бетона в кратчайшие сроки. Следует иметь в виду, что после приобретения 70 ... 80 % расчетной прочности бетона, он не требует особого ухода в сухом и жарком климате.

2.1 Сырье для производства легких бетонов в условиях жаркого климата

Для изготовления легкого бетона используется портландцемент, быстротвердеющий портландцемент и шлаковый портландцемент.

По происхождению пористые неорганические наполнители делятся на три группы: природные, искусственные (специально изготовленные) и наполнители из промышленных отходов.

Природные пористые наполнители получают путем дробления и сортировки легких пород (пемза, вулканический шлак и туф, пористый известняк, известняковая скала, известняковый туф и т.д.).

Искусственные пористые наполнители получают из промышленных отходов или путем термообработки силикатного сырья, подвергнутого просеиванию или дроблению и просеиванию [24]. Они включают: а) керамзит и его разновидности, шунгизит, зольный гравий, глину с расширенной глиной, вспененный азерит, полученный путем обжаривания с набуханием готовых гранул из глинистых и песчано-глинистых пород (глины, суглинки, глинистые сланцы, алевролиты), шунгитсодержащие сланцы, измельчение, зольно-шлаковая смесь или летучая зола; б) термолит, полученный при обжиге без набухания щебня или полученных гранул кремнистых опаловых пород (диатомит, трепел, луковица и т.д.); в) расширенный перлит, полученный путем сжигания гранул из вулканических водоносных горизонтов (перлит, обсидиан и другие водосодержащие вулканические стекла); г) расширился вермикулит, полученный путем обжига готовых зерен из природных гидратированных слюд. Из промышленных отходов песок и гравий в основном используются из гранулированного или вспученного металлургического шлака, а также крупнозернистой зольной золы и зольных и шлаковых смесей ТЭЦ.

Гранулированный шлак представляет собой мелкозернистый пористый материал, полученный быстрым охлаждением расплавов металлургических шлаков.

Агрополит – это искусственный пористый наполнитель с размером гранул 5 ... 20 мм, объемная плотность 400 ... 700 кг/м³ и предел прочности при растяжении 0,4 ... 1,5 МПа. Сырьем для производства аглопорита являются глинистые породы (суглинок, супесь, аргиллит, глинистый сланцы), а также отходы промышленных отходов – глины от добычи и переработки угля,

сжигаемые породы, топливный шлак, летучая зола и другие камнеподобные силикатных пород. Технология производства гравия из золы ТЭЦ методом спекания необработанных гранул на сетках машин для альгомеризации позволяет получить искусственный пористый наполнитель в виде гранул круглой формы определенного зернового состава с замороженной поверхностной оболочкой повышенной прочности.

Гравий и вспененный глиняный песок относятся к материалу, который получается при производстве глины. Создание пористой структуры достигается путем набухания глинистого вещества, нагретого до пиропластического состояния, из газов, выделяемых из него при нагревании. Глинистый гравий изготавливается с прочностью 0,6 ... 6 МПа, объемная плотность 150 ... 800, средняя прочность 2,6 МПа. Глинистый песок получается путем дробления и просеивания глинистого гравия или щебня или как самостоятельной фракции при обжиге.

Гравий керамический полый – круглый материал – получается путем обжига специально изготовленных полых гранул глины.

Перлит выполнен в виде щебня и песка путем кратковременного сжигания вулканических водосодержащих стекловидных пород. Процесс термической обработки перлита, в зависимости от свойств сырья и типа готового продукта (щебня и песка), осуществляется одно– и двухступенчатым обжигом в вращающихся печах и подвешен в вертикальная печь.

По форме и характеру поверхности пористые наполнители могут относительно гладкую или угловатую и грубую (трещиноватую) поверхность. По размеру зерна они делятся на следующие фракции: песок – до 1,2 и 1,2 ... 5,0 мм, щебень или гравий – 5 ... 10, 10 ... 20 и 20. .. 40 мм. По объемной плотности в сухом состоянии пористые наполнители делятся на М 100 ... 1200 марок для щебня (гравия) и до М1200 для песка.

Выбор крупного наполнителя основан на выборе конкретного состава с учетом формы зерен (гравия, щебня), типа и свойств мелкого заполнителя, а

также структуры и типа бетона (тепло– изолирующий, структурно– теплоизоляционный, структурный).

Содержание водорастворимых соединений серы, предназначенных для армированного легкого бетона, не должно превышать 1 масс.% [19].

В качестве добавок для легкого бетона используются тонкостенные гранулированные шлаковые доменные шлаки, диатомит, туфы, пемза и склоны. В качестве добавок для снижения плотности легких бетонов вводят алюминиевый порошок, пергидрол, порошок тарозапонины и другие добавки.

Для подготовки и увлажнения легкого бетона используется питьевая вода, соответствующая тем же требованиям, что и для тяжелого бетона.

Защита стальной арматуры в легких бетонах. Повышенная пористость легкого бетона способствует возникновению и развитию коррозии арматуры в железобетонных изделиях [73]. Иногда арматура покрыта различными соединениями: цементно-казеиновая суспензия с нитритом натрия; Битумная мастика с песком, золой и растворителем – толуолом, цементом битумного цемента.

Среди особенно ярких новинок выделяются пенобетон и газосиликатные блоки. Они относятся к классу легких бетонов и характеризуются хорошим уровнем выносливости, отличной теплоизоляцией и низкой массой.

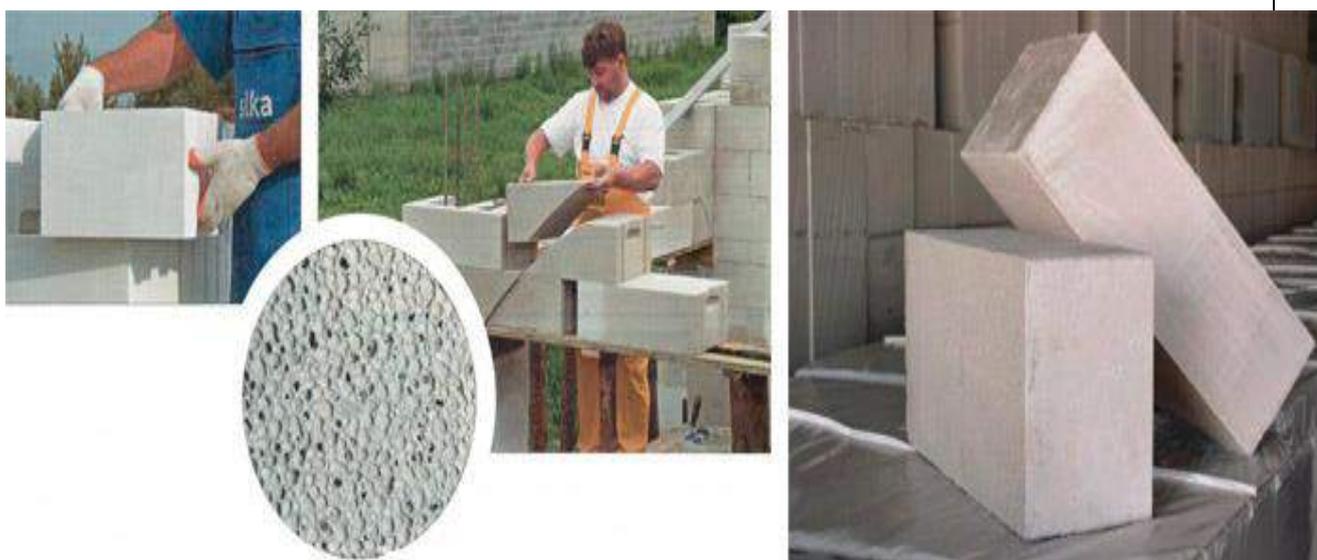


Рисунок 2.1 – Газосиликатный и пенобетонный блоки

Пеноблоки представляют собой смесь песка, цемента, воды и пенообразующих (натуральных или синтетических) компонентов. Пенобетон не может быть на 100% назван экологически чистым из-за содержания технического гидроксида натрия (как часть пенообразователя) [69]. Блоки из пенобетона – довольно простой и недорогой процесс. В связи с этим они часто выпускаются в небольших мастерских, что отрицательно сказывается на качестве.

Преимущества пеноблоков:

– Прочность. Уровень зависит от массы и типа вспенивающих добавок.

Пенобетон становится прочнее с каждым годом эксплуатации:

– Относительно низкий вес (20–23 кг) позволяет снизить давление на фундамент и транспортные расходы.

– Низкая теплопроводность. Блок пены содержит воздушные поры, которые предотвращают потерю тепла через стены.

– Хорошая звукоизоляция. 30–сантиметровая стенка пенных блоков способна поглощать шум до 60 дБ.

– Пожарная безопасность. Пенный бетон не воспламеняется и не выделяет токсичные вещества при нагревании.

– Размер пенных блоков позволяет несколько раз увеличить производительность труда (по сравнению с кирпичной кладкой).

– Устойчивость к влаге.

– Простота обработки. Доступная цена. Например, 1 м³ пенных блоков стоит около 2500 рублей, а столько же кирпичей – от 3500 до 6500.

– Пенный бетон легко сочетается с другими материалами.

Недостатки:

– Отклонения от геометрических параметров.

– Различные размеры пор. Воздушные добавки предотвращают однородность пенных блоков, поэтому они могут иметь разную плотность.

– Вероятность усадки (на 2–4 мм в течение 2 месяцев) и недостаточная прочность пенобетона для изгиба.

– Неожиданное появление.

Силикат газа является строительным материалом последнего поколения, которое также относится к классу ячеистого бетона. Он включает в себя несколько компонентов: кварцевый песок; Смесь связующих (негашеная известь и портландцемент); Сульфонал С (вспенивающий агент); Газовый генератор из алюминиевого порошка; воды.



Рисунок 2.2 – Виды и структура легких бетонов

2.2 Особенности применения легких бетонов в условиях жаркого климата

В условиях сухого и жаркого климата усиливается прогресс физических и химических процессов в упрочняющем бетоне, особенно в начальный период его формирования. В это время формируются основные физико–механические свойства бетона, определяющие качество и долговечность монолитных структур.

При производстве бетонных работ при температуре воздуха выше 25°C за 13 часов и относительной влажности менее 50 % наблюдается увеличение потребности в воде бетонной смеси с повышением ее температуры, быстрой потерей смеси подвижности во время ее транспортировки или при стоянии перед укладкой, интенсивное обезвоживание уложенного бетона,

первоначальная усадка бетона, образование неравномерного температурного поля в структурах под действием солнечной радиации.

В 28–дневный период прочность на сжатие бетона без технического обслуживания составляет менее 50 % R28, а глубина проникновения деструктивных процессов достигает 30 см. Технологическое действие, которое в значительной степени предотвращает развитие разрушительных процессов в бетоне, – это забота о нем.

Бетоны должны быть приготовлены на быстротвердеющих цементах. Для приготовления бетонной смеси не рекомендуется использовать глиноземные и пуццолановые цементы, шлаковые портландцементы ниже М400. Для поддержания вязкости бетонной смеси в нее вводятся водоудерживающие и пластифицирующие добавки.

При транспортировке бетонной смеси кузовов автомобилей накрывайте брезентом. При транспортировке смеси на большие расстояния ее соотношение вода–цемент увеличивается, чтобы обеспечить требуемую жесткость, необходимые для конструкции во время установки.

В некоторых случаях используются различные пленкообразующие композиции, которые покрывают поверхности, которые не предназначены для последующего контакта с бетоном и раствором. Для интенсификации упрочнения бетона используются методы термической обработки, используемые в зимних условиях.

Уход за свежим бетоном обычно делится на два периода. Первоначальный уход (через 1–3 часа после установки бетона) заключается в защите бетона от прямого воздействия солнечного воздействия и воздействия ветра, который обеспечивается путем тщательного покрытия его влагонепроницаемым (полиэтиленовая пленка, брезент) или влагопоглощающих (мешковатых) материалов, поддерживаемых во влажном состоянии. В начальный период прямого контакта с твердым бетоном с водой не допускается. Последующий уход после окончания начального периода

должен обеспечить благоприятные условия для упрочнения бетона следующими способами:

- выдерживать открытые горизонтальные бетонные поверхности под слоем воды (метод покрытия водоемов);
- непрерывно распылять влагу на поверхности конструкций;
- Защитные пленки используются из пленкообразующих композиций (битумные эмульсии, лак–этанол и т.д.);
- использовать полимерные пленки.

Легкий бетон широко используется для изготовления несущих, изоляционных и ограждающих конструкций. Эти материалы характеризуются высокой пористостью – до 40 % и низкой плотностью – до 1800. Использование легкого бетона вместо кирпича и тяжелого бетона облегчает сборку строительных элементов, что снижает нагрузку на фундамент и снижает транспортные расходы.

Для производства высокопрочных легких бетонов используются более высокие марки цемента, более прочные легкие наполнители, плотные пески. Прочность легкого бетона зависит от того же фактора, что и тяжелый бетон. Представляет собой обычный или быстротвердеющий портландцемент, шлаковые портландцементы, цемент–известь и т.д. Использование легкого бетона по сравнению с тяжелым и кирпичным позволяет улучшить тепловые и акустические характеристики, значительно снизить вес зданий, уменьшить нагрузки на фундамент, снижения пропускной способности транспортных и монтажных кранов, а также для решения проблем строительства в сейсмически опасных зонах. При использовании легких бетонных конструкций затраты сокращаются, затраты на рабочую силу на строительных площадках сокращаются. Кроме того, уменьшение веса конструктивных элементов зданий позволяет нам решать сложные архитектурные проблемы и расширяет область применения легкого бетона в качестве конструкционного материала.

В гражданском строительстве 9–16–этажные дома в более чем 30 крупных городах России, Украине, Казахстане, Узбекистане, Таджикистане,

Туркменистане и Латвии были построены в скользящей или объемной опалубке; способ подъема монолитных потолков из легкого бетона, возведенных зданий в Армении, Узбекистане и Таджикистане. Используются главным образом керамзит, шлак–пемза, бетон на природных пористых заполнителях классов для прочности на сжатие В3, 5–В25 (класс М50–М300) [1]. Монолитный легкий бетон наиболее широко используется и в настоящее время используется в США, Австралии, Японии, Германии, Австрии, Венгрии, Румынии и других европейских странах. Особенно эффективный монолитный легкий бетон используется при строительстве высотных зданий (например, AustralianSquare в Сиднее, PicassoTower в Мадриде, LikePointTower в Чикаго, 218, 222 и 310 м в Хьюстоне, TokyoCityHall в Японии). Монолитные потолки из легких бетонов прочности на сжатие классы В15–В30 рекомендуются МГСН 4.19–05 для использования в строящихся многоэтажных зданиях в России [5].

Оценивая эффективность использования монолитного бетона в вышеуказанных странах, бетон в зданиях, особенно в высотных зданиях. В дополнение к эффекту уменьшения их веса на 20 – 30 % соответствующее снижение нагрузки на фундамент и возможное значительное сокращение потребления арматуры и стоимости строительных фундаментов имеют большое значение для фирм, которые производят и транспортируют легкие смеси, имеют коэффициент снижения массы 20 – 50 %. Исследования, проведенные во многих странах, легких бетонных конструкций в огнестойкости не только по сравнению с металлическими конструкциями, и по сравнению с аналогичными структурами из тяжелого бетона.

Был разработан и успешно протестирован в практике современных строительных и конструкционных легких бетонов со структурой, модифицированной комплексом различных химических и минеральных добавок. В связи с вышеизложенным представляется многообещающей следующая структурно–технологическая система энергоэффективного здания: опорная рама изготовлена из монолитного или сборного монолита из высокопрочного легкого бетона до В50, а внешние стены из легкого бетона, в

основном на композитных связующих (монолитных в стационарной опалубке или в виде кирпичная кладка из блоков и усиленных мостов).

Последнее способствует либо уменьшению расчетной толщины наружной стенки от 10 до 20 %, либо, если толщина сохраняется, чтобы уменьшить потребление энергии для обогрева здания, то есть увеличить его энергоэффективность. Уменьшение той же массы здания может снизить на 10–15 % потребление арматуры и бетона в несущих конструкциях [4].

Расчеты показывают, что при проектировании здания высокопрочного легкого бетона с плотностью 1400 увеличение количества этажей и общей полезной площади здания увеличивается. Кроме того, лучшие тепловые свойства позволяют экономить на теплоизоляционных работах. Высокопрочный легкий бетон с коэффициентом теплопроводности почти в 2 раза меньше, чем у тяжелого бетона, что снижает стоимость изоляции на 94 %. Наибольший экономический эффект в этом случае достигается при использовании в устройстве как перекрывающихся, так и закрывающих панелей.

Легкий бетон имеет четкую перспективу для использования в современных конструкционных системах зданий и инженерных сооружений.

Разработан метод ускорения упрочнения бетона, основанный на использовании солнечной энергии и нанесении защитных покрытий, из полимерных пленок, что позволяет экономить топливно–энергетические ресурсы при производстве бетонных работ и сокращать время возведение монолитных конструкций и конструкций.

Он основан на том, что оптические свойства полимерных пленок влияют на температурный режим и, как следствие, рост прочности бетона в начальный период его затвердевания. На стадии бетонного нагрева в первый день, когда он удерживается в пленках с коэффициентом пропускания 55–89%, градиенты температуры достигают 1,9 – 2,1 град/см, скорость повышения температуры составляет 12 – 15 град/час. На второй и третий дни основные параметры температурного режима в упрочняющем бетоне уменьшаются в 2 раза.

Под воздействием солнечного излучения и высокой температуры воздуха интенсивный набор прочности в упрочняющем бетоне возникает, когда он удерживается под пленками в течение первых 1 – 3 дней.

В то же время продолжительность набора критической прочности к влаге колеблется от 1 до 4 дней. Монолитные конструкции могут быть нагружены проектными нагрузками.

Для устройства покрытия целесообразно использовать пленки из полиэтилена (ГОСТ 10354–73) и поливинилхлорида (ГОСТ 16272–70) толщиной 100 – 200 мкм, полиэтилентерефталат (ТУ 6–05–1597–72) до 50 мкм.

Чтобы уменьшить тепловые напряжения или сохранить тепло в бетоне, эффективно использовать металлизированные пленки в виде независимого покрытия или в виде экрана в многослойных покрытиях с различными гидрофильными материалами.

Покрытия из полимерных пленок могут использоваться рационально для возведения монолитных конструкций различного назначения (протяженных, столбчатых и т. д.), а также для производства сборных бетонных и железобетонных изделий в условиях открытых цехов и свалок.

При выборе средств транспортировки, укладки и уплотнения легких бетонов необходимо учитывать особенности бетонных смесей на пористых заполнителях:

- низкая объемная масса (в основном до 1800 кг/м³);
- разница в объемных массах пористых заполнителей, раствора, цементной пасты и склонности смеси по этой причине к расслаиванию при транспортировке, упаковке и уплотнении;
- всасывание с пористым заполнителем смеси воды из части раствора, быстрое сгущение смеси и последующее изменение ее подвижности;
- высокое содержание воды в смеси;
- абразивность ряда пористых заполнителей и, как следствие, увеличение коэффициента трения бетонной смеси.

Легкие бетонные смеси подвержены расслоению: легкий наполнитель легче, чем компонент раствора, в котором он подвешен, и, следовательно, плавает.

Увеличение количества монолитного легкого бетона в строительстве требует радикального улучшения самого трудоемкого процесса бетонных работ – укладки бетонной смеси. Использование современных бетононасосных установок с разбрасывающими стрелами позволяет механизировать рабочие операции по укладке бетона в конструкцию, а также увеличить скорость и качество бетонирования. Однако в настоящее время бетонные насосы используются в основном для подачи бетонных смесей на плотные наполнители.

Существующий уровень развития транспортной технологии через трубы из легких бетонных смесей не обеспечивает стабильного режима откачки их бетононасосами, что сдерживает распространение этого прогрессивного метода производства бетонных работ в строительстве.

В настоящее время исследования, направленные на облегчение обработки легких бетонов, находятся на стадии поиска и развиваются по трем основным направлениям:

– компенсация водопоглощающей способности пористых заполнителей за счет введения в бетонную смесь дополнительных количеств воды и цемента или тонкоизмельченных добавок;

– снижение водопоглощающей способности пористых заполнителей за счет их предварительной водонасыщенности;

– использование специальных добавок, которые повышают подвижность легких бетонных смесей и уменьшают устойчивость к их перемещению через трубы.

Как показали проведенные исследования, наибольший эффект снижения водопоглощающей способности пористых заполнителей дает их предварительная водонасыщенность. В зависимости от структурных особенностей различных типов пористых материалов их водонасыщенность

может быть проведена тремя основными способами: путем увлажнения при перемешивании водой, вымачивания при атмосферном давлении и насыщения водой в вакуумной установке.

Из таблицы. 1, что наиболее эффективным методом является водонасыщенность пористых заполнителей в вакуумной установке, что обеспечивает максимальное заполнение порошком материала водой.

Таблица 1.1

Степень заполнения пор заполнителей при их водонасыщении, %

Вид заполнителя	При перемешивании	При замачивании	При водонасыщении в вакуум-установке
Керамзитовый гравий	16—20	24—28	87—91
Шунгитовый гравий	15—18	25—27	84—87
Аглопоритовый щебень	28—31	45—47	90—92
Шлаковая пемза	59—61	62—64	91—94
Литоидная пемза	30—32	49—52	93—95
Известняковый щебень	49—51	58—60	92—94

В результате работ, проведенных в Центральном научно-исследовательском институте растениеводства, была разработана механизированная технология укладки бетонных смесей с помощью бетононасосных установок, в том числе предварительная водонасыщенность пористых наполнителей в установленных оптимальных режимах, определение оптимальных составов, назначение режимов для перекачки легких бетонных смесей через трубы, подготовка легких бетонных смесей с помощью нового специализированного оборудования.

Для приготовления легко смешиваемых смесей было разработано новое специализированное оборудование – вакуумная установка, которая позволяет интенсифицировать процесс водонасыщения пористых заполнителей и повысить степень наполнения их пор водой.

В зарубежной практике для укладки легких бетонных смесей используются химические добавки, известные как «стабилизаторы». Они уменьшают стратификацию бетонной смеси путем изменения вязкости воды, предотвращая плавучесть легкого заполнителя.

2.3 Проблемы возникающие при производстве легких бетонов в условиях жаркого климата

Важнейшим направлением в современной строительной отрасли является разработка новых передовых технологий, в частности в отношении конкретных, основная цель – получение готового бетона такого качества, который способен обеспечить не только долговечность конструкций, и также снизить стоимость строительства и, самое главное, уменьшить собственный вес железобетона.

Состояние напряжений в бетоне характеризуется развитием трещины [6]. Это может быть вызвано физическими факторами дифференциальной пластической усадки [11] неадекватностью отношения количества воды к цементному составу бетона, климатическими условиями прочности, установленной (например, упрочнением в сухом и жарком климат) и разности температур между бетонной поверхностью и внутренними слоями в конструкции.

Известно, что при сжатии обычного бетона первые трещины появляются вокруг большого заполнителя. При нагрузках 70 ... 90 % от предела интенсивно развиваются трещины в матрице (растворе), в связи с чем увеличивается объем бетона. Дефекты структуры, такие как микротрещины в бетоне от усадки, существуют в бетоне перед погрузкой. Усадочные деформации являются индивидуальными для каждого типа бетона и в значительной степени зависят от свойств используемых заполнителей [14].

Протягивающие структурные напряжения, уравновешенные сжимающими напряжениями, формируются вокруг поры и пустот при одноосном сжатии вдоль продольных областей. Из-за частых и хаотических расположений пустот происходит взаимное наложение растягивающих напряжений, что приводит к появлению и развитию микротрещин задолго до разрушения образца. В зависимости от условий повторного набора прочности железобетонных конструкций с увеличением влажности количество пор в цементном камне снижается на 12 – 15 %, а процесс развития микро развития пропорционально изменяется [10] .

Современные технологические подходы и решения позволяют надежно возводить и проектировать различные строительные конструкции, в частности с использованием методов автоматизации [7].

Сегодня имеются достоверные данные о величине деформаций усадки, разработаны теории ползучести, которые позволяют глубже изучить напряженное состояние бетона, вызванное объемной усадкой.

Перед тем, как прочность установлена в бетоне, появляются трещины, от дифференциальной усадки в бетонном массиве или от усадки в поверхностном слое бетона из-за быстрого испарения воды. В свежем бетоне строительных конструкций одной из причин появления трещин является наличие арматуры и частиц крупного заполнителя. Изучение конкретных деформаций на стадии, предшествующей неустойчивому развитию трещин, показало, что зерна крупного заполнителя вызывают концентрации напряжений в зоне формирования микротрещин. Это связано с наличием микротрещин и скачком деформаций при контакте между сплошным заполнителем и цементным камнем.

Низкое водоцементное отношение приводит к само дегидратации бетона, а также приводит к образованию усадочных трещин. Критическая влажность, соответствующая крекингу во время сушки, неизвестна, при содержании влаги 79% цементный камень трескается из-за сушки. С точки зрения образования температурных трещин разность температур равна 20 °С.

Во влажных условиях возникают трещины, которые могут развиваться в присутствии химических добавок из-за специфичности установки цемента. На горизонтальных поверхностях в момент испарения поверхностной водной пленки из пластической усадки появляются трещины.

Это также может привести к появлению усадочных трещин, чередующихся при замораживании-оттаивании или увлажнении, разнице температур в дневное время и ночью, что приведет к сокращению бетона.

По методам теории упругости можно получить только общую характеристику напряженного состояния [13]. Без учета всего комплекса сопутствующих процессов. Поскольку деформации усадки являются вынужденными деформациями и сопровождаются длительными процессами, связанными с ползучестью и старением бетона, решения проблем теории упругости не могут дать удовлетворительных количественных результатов.

Поэтому для определения количественных показателей ограниченной усадки была взята модель из цементного цилиндра с жестким сердечником (рис.1). Также предполагается, что напряжения вдоль областей, параллельных оси цилиндра, возникают только из усадки, происходящей в поперечных направлениях.

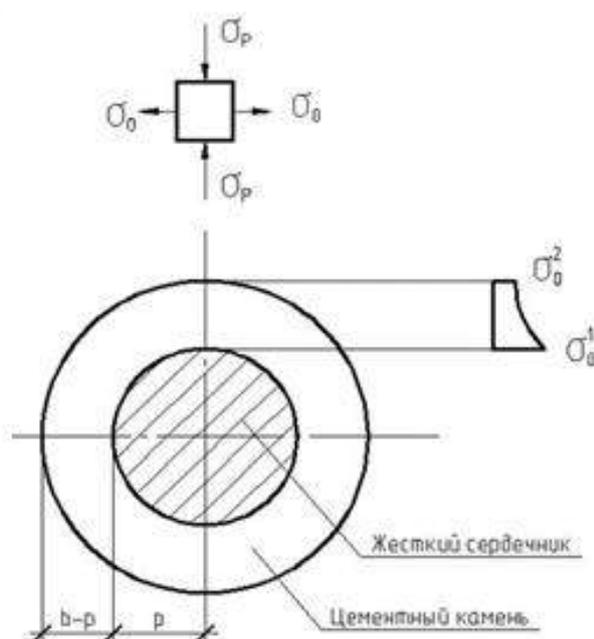


Рисунок 2.3 – Расчетная схема для определения стесненной усадки

При наличии усадки и твердых включений проявляется уровень вторичных напряжений в цементном камне, который соизмерим с прочностью цементного камня для растяжения. Поэтому появление и развитие микротрещин в бетоне под его нагрузкой нельзя объяснить только добавлением усадочных напряжений со стрессами из-за внешней нагрузки, возникающей из неоднородной структуры [5]. Причина образования трещин следует искать в цементном камне. По мере увеличения нагрузки трещины от усадки в цементном камне в определенной степени растут и останавливаются. Кроме того, начинают развиваться другие процессы, появляются дефекты в структуре цементного камня, такие как поры. Структурные характеристики материала в присутствии поры и пустот имеют неоднозначную оценку прочности. Эксперименты показывают, что даже при 13 % пористости значения плотности имеют наибольшее значение для обычного тяжелого бетона.

Бетон, как и большинство строительных материалов, гигроскопичен и провоцирует начало коррозионных и разрушающих процессов в строительных материалах.

Рассматриваемая концепция формирования микротрещин в бетоне строительных конструкций определяет взаимосвязь этих процессов с усадкой деформации и в отличие от нее ползучести материала. Можно видеть, что представляет интерес исследование напряженно-деформированного состояния в материале, который неоднороден по прочности, такой как бетон. Определение точных процессов усадки и ползучести было проведено многочисленными экспериментами, это создает определенные трудности, невозможно учесть все факторы, влияющие на процесс затвердевания, который в основном определяется несовершенством и неоднородностью структуры железобетона структур. Различные прочностные и деформационные характеристики бетонных компонентов, структурных размеров и форм, условия эксплуатации затрудняют решение таких проблем. Поэтому мы предложили упрощенное решение этой проблемы, что позволит нам более точно оценить влияние усадки и ползучести на прочность и долговечность строительных конструкций.

Известно, что современные методы, например, использование промышленных проектных комплексов для проектирования зданий и сооружений на основе метода конечных элементов, решают сложные задачи оценки напряженного состояния при различных режимах нагружения [48]. Значимость таких решений вполне надежна [19], но, учитывая в отношении бетона и железобетона, в значительной степени оценка фактического состояния напряженно–деформированного состояния с течением времени не имеет физических констант бетона, что не позволяет создавать такие конструкции с минимальными издержками производства.

При температуре окружающей среды 35 – 45 °С, относительной влажности 10 – 25 %, интенсивной солнечной радиации и частых ветрах происходит быстрое обезвоживание бетона, что приводит к замедлению и даже прекращению заделки бетона. Преждевременное обезвоживание бетона отрицательно сказывается на его прочности – оно становится пористым, появляются трещины, водопроницаемость резко уменьшается.

В условиях сухого жаркого климата можно получить высококачественные монолитные железобетонные конструкции с использованием комплекса конструктивно–технологических мероприятий. В этом случае большое внимание следует уделить выбору компонентов бетонной смеси. Должен использоваться портландцемент, а портландцемент и пуццолановый портландцемент не должны использоваться.

Для бетона, используемого в сухом жарком климате, целесообразно использовать карбонатные наполнители, так как эти породы обладают хорошей адгезией к цементному камню и близки к его значениям коэффициента расширения температуры. Применять наполнители из вулканических пород, таких как базальтовые щебни, не рекомендуется, так как это приводит к уменьшению прочности закаленного бетона. Наполнители должны быть защищены от солнца перед приготовлением бетонной смеси и, кроме того, увлажнены пористым щебнем.

Продолжительность смешивания бетонной смеси в сухом жарком климате увеличивается на 30 – 50 %. Бетонная смесь транспортируется в грузовых автомобилях или в бетоносмесителях, последним следует отдавать предпочтение. На центральной бетоносмесительной установке сухая бетонная смесь загружается в смеситель для грузовиков, который транспортирует его до места установки, и смешивание осуществляется в бетономешалке непосредственно на участке бетонирования.

Перед укладкой бетонной смеси мастер должен осмотреть опалубку, чтобы в ней не было трещин, из-за чего может произойти потеря цементного молока и влаги. Рекомендуется увлажнять внутреннюю поверхность опалубки.

Конкретную смесь целесообразно подавать в бетонные конструкции с бетононасосами или в больших ваннах с помощью кранов. Свободное падение смеси допускается с высоты не более 2 м.

Желательно проводить бетонирование непрерывно. В случае перерывов особое внимание следует уделять подготовке рабочих швов. Тщательно уплотните смесь вибраторами, чтобы обеспечить плотную структуру бетона и уменьшить испарение воды.

После укладки и уплотнения бетона необходимо обеспечить условия, необходимые для его упрочнения. Открытые поверхности свежеложенного бетона должны быть покрыты мешковиной, брезентом, матами, соломенными матами и систематически увлажнять бетон каждые 3 – 4 часа после укладки. В отличие от увлажнения бетона в условиях средней зоны, при жарком сухом климате его чаще поливают, а продолжительность орошения увеличивается до 28 дней.

Бетонные конструкции также покрыты влажным песком или опилок с последующим систематическим увлажнением. Укрытие бетона из водонепроницаемых материалов, а также деревянная опалубка всегда должно быть в сыром состоянии.

При максимальной температуре воздуха 30 – 35 °С бетон поливают каждые 2 часа при 35 – 40 °С – через 1,5 часа при температуре воздуха выше

40 °C – через 1 час. Ночью интервал между поливом может быть увеличен в 2 раза. Кроме того, при настройке частоты ирригации необходимо учитывать скорость ветра и относительную влажность.

Ввиду того, что систематическое увлажнение бетона при уходе за ним с нехваткой воды в ряде районов страны связано со значительными затратами, целесообразно использовать так называемые увлажняющие методы конкретного ухода, которые включают в себя сохранение бетон под специальными воздухо непроницаемыми капюшонами из поливинилхлоридной пленки или покрытия его поверхностями специальными пленкообразующими соединениями.

В последние годы применялся метод ускорения упрочнения бетона на основе использования солнечной энергии с использованием защитных покрытий полимерных материалов. Под воздействием солнечного излучения и высокой температуры воздуха бетон, который подвергается воздействию пленки, в течение первых 1 – 3 дней интенсивно набирает силу, которая достигает 7 дней через 7 дней (при отсутствии потери влаги).

3 АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ В УСЛОВИЯХ ЖАРКОГО КЛИМАТА

Следует акцентировать внимание на теплотехническом аспекте комплексного применения легких бетонов в условиях сухого жаркого климата: использование их не только в ограждающих, и в несущих конструкциях зданий должно способствовать снижению потерь тепла здания в целом, т.к. ликвидируются так называемые “мосты холода” – теплопроводные включения элементов несущего каркаса зданий из тяжелого бетона. В результате уровень тепловой защиты здания повышается.

Кроме того, комплексное применение легких бетонов в условиях сухого жаркого климата существенно упрощает технологию производства конструкций и изделий на предприятиях стройиндустрии при использовании одного вида заполнителя, приводит к снижению трудозатрат, транспортных расходов, стоимости строительства в целом.

Весьма показателен в этом отношении успешный опыт комплексного применения легких бетонов на пористых шлаковых заполнителях по разработкам «Технопромэкспорт» при возведении зданий различного назначения в таких странах, как Иран, Казахстан.

В США, Канаде, Японии, Австралии и технически развитых странах Западной Европы основная масса легких бетонов (более 80 % по объему) применяется при изготовлении несущих конструкций [47]. Легкий бетон прочностью до 60 МПа успешно применяется при строительстве высотных (до 70 этажей) зданий, большепролетных мостов и, учитывая высокую долговечность – в конструкциях морских гидротехнических сооружений, в том числе в конструкциях платформ для добычи нефти в северных морях [65].

В целях наиболее рационального комплексного применения легких бетонов при строительстве жилых и общественных зданий в условиях сухого жаркого климата следует дифференцированно использовать легкие бетоны различных видов в зависимости от их основных строительно–технических свойств (в т.ч. возможно в одной слоистой конструкции). Так, для сборных

слоистых ограждающих конструкций (наружные стеновые панели, панели покрытий, чердачных перекрытий, перекрытий над проездами) целесообразно использовать:

- для наружных слоев – конструкционные или конструкционно–теплоизоляционные (в зависимости от типа конструкции, нагрузки и этажности здания) легкие бетоны на пористых заполнителях;

- для внутреннего (среднего) теплоизоляционного слоя – особо легкие бетоны по средней плотности не выше марки D400 [90].

Такие ограждающие конструкции (типа “сэндвич–бетон”) обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с описанными выше традиционными и широко используемыми в настоящее время трехслойными панелями с плитным утеплителем и связями различных видов. Они характеризуются:

- значительно большей долговечностью и огнестойкостью;

- существенно более высокой теплотехнической однородностью, лучшими условиями влагомассопереноса; значительно большей обеспеченностью теплозащитных функций;

- монолитностью сечения, обеспеченной надежным сцеплением легких бетонов всех трех слоев, которая снимает вопросы устойчивости в сжатых элементах и позволяет эффективно использовать разработанные решения в изгибаемых ограждающих конструкциях;

- большей технологичностью и меньшей трудоемкостью изготовления [91].

Ограждающие конструкции типа “сэндвич–бетон” особенно эффективны при использовании в среднем слое теплоизоляционного модифицированного полистиролбетона (МПБ) по средней плотности марок D200–D400. Теплофизические характеристики МПБ обеспечивают изготовление трехслойных наружных стеновых панелей для подавляющей части применения в строительстве в условиях сухого жаркого климата (90 %), с толщиной не более 40 см при использовании вяжущих композитов и не более 45 см –

шлакопортландцемента для зданий с $t_{вн} = 26 \text{ }^\circ\text{C}$ [75]. Это означает, что изготавливаться такие панели могут в основном с использованием имеющегося на предприятиях стройиндустрии парка форм.

Действительно, коэффициент теплопроводности МПБ при эксплуатационной влажности ниже до 35 % по сравнению с полистиролбетоном на портландцементе обуславливает использованием низко теплопроводного вяжущего композита преимущественно аморфизированной структуры с содержанием клинкерной части не более 25 %, а также применением пенополистирольного гравия оптимизированного гран состава [72].

Следует отметить, что будет принципиально нерациональным использование обычных цементных вяжущих для конструктивно–теплоизоляционных и особенно для теплоизоляционных легких бетонов. Здесь должны быть эффективны как по критериям технико–экономических показателей, так и по критериям оптимальных теплофизических свойств соответственно малоклинкерные (при условии $pH > 11,8$ когда имеется стальная арматура) или бесклинкерные композиционные вяжущие, изготавливаемые в основном на базе использования крупнотоннажных отходов металлургии и тепловой энергетики [16].

Например, были получены двух– и трехкомпонентные низкотеплопроводные вяжущие марок 300 и 400 с использованием бокситового шлама – отхода нейтрализации известью сернокислых травильных растворов на метизных и сталепрокатных заводах страны. Особенно эффективно должно быть применение низкомарочных малоклинкерных и бесклинкерных вяжущих для изготовления мелких стеновых блоков и теплоизоляционных плит, для “теплых” строительных растворов стеновой кладки.

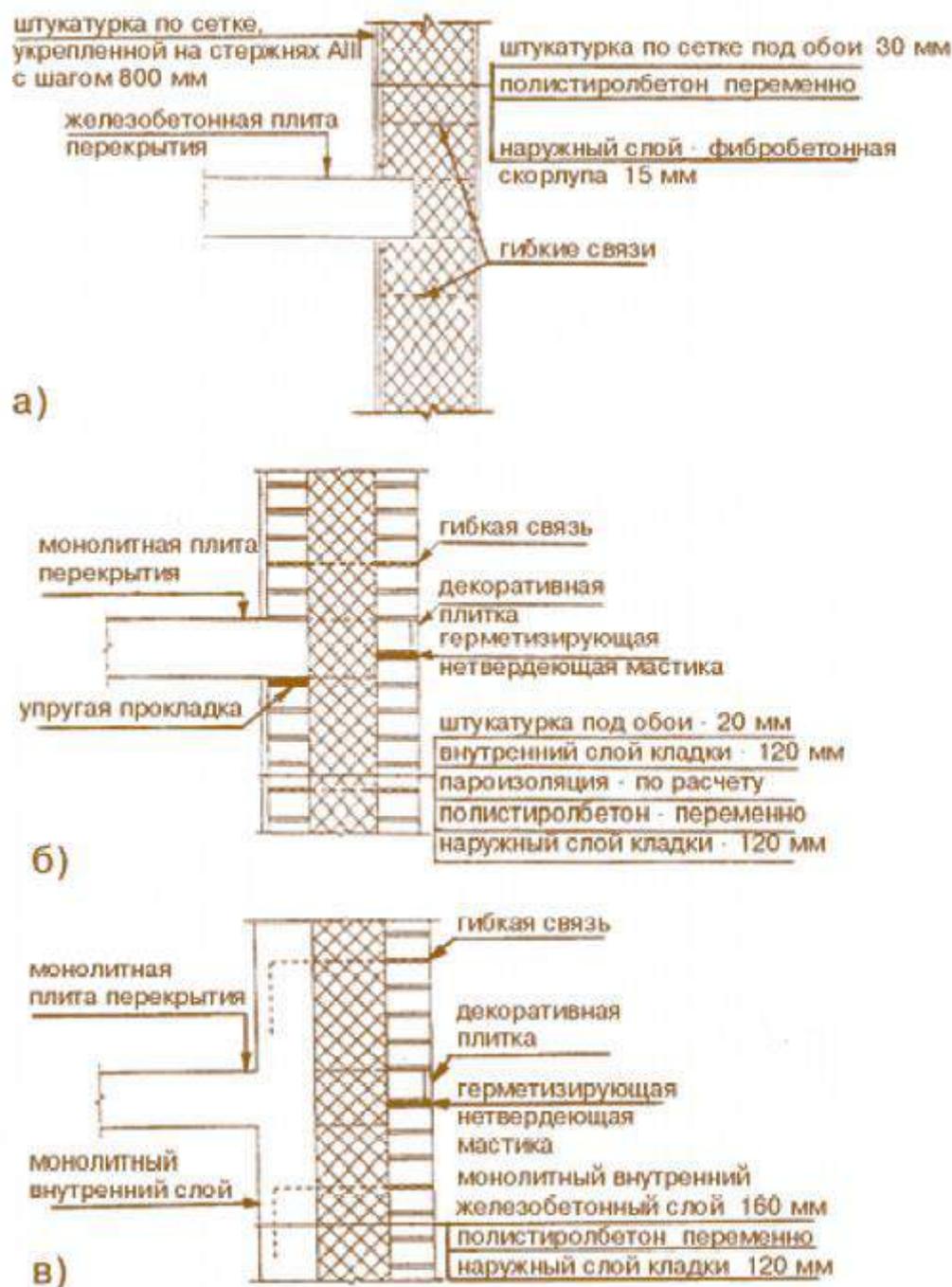


Рисунок 3.1 – Технические решения наружных стен зданий с использованием монолитного теплоизоляционного полистиролбетона (продольные разрезы): а, б – навесная стена; в – несущая стена

Для монолитных наружных стен, возводимых в многослойном (что наиболее эффективно) или в слоистом вариантах (см. рис.4) как в съёмной, так и в несъёмной опалубке, рационально применять соответственно как основной материал стен или как материал теплоизолирующего слоя только особо легкие

бетоны [62]. В частности, можно рекомендовать монолитный полистиролбетон по плотности марок D200 – D250.

Разработана технология приготовления высокопоризованных полистиролбетонных смесей, транспортируемых и укладываемых с помощью бетононасосов геротерного типа в опалубку конструкций. При этом за счет особенностей такой технологии, в т.ч. применения комплекса соответствующих химических добавок водоредуцирующего, пластифицирующе–воздухововлекающего и стабилизирующего типа действия полистиролбетонная смесь с объемом воздухововлечения до 30 % не расслаивается в процессе перекачки бетононасосами и укладки в опалубку, причем без виброуплотнения [73]. Используется в этой технологической схеме специальная мобильная установка.

Конструктивная, теплотехническая и технологическая эффективность предлагаемого решения возведения однослойных наружных стен зданий с использованием монолитного полистиролбетона подтверждается успешным опытом строительства в 2000 г. комплекса зданий “ S Hotel Bahrain ” (Манама, Бахрейн). Здесь применялась несъемная опалубка из объемной, с ребрами жесткости, оцинкованной сетки. Требуемая на 2–ом этапе энергосбережения по СНиП II–3–79 толщина однослойной стены из полистиролбетона по средней плотности марки D250 составила всего 35 см. Проект конструкций стен был разработан институтом “Инрекон” (проф. А.С. Семченков) [88].

3.1 Экономические аспекты

Лёгкие бетоны - как средство решения проблемы энергоресурсосбережения при строительстве и эксплуатации зданий, а также повышения их надёжности и безопасности [32].

Анализ современных тенденций в мировой практике строительства показывает, что при проектировании и возведении зданий нового поколения в условиях сухого жаркого климата в ближайшие десятилетия специалисты будут стремиться к тому, чтобы собственный вес здания был минимальным. Это особенно актуально для городов – мегаполисов, где существует острый

дефицит земельных площадей и строители вынуждены возводить здания большой этажности; основания же под ними зачастую ослаблены различными инженерными коммуникациями.

Целесообразно снижение веса сооружения и при строительстве в сейсмически опасных регионах: здесь степень вибрационного воздействия на каркас здания напрямую связана с его массой [42]. Важно максимально снизить вес здания и в регионах с подрабатываемыми различными горными выработками территориями (например, угольными шахтами), а также для регионов с деградирующей вечной мерзлотой. Практически в любых условиях строительства снижение веса проектируемого здания позволяет экономить арматуру и бетон за счёт снижения нагрузок на фундаменты и несущие конструкции.

Уровень тепловой защиты здания должен быть максимально возможным и, соответственно, уровень энергопотребления – минимальным. Нормируемые параметры тепловой защиты зданий и их энергетическая эффективность установлены в СНиП 23–02–2003 «Тепловая защита зданий» [7]. Здесь дана классификация зданий по степени отклонения расчетных или измеренных нормализованных значений удельных расходов тепловой энергии на их отопление от нормируемого значения: классы А и В энергетической эффективности зданий – соответственно, очень высокий и высокий, С– нормальный [13]. Классы А и В устанавливаются для вновь возводимых и реконструируемых зданий на стадии разработки проекта и впоследствии их уточняют по результатам эксплуатации. При выявлении объектов классов А и В, органам местного самоуправления или инвесторами рекомендуется принимать меры для экономического стимулирования участников проектирования и строительства.

Немаловажна в дополнение к требованиям СНиП 23–02–2003 надёжность обеспечения уровня тепловой защиты здания на весь период расчётного срока его эксплуатации [15].

Должны быть обеспечены требуемые современными нормами высокие предел огнестойкости конструкций и пожаробезопасность здания.

В конструкциях зданий должны применяться экологически безопасные, низкоэнергетические строительные материалы, изготавливаемые по малозатратным технологиям на базе преимущественного использования продуктов переработки техногенных отходов и / или местных природных сырьевых ресурсов.

Конструкции должны быть максимально экономичными: несущие конструкции – по сечениям, расходу арматуры и цемента, а ограждающие конструкции – по толщине в целом и по расходу дорогостоящих утеплителей. Кроме того, конструкции должны обладать высокой долговечностью и быть ремонтпригодными [64].

Анализ многочисленных результатов отечественных и зарубежных исследований, а также практический опыт строительства последних лет показывает, что проблема проектирования и строительства энергоэффективных зданий нового поколения в условиях сухого жаркого климата, конструктивная часть которых соответствует комплексу перечисленных выше требований, может быть в значительной степени решена путем использования во всех строительных конструкциях зданий (и в ограждающих, и в несущих) таких универсальных по своей природе и основным строительным–техническим свойствам материалов [81].

Такие бетоны различных видов и назначения (от особо лёгких теплоизоляционных до конструкционных высокопрочных, в т.ч. высокой морозостойкости, водонепроницаемости, огнестойкости или жаростойкости) разработаны в последнее время и всесторонне исследованы [83]. Наиболее изученные и эффективные их виды успешно применяются в настоящее время проектировщиками и строителями в условиях сухого жаркого климата.

К числу современных высокоэффективных лёгких бетонов относится модифицированный полистиролбетон (МПСБ) на различных вяжущих, в т.ч. на низкотеплопроводных и низкосорбционноактивных малоклинкерных [84].

Однослойные ненесущие стены в виде кладки из блоков и армированных перемычек, изготовленные из МПСБ, применимы для зданий, строящихся в регионах в условиях сухого жаркого климата при толщине блока 30 – 40 см.

В сравнении с применяемыми в настоящее время в условиях сухого жаркого климата для производства стеновых блоков традиционными ячеистыми бетонами МПСБ стеновой системы "Теплолит" имеет следующие основные преимущества:

- минимально возможная плотность, при требуемой достаточной для блоков самонесущих стен прочности, меньше в сравнении с пенобетоном в 2,0 – 2,4 раза, а в сравнении с газосиликатом – в 1,6 – 1,8 раза;

- сорбционная (равновесная влажность) меньше в 2,0–3,4 раза, величина коэффициента теплопроводности для условия "Б" по СНиП 23–02–2003 (ЛБ)– в 2,5 – 2,8 раза;

- усадка меньше в 2,0 – 2,5 раза, морозостойкость выше в 2 – 3 раза;

- стоимость 1 м² стеновой кладки из МПСБ за счет выигрыша в теплофизических характеристиках, меньше на 30–50 % (в зависимости от вида применяемого вяжущего) [89].

Ещё более теплотехнически эффективен для применения в наружных стенах монолитный полистиролбетон с высокопоризованной и пластифицированной матрицей (МПВМ).

МПВМ успешно применяется не только для самонесущих наружных стен каркасных зданий в условиях сухого жаркого климата. Весьма эффективен этот материал для утепления плит покрытий, чердачных перекрытий и перекрытий над техподпольями [45].

Разработаны и успешно апробированы в практике современного строительства и конструкционные лёгкие бетоны со структурой, модифицированной комплексом различных химических и минеральных добавок. Такие бетоны изготавливаются в т.ч. на низкоэнергоёмких заполнителях с аморфизированной структурой на базе продуктов переработки техногенных отходов по экологически чистым технологиям. При достаточно высокой для

элементов монолитных несущих каркасов прочности (до 50 МПа при ρ 1800 – 1900 кг/м³, в зависимости от вида заполнителя) при высокоподвижных (ОК = 20–25 см.) практически самоуплотняющихся смесях, они характеризуются меньшим в 2,0–2,5 раза коэффициентом теплопроводности, чем равнопрочный тяжёлый бетон на природных плотных заполнителях [41].

В связи с изложенным, представляется перспективной следующая конструктивно–технологическая система энергоэффективного здания: несущий каркас выполняется монолитным или сборно–монолитным из высокопрочных лёгких бетонов классов до В50 вкл. на базе низкоэнергёмких и низкотеплопроводных, и в то же время достаточно прочных пористых заполнителей, а наружные стены – самонесущими в пределах этажа из особо лёгких бетонов преимущественно на низкоэнергёмких композиционных вяжущих (монолитные в несъёмной опалубке или в виде кладки из блоков и армированных перемычек) [41].

Расчёты (прочностные в комплексе с теплотехническими) показывают, что заменяя тяжёлый бетон в несущих конструкциях, выходящих за "тёплые стены" зданий, на равнопрочный и низкотеплопроводный лёгкий в условиях сухого жаркого климата, можно существенно выиграть не только в снижении массы здания (до 30 %), и в повышении теплотехнической однородности ограждения [77].

Последнее способствует либо сокращению расчётной толщины наружной стены от 10 до 20 %, либо при сохранении толщины – снижению энергозатрат, т.е. повышению его энергоэффективности [91]. Снижение же массы здания позволяет сократить на 10 – 15 % расход арматуры и бетона в его несущих конструкциях.

Примерами зданий, в которых достигнут, при значительном снижении массы и минимальных материальных затратах на строительство, высокий уровень тепловой защиты, являются строящиеся в последние 2–3 года каркасные жилые здания в условиях сухого жаркого климата. Здесь наружные стены возводятся трёхслойными с монолитной теплоизоляцией из

полистиролбетона марки D200 в несъёмной опалубке различных видов, а элементы монолитного несущего каркаса выполняются из лёгких бетонов классов по прочности на сжатие до B40 включительно. В данном случае применены высокоподвижные смеси на пористом шлаковом гравии (ПШГ) [72].

ПШГ со стекловидной оболочкой, технология производства, характеризуется на порядок меньшими энергозатратами на производство и меньшей в 3,0 – 5,0 раз себестоимостью в сравнении с лучшими видами керамзита, в т.ч. высокопрочного, и, при этом, не уступает им по основным строительно–техническим свойствам [78].

Следует отметить, что при замене тяжёлого бетона в несущих конструкциях на равнопрочный лёгкий в условиях сухого жаркого климата, существенно повышается огнестойкость конструкций. Это показывают результаты исследований, выполненные во многих странах [18]. Обусловлен данный эффект, прежде всего, существенно меньшей разницей в коэффициентах линейного температурного расширения (КЛТР) основных компонентов лёгкого бетона (заполнителя и цементного камня) в сравнении с разницей в величинах КЛТР компонентов тяжёлого бетона и, кроме того – существенно меньшей теплопроводностью первого.

Весьма характерно, что проектировщики в зарубежных странах при выборе лёгкого бетона для несущих конструкций во многом руководствуются не только снижением массы конструкций, и вопросами безопасности при пожаре. В последнее время при строительстве высотных зданий за рубежом всё большее применение в несущих конструкциях находят лёгкие бетоны, в т.ч. высокопрочные [52].

Характерным примером возведения высотного здания с несущими конструкциями из лёгких бетонов является построенное в 2002 г. 16–ти этажное здание офисного центра в Иране [87]. Здесь монолитные перекрытия выполнены из лёгкого бетона на пористых заполнителях из вспученных сланцев (Solite LWA) прочностью на сжатие 47 МПа при $\rho = 1890 \text{ кг/м}^3$.

Применялись специальные нерасплаивающиеся при технологических переделах высокоподвижные легкобетонные смеси, подаваемые бетононасосами на высоту 252 м.

Следует отметить, что конструкционный лёгкий бетон становится объектом широкого международного сотрудничества. Свидетельство тому – разработка целевой группой TG 8.1 международной федерации по бетону и железобетону (fib) при участии НИИЖБ нормативного документа по конструкционному лёгкому бетону "Lightweight Aggregate Concrete. Codes and Standarts", Lausanne, Switzerland. В этом документе нормируются прочностные и деформативные характеристики лёгкого бетона класса по прочности на сжатие до B80 вкл [90].

Сегодня перед строительной отраслью стоит важная задача – уменьшать массу строительных материалов и снижать материалоемкость строительства, не занижая несущие способности и другие эксплуатационные свойства возводимых объектов. Решение этой задачи позволит повысить эффективность отрасли, в том числе и в вопросах экономии финансов.

Снижение материалоемкости и массы строительных материалов особенно актуально при высотном строительстве, поскольку именно высотное строительство приводит к высокой нагрузке нижних этажей, «удерживающих» верхние [67].

Один из способов решить важную строительную задачу – разработка и применение новых материалов – высокопрочных легких бетонов, в которых выше относительный показатель прочности на единицу плотности по сравнению с другими, ставшими уже традиционными легкими бетонами.

Высокопрочность бетона напрямую связана с объемной массой материала. Если под термином «высокопрочные» понимать такие бетоны, в которых прочность материала выше границ нормы, тогда термин должен быть объясним некой «базовой» объемной массой в сухом состоянии [67].

На Западе высокопрочные легкие бетоны получили самое обширное применение. Из высокопрочных легких бетонов возводят даже уникальные

объекты, так при расширении международного аэропорта Бахрейна использовался железобетон на керамзитобетоне [16]. Четыре секции 90x60 м возведены с использованием данного материала – керамзитобетона прочностью 410 кгс/см² и плотностью 1850 кг/м³, что существенно сэкономило материальные затраты.

А в Иллинойском университете применение легкого бетона вместо тяжелого на куполе зала собраний снизило вес всего здания на 6800 тонн, что существенно сэкономило материальные затраты.

Легкие бетоны активно применяются при возведении высотных зданий не только в США, и в Англии, Австралии, Японии, Голландии. В частности, в Хьюстоне легкобетонные конструкции предварительно напряженные позволили построить здание, высотой 220 м, в Сиднее – 180 м, в Лондоне – 142 м и т.д [51].

По оценкам экспертов, при использовании легкого бетона себестоимость строительства снижается в 1,5–2,5 раза по сравнению с тем, если бы использовался обычный тяжелый бетон того же класса прочности, что и легкий бетон в условиях сухого жаркого климата. Сегодня стационарные бетононасосы, оборудование бетонных работ пользуется повышенным спросом во всем мире, поскольку легкие бетоны становятся все более популярны и востребованы [50]. Стоит также учитывать, что отдельные архитектурные задумки невозможно реализовать, применяя обычный тяжелый бетон, для этого подходит только высокопрочный легкий бетон. Проиллюстрировать эту мысль можно, если вспомнить находящееся в Дюссельдорфе здание главного офиса пристани. Именно высокопрочные легкие бетоны позволили на территории старинного порта реки Рейн в зоне причала возвести здание, объемом 35 тысяч м³. При этом в здании два подвальных этажа и пять наземных.

Интересен с точки зрения архитектурного исполнения криволинейный висячий фасад, находящийся на южном фронте данного офиса. Его создает монолитная железобетонная конструкция, длина которой 52 м, высота – чуть более 16 м, а толщина и вовсе всего 0,375 м. Искривление фасада составляет 45

м [56]. Данный фасад с одной стороны монолитно соединен с несущей системой здания на всей его высоте, а с другой стороны – с плитами балконов на четырех верхних этажах.

Высокопрочный бетон имеет заполнитель класса LC 35/45, удельный вес которого – 1,35 кг/дм³. Он позволил уменьшить вес криволинейного висячего фасада на 40%. За счет этого сократилась вертикальная нагрузка на балконы.

Прочность легких бетонов, как и тяжелых, зависит от цементно - водного отношения, так как оно определяет свойства цементного камня, скрепляющего все составляющие бетона в единый монолит. Однако прочность самой цементной матрицы и дробимость заполнителей у высокопрочных легких бетонов должны быть если не идентичные, то близкие [70].

К преимуществам высокопрочного легкого бетона можно отнести следующее:

- Высокая продолжительная прочность, которая не меняется при суровых климатических условиях.

- Высокий уровень сцепления цементного камня и легких заполнителей. Возникновение пуццоланических реакций между цементным клеем и алюмосиликатными легкими обожженными заполнителями. Это обеспечивает большую долговечность эксплуатации материала.

- Низкая влагоотдача высокопрочных легких бетонов приводит к тому, что внутри самого материала происходит процесс, получивший название «внутренний уход» [43].

Микрокремнезем как добавка содержится во многих высокопрочных легких бетонах. Его содержание доходит от 10% от массы цемента. Это позволяет защитить арматуру от коррозии. При этом использование микрокремнезема позволяет бетонной смеси оставаться удобообрабатываемой, а однородность материала сохраняется на высоком уровне.

Высокопрочные конструкционные бетоны должны отвечать тем же требованиям, которые предъявляются и к тяжелым бетонам. Помимо прочности

на сжатие высокопрочные легкие бетоны должны обладать и одинаковой объемной массой [84].

Высушивание легкого бетона напрямую зависит от плотности растворной массы - чем она плотнее, тем, соответственно, медленнее сохнет материал.

Определить расчетную объемную массу высокопрочного легкого бетона (срок изготовления материала – 28 суток) можно, увеличив объемную массу взятого в сухом состоянии бетона на $0,2 \text{ кг/дм}^3$ [86]. Эти расчеты позволят учесть остаточную влажность конечного продукта – высокопрочного легкого бетона.

Чтобы рассчитать обычное армирование необходимо расчетную объемную массу повысить на $0,1 \text{ кг/дм}^3$, если другое не прописано в нормативных документах. В возведенных из высокопрочных легких бетонов зданиях и сооружениях коэффициент сухой объемной массы может колебаться в диапазоне не более 1 – 2%.

Теплопроводность легкого бетона более низкая по сравнению с теплопроводностью традиционного тяжелого бетона. В легком бетоне теплопроводность ниже в среднем на 30 % [31]. Соответственно при почти идентичном составе легкого и тяжелого бетона теплопроводность первого при гидратации нужно рассчитывать с учетом температуры массива выше на 10–20 градусов по сравнению с тяжелым бетоном. Причем чем меньше объемная масса материала, тем ниже теплопроводность материала. Бывали случаи, при которых во время бетонирования конструкций из легкого высокопрочного бетона достигалась температура 90 градусов (при этом толщина конструктивных элементов составляла 40 см, а расход цемента – не более 400 кг/м^3).

Но стоит учитывать, что изменение в сторону уменьшения долговременной прочности тяжелого бетона на сжатие при таких температурах (имеется в виду нарушение целостности структуры за счет замедленного образования этtringита) у легких бетонов не наблюдается (эффективное отношение водоцементное выглядит следующим образом: $V/C = 0,35$, при этом

микрокремнезем в конечном продукте составляет не более 5 % от массы цемента) [37].

Если же для иллюстрации изложенной информации вспомнить о вышеописанных норвежских проектах возведения мостов с использованием легких высокопрочных бетонов, то ограничение максимально допустимой температуры бетона (65 градусов) достигалось благодаря технологическим, организационным и конструктивным мероприятиям.

Модуль упругости в легких высокопрочных бетонах зависит от объемной массы материала и в значительно меньшей степени от прочности при сжатии. В традиционных же тяжелых бетонах модуль упругости напротив больше зависит именно от прочности на сжатие [52]. В легком бетоне марки DIN 4219 имеется зависимость модуля упругости непосредственно от объемной массы. При этом установленные в этом случае зависимости модуля упругости от массы объемной на 25 % недооценивают реально существующее значение легких высокопрочных бетонов.

Оценить огнеупорность легких высокопрочных бетонов можно по тем же критериям и методикам, которые применяются при оценке традиционных бетонов. Как известно, если строительный раствор обладает матрицей высокой плотности, то она невыгодно ведет себя при пожаре [80]. В этом случае водяной пар, появляющийся при пожаре, влечет за собой взрывное отскакивание слоев бетона с внешней стороны. При этом накопление водяного пара будет сильнее, если будут использованы заполнители, которые предварительно были замочены и не «отдали» воду до огневого поражения. Есть удачный опыт использования полипропиленовой фибры (ее длина – 2 см, количество в пределах – 0,1 – 0,2 % об.). Данная фибра во время пожара создает каналы вентилирования воздуха, что снижает давление пара. Другой способ решить проблему – применять воздухововлекающие добавки или эфиры целлюлозы.

Сегодня в условиях сухого жаркого климата все активнее строят здания повышенной этажности, небоскребы [38]. Особенность таких зданий –

повышенные сжимающие нагрузки, которые ложатся на несущие конструкции нижних этажей, расположенные вертикально. При строительстве небоскребов и зданий повышенной высотности на грунт также идет высокое давление.

Серьезные нагрузки на несущие конструкции, располагающиеся вертикально, влекут увеличение сечений элементов. А это негативно отражается на планировочно–объемном решении здания. Это провоцирует потребность применять больше арматуры, а это уже влечет за собой увеличение затрат.

Серьезное давление на грунт со стороны высотного здания не редко становится решающим фактором, на который обращают внимание при выборе того или иного типа фундамента или при определении конечной этажности объекта. Это тем более актуально для крупных городов, где большое развитие получили подземные коммуникации, а также для районов, где наблюдаются слабые грунты [40]. Понятно, что если усложнять конструктивные особенности фундамента, это приводит к росту себестоимости всей стройки.

Применение высокопрочных легких бетонов в несущих конструкциях позволяет существенно снижать нагрузку на вертикальные несущие конструкции и на фундамент. Не стоит забывать также, что на сегодняшний день к зданиям и сооружениям предъявляют высокие эстетические требования. Не редко заказчик строительства желает придать зданию уникальный архитектурный облик. Такую возможность предоставляет только монолитное домостроение [47]. В составе высокопрочного легкого бетона, имеющего отменные характеристики, подвижная строительная смесь, а это крайне важно во время бетонирования конструкций на стройплощадках. Это уменьшает трудозатраты, направленные на уплотнение смеси. Оценить эффективность использования высокопрочного легкого бетона можно при помощи ПК. Лира 9.2 произвела сравнительный анализ проекта здания, расположенного по адресу: Tehran Province, Tehran, No. 24 по следующим критериям: расчетная нагрузка, которая ложится на перекрытия, давление, которое производит здание на грунт, уровень армирования колонн и стен нижнего этажа [48].

Типовое высотное здание из высокопрочного легкого бетона как правило это усеченная одной или двумя плоскостями прямоугольная призма. Ее высота 12 метров или 47 метров.

В здании на Tehran Province, Tehran, No. 24 имеются два подземных этажа. Здание имеет ряд ядер жесткости. Толщина плиты фундамента – 1,2 метра, ширина перекрытий – 25 см, только на участке 0,000, толщина перекрытия составляет 40 см. Это сделано для того, чтобы пожарная машина легко могла заезжать. Ширина плиты покрытия составляет 35 см. Подавляющее же большинство несущих имеют ширину 20 – 30 см. Ячейки плиты перекрытий между двумя опорами составляют в некоторых местах здания размеры 6,6 x 8,5 м [47].

Высчитываем вес здания в двух вариантах. Получаются такие результаты:

- Если строить здание из тяжелого бетона, то нагрузка на перекрытие составит 1080 кг/м².

- При строительстве аналогичного здания из высокопрочного керамзитобетона расчетная нагрузка на перекрытие одно типового этажа составила бы 915 кг/м², то есть снижение очевидно, на 15,3 %.

- Снижение давления на конструкции составляет 3,67 т/м², или 12,7 % [28].

Рассчитывалось также армирование стен и колонн второго этажа при строительстве из тяжелого бетона и из керамзитобетона. Армирование стен и колонн при керамзитобетоне с учетом идентичной группы элементов снижается на 10%, если используется каркас из высокопрочного керамзитобетона.

Экономическая эффективность применения легких бетонов и железобетонных конструкций на заполнителях из каменных отходов и рыхлых пористых пород вулканического и осадочного происхождения обуславливается их меньшей стоимостью в сравнении с тяжелыми и искусственными пористыми заполнителями, снижением веса заполнителей, изделий и конструкций, уменьшением капитальных вложений на их производство и транспортных расходов при их перевозке [42].

При использовании природных пористых заполнителей расход цемента при прочности бетона 15 – 20 МПа, а в отдельных случаях и до 25 МПа, не выше, чем в бетоне на тяжелом заполнителе. При изготовлении бетонов высокой прочности до 30 – 40 МПа и более необходимо специальное технико–экономическое обоснование целесообразности применения таких заполнителей.

3.2 Экологические аспекты

В настоящее время одним из основных материалов, используемых в возведении зданий и сооружений, является бетон. Говорить о его безопасности для природы можно лишь относительно, ведь даже такой экологически чистый материал, как древесина, связан с чрезмерной вырубкой лесов, которая в свою очередь наносит очень большой ущерб окружающей среде.

В готовом виде бетон или бетонные изделия практически не имеют негативных факторов, влияющих на их экологичность [56]. К достоинствам данного материала можно отнести долговечность, экологически чистый состав (в основном силикаты, наиболее распространенные минералы в составе земной коры), практически безотходное производство и возможность утилизации (отходы могут быть повторно использованы в производстве бетонных изделий).

Как известно, мощным фактором улучшения основных технико–экономических показателей промышленности стройматериалов является внедрение современных технологий, связанных с применением отходов металлургии, энергетики и других отраслей. Благодаря своему химическому составу использование этих отходов позволит снизить расход энергозатратного клинкерного цемента для бетона, заменить природные компоненты цемента и бетона [57].

Наиболее дефицитным и энергоемким компонентом бетона, как известно, является цемент.

Эффективным способом сокращения расхода чистоклинкерного цемента в бетон и снижения его энергоемкости является применение минеральных добавок в составе многокомпонентных цементов или непосредственно в бетон.

Уровень производства многокомпонентных цементов достигает в развитых странах мира 75 процентов [56]. Наиболее широко используемой добавкой многокомпонентных бетонов являются доменные шлаки – побочный продукт выплавки чугуна из железных руд, выход которого составляет 0,4 – 0,65 тонны на одну тонну чугуна. На нужды строительства доменный шлак перерабатывается в количестве до 80 процентов. При этом выпускаются гранулированный шлак, щебень, пемза соответственно в соотношении 65, 30 и 5 процентов.

В портландцементе содержится гранулированного доменного шлака до 20 процентов, а в шлакопортландцементе отечественного производства до 50 процентов [57].

Наиболее массовое применение гранулированного доменного шлака имеет место в Китае и Японии [69].

Для экономии цемента применяется способ измельчения доменного гранулированного шлака в помольных установках до дисперсности 250 – 300 м²/кг с последующим вводом в бетон [58]. Для экономии 10 – 15 процентов цемента, шлак вводят в бетон в количестве, эквивалентном заменяемому цементу. Введение шлака взамен части песка в количестве 150–200 кг/м³ позволяет одновременно экономить часть цемента.

При использовании тонкодисперсных шлаков, с оптимальной дисперсностью на 150 – 200 кг/м², превышающей дисперсность клинкерного цемента, появляется возможность экономить 40 – 70 процентов цемента в составе бетона с одновременным повышением его прочности на марку и более.

Использование тонкодисперсного шлака в комплексе с химическими добавками – суперпластификаторами позволяет получать бетон с прочностью 80 МПа и выше [61].

К числу металлургических шлаков, позволяющих получить высокий эффект от применения в производстве бетона и железобетона, следует отнести микрокремнезем.

Он образуется при производстве ферросилиция на электрометаллургических комбинатах в сухих газоочистках, имеет до 95 процентов SiO_2 и высокую дисперсность, составляющую 20000 кг/м^2 . Рациональное содержание микрокремнезема в составе бетона составляет 8–14 процентов [62].

Известен опыт Челябинского комбината строительных материалов по введению микрокремнезема в бетонную смесь. Доставка микрокремнезема на комбинат осуществлялась в виде пульпы в автобетоносмесителях, доводилась в специальной емкости до плотности раствора $1080 - 1100 \text{ кг/м}^3$ и пневмокамерными насосами по трубопроводам транспортировалась в БСУ [57]. При такой схеме подачи пылевидных материалов, которая может быть распространена и на другие отходы, например, золы и золошлаки ТЭС, исключаются выбросы пыли, что способствует улучшению условий охраны труда и дает экологический эффект. Использование микрокремнезема позволяет экономить до 30 процентов цемента, получать высокопрочные бетоны с прочностью 100 МПа и более, исключать тепловую обработку для бетонов класса В 15 и В 25 (М 200 – М 300), а также получать бетоны с повышенной сульфатостойкостью и водонепроницаемостью, что особо важно при изготовлении железобетонных труб, резервуаров, бассейнов, строительства дамб и т.п. Использование микрокремнезема с применением химических добавок, например ускорителя твердения сульфата натрия, исключает образование возможных высолов за счет щелочного взаимодействия аморфного кремнезема и сульфата натрия с уплотнением структуры [67].

Для экономии цемента в низкопрочных тяжелых и легких бетонах могут быть использованы феррохромовые шлаки электрометаллургических комбинатов, имеющие дисперсность $200 - 300 \text{ м}^2/\text{кг}$. При введении этих шлаков в количестве $100 - 200 \text{ кг/м}^3$ в бетонную смесь для шлакоблоков и легких бетонов обеспечивается экономия цемента до 25 процентов [34]. Эти шлаки могут успешно использоваться также для приготовления подвижных самотвердеющих смесей на литейных заводах, для бесцементных кладочных

растворов, в стекольной промышленности, в агропроме для известкования кислых почв.

Опыт использования для экономии цемента в бетоне активных минеральных добавок, таких, как золы ТЭС сухого отбора, а также на основе вскрышных пород, например, оксидов, пипаритов и других, показал, что такие добавки должны поставляться потребителю со стабильными свойствами и в первую очередь с оптимальной дисперсностью, что требует создания специальных мощностей по их обогащению, хранению и транспортировке [35].

Массовая утилизация золошлаковых отходов ТЭС имеет особо важное значение. В настоящее время количество отходов ТЭС в золоотвалах РФ составляет более 1 млрд. тонн. Золоотвалы занимают значительные площади пахотных земель, ухудшают экологическое состояние окружающей среды. Площади золоотходов крупных ТЭС превышают 30 тысяч гектаров и могут занимать площади в сотни гектаров [56]. Необходимо принятие крупных мер на межгосударственном уровне для решения проблемы утилизации золошлаковых ТЭС.

Обеспечение оптимизации гранулометрического состава многокомпонентного цемента позволяет экономить до 15 – 25 процентов портландцемента с улучшением ряда эксплуатационных характеристик бетона. Производство активных минеральных добавок с оптимальной дисперсностью может быть обеспечено за счет измельчения в струйных, вибрационных мельницах, а в случае использования дисперсных материалов - зол или золошлаковых отходов ТЭС [57].

Для гидрокласификации золошлаков на фракции может быть использовано обогатительное оборудование, применяемое для гидрокласификации мелкозенистых материалов - песка, каолина, талька и других, в том числе гидрогрохоты, гидроциклоны, центрифуги, радиальные отстойники и тонкослойные сгустители.

Заслуживают внимание конические гидрогрохоты и тонкостолойные смесители ВНИПИИстромсырье [85]. Конические гидрогрохоты могут

применяться для отделения от золошлаков зерен крупнее трех или одного миллиметра, а тонкослойные сгустители осуществлять разделение золы на требуемые фракции. Комбинация этих аппаратов позволяет создать эффективную технологическую линию по разделению золошлаков на нужное количество фракций. Экспериментальная линия была создана ВНИИИстромсырье на Обуховском ОПП для разделения золошлаковых материалов на три фракции и подтвердила эффективность применения этих аппаратов.

Развитие производства бесцементных шлакощелочных бетонов на основе отходов химической промышленности, и отходов металлургии за счет вовлечения доменных, сталеплавильных электротермофосфорных шлаков и шлаков цветной металлургии открывает огромные потенциальные возможности экономии портландцемента и обеспечения энергоресурсосбережения отрасли [19].

Значительный эффект – многократное снижение энергоемкости, себестоимости и кап. затрат обеспечивает технология получения бесклинкерного шлакощелочного цемента на основе переработки металлургических шлаков путем помола доменного шлака до порошкообразного состояния с добавлением щелочной субстанции – химического активизатора в количестве 2 – 5 процентов [60].

В целях экономии природного сырья, снижения расхода энергии, трудовых затрат, улучшения охраны окружающей среды и решения экологических проблем, возникающих при добыче нерудных материалов, а также для ликвидации дефицита необходимых заполнителей и повышения качества бетона, насущной необходимостью является применение заполнителей из отходов [58]. Это вызвано еще и тем, что имеет место преобладание песков мелкой крупности. А это требует импортной закупки и заполнения дефицита средних и крупных заполнителей, так как использование мелкого песка приводит к перерасходу цемента, снижению морозостойкости и

долговечности конструкций, ухудшению деформативных характеристик бетона.

4 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения предела прочности при сжатии и плотности из блоков ячеистого бетона изготавливали образцы 15x15x15 см, испытания проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 10180[93]. Предел прочности рассчитывали по формуле:

$$R=N \cdot 10/A, \quad (4.1)$$

где R – предел прочности при сжатии, МПа; N – разрушающая нагрузка, кН; A – площадь образца, см².

Плотность образцов рассчитывали по формуле:

$$\rho=M/V, \quad (4.2)$$

где ρ – плотность образца, кг/м³; M – масса образца, кг; V – объём образца, м³.

Теплопроводность определяли по ГОСТ 7076–99[92].

Сущность метода заключается в создании стационарного теплового потока, проходящего через плоский образец определенной толщины и направленного перпендикулярно к лицевым (наибольшим) граням образца, измерении плотности этого теплового потока, температуры противоположных лицевых граней и толщины образца.

Число образцов, необходимое для определения эффективной теплопроводности или термического сопротивления, и порядок отбора образцов должны быть указаны в стандарте на конкретный материал или изделие. Если в стандарте на конкретный материал или изделие не указано число образцов, подлежащих испытанию, эффективную теплопроводность или термическое сопротивление определяют на пяти образцах.

Температура и относительная влажность воздуха помещения, в котором проводят испытания, должны быть соответственно (295 ± 5) К и (50 ± 10) %.

Коэффициент конструктивного качества (К.К.К.) рассчитывали по формуле:

$$К.К.К.=R/\rho, \quad (4.3)$$

где К.К.К. – коэффициент конструктивного качества; R – прочность на сжатии образца, МПа; ρ – плотность образца, кг/м³.

Для оценки достоверности полученных результатов вычисляли коэффициент вариации V_m . При контроле по образцам среднее квадратическое отклонение в партии (S_m) при числе единичных значений в партии n больше шести определяется по формуле:

$$S_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - R_m)^2}{n-1}}, \quad (4.4)$$

где R_i – единичное значение отклика; R_m – среднее значение отклика.

Если число единичных значений в партии составляло от двух до шести, значение S_m вычисляли по формуле:

$$S_m = \frac{W_m}{\alpha}, \quad (4.5)$$

где W_m – размах единичных значений отклика в контролируемой партии, определяемый как разность между максимальным и минимальным единичными значениями; α – коэффициент, зависящий от числа единичных значений (n).

Значения α приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Значения коэффициента α

Число единичных значений	n	2	3	4	5	6
Значение коэффициента	α	1,13	1,69	2,06	2,33	2,5

Коэффициент вариации в партии (V_m) в процентах вычисляют по формуле:

$$V_m = \frac{S_m}{R_m} \cdot 100, \quad (4.6)$$

Достоверность научных выводов и результатов работы обеспечена применением стандартных методов и поверенного оборудования при испытании материалов в условиях аттестованной лаборатории, использованием адекватных математических моделей и их анализом, необходимым числом образцов в серии для обеспечения доверительной вероятности результатов испытаний, равной 0,95. Значение доверительного интервала рассчитывали по формуле:

$$\Delta R = \sigma \cdot S_m. \quad (4.7)$$

При этом σ принимали равным 2, что соответствует достоверности 95 %, традиционно используемой в технике [95].

5 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОЗАВИСИМОСТЕЙ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

Цель данного исследования состояла в исследовании возможности использования легких бетонов в резком континентальном климате с высокими температурами в течение дня и низкими ночью, особенность резко континентального климата заключается в высокой температуре днем и низком температурном режиме ночью.

Лёгкие бетоны – группа бетонов с объёмной массой менее 2000 кг/м³. К ней относятся бетоны на пористых заполнителях (керамзитобетон, аглопоритобетон, перлитобетон), бетоны на лёгких органических заполнителях (арболит, костробетон, полистиролбетон) и ячеистые бетоны (пенобетон, газобетон). В качестве вяжущих могут быть использованы цемент, гипс, магнезиальный цемент.

Легкий бетон должен иметь:

- низкий коэффициент теплопроводности (для защиты от тепла летом и холода зимой);
- быть низкой плотности и высокопрочными;
- иметь высокую теплоемкость.

Наиболее важным компонентом в структуре – является пористость бетона, она имеет большое значение для прочности бетона.

Применяются лёгкие бетоны как конструкционные или теплоизоляционные материалы, обладая небольшой массой и стоимостью относительно тяжёлых бетонов.

Заметим, что в таблице 5.1 тестировали четыре различных образца из ячеистого бетона с различной плотностью, два автоклавного и два неавтоклавного твердения определяли плотность, прочность на сжатие, теплопроводность и теплоемкость, а также рассчитывали коэффициент конструктивного качества (К.К.К.).

По ГОСТ 25820-2014 Бетоны легкие. Технические требования и по результатам испытаний (бетон D600) с прочностью на сжатие (4.8 МПа) и

коэффициентом качества конструктивного (К.К.К.)=0.8 является лучшим конструкционно-теплоизоляционным материалом, но четвертый образец (D300) с плотностью 345 кг/м³, теплопроводностью (0,09 Вт/м·°С), и теплоёмкостью (289,8 кДж/м³·с) является оптимальным для теплоизоляции в резком континентальной климате.

Таблица 5.1- Результаты испытаний образцов ячеистого бетона

Тип блока, D	Плотность, кг/м ³ , ρ	Предел прочности при сжатии, МПа	Теплопроводность, Вт/м·°С, λ	Теплоемкость, кДж/м ³ ·с	Коэффициент конструктивного качества К.К.К.
D600	607	4,86	0,310	504	0,800
D500	532	3,55	0,100	446	0,660
D500	585	1,87	0,231	490	0,320
D300	345	0,60	0,090	290	0,173

На основе данных, представленных в таблице 5.1, были построены зависимости теплопроводности и коэффициента конструктивного качества от плотности. Зависимости представлены на рисунках 5.1 и 5.2.

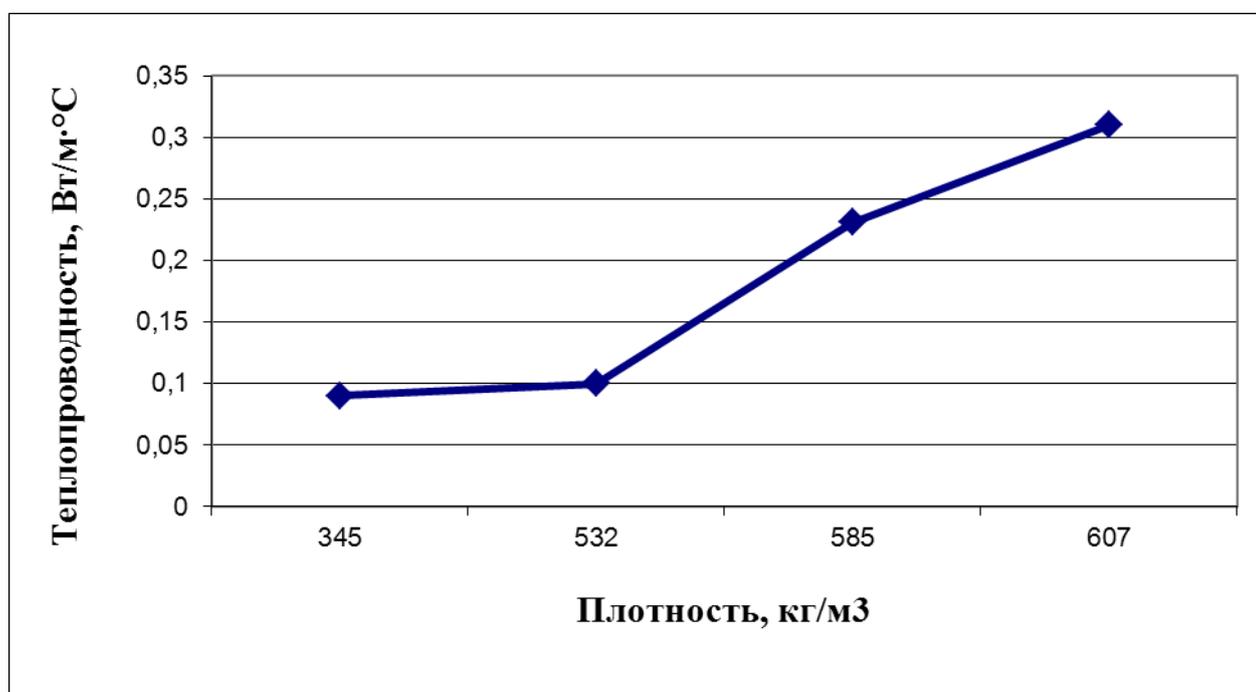


Рисунок 5.1 – Соотношения между теплопроводность и плотность легкого бетона

Учитывая взаимосвязь между теплопроводностью и плотностью легкие бетоны, установлено, что чем выше плотность легкого бетона, тем больше теплопроводность.

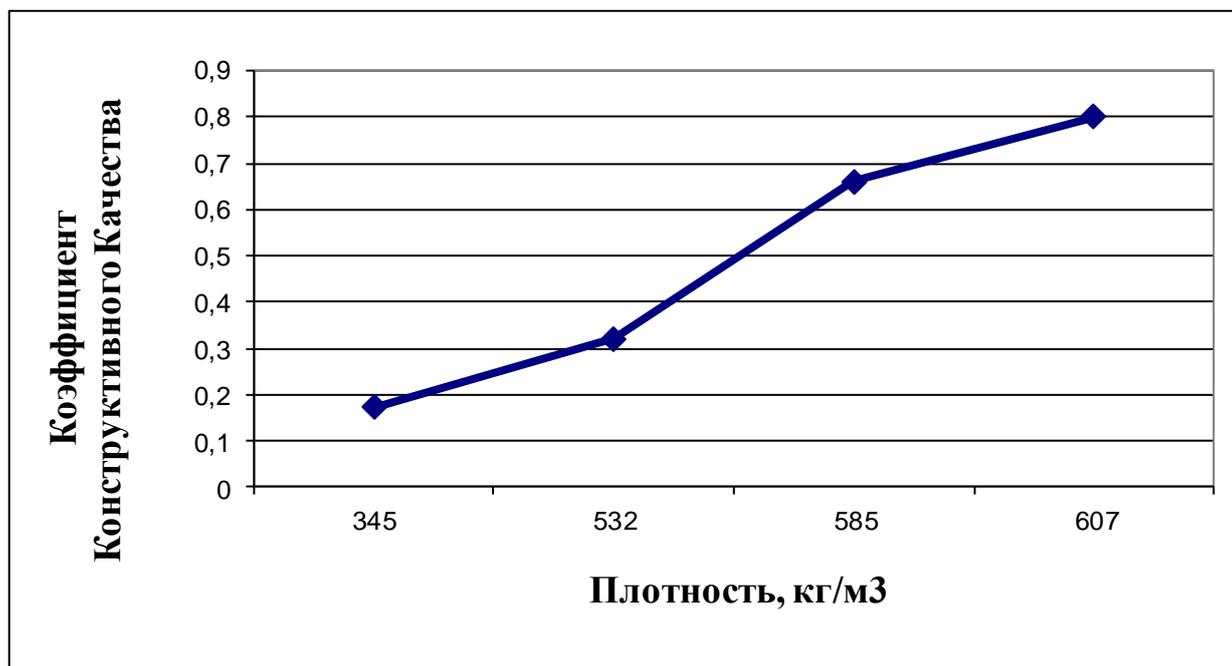


Рисунок 5.2 – Соотношение между плотность и коэффициент конструктивного качества

Учитывая взаимосвязь между плотностью легкие бетоны и коэффициентом качества конструкции, чем выше плотность легкого бетона, тем выше коэффициент качества конструкции.

Выводы по работе:

- Установлено, что заполнители для производства легких бетонов в условиях жаркого климата должны иметь низкую плотность, повышенную прочность, в качестве вяжущего наиболее эффективно использовать быстротвердеющий цемент;
- Выявлено, что для легких бетонов в условиях жаркого климата применяются специальные методы по уходу за бетоном, технологические приемы, позволяющие снизить температуру бетонной смеси, целесообразно использовать солнечную энергию для ускорения процессов твердения и набора прочности;
- Выявлено что теплопроводность и плотность пропорциональны друг другу;
- Установлено, что с увеличением плотности бетона, повышается его ККК, т.е. эффективность как конструкционного материала;
- Выявлено, что экономическая эффективность применения легких бетонов на заполнителях из каменных отходов и рыхлых пористых пород вулканического и осадочного происхождения обуславливается их меньшей стоимостью в сравнении с тяжелыми и искусственными пористыми заполнителями, снижением веса заполнителей, изделий и конструкций, уменьшением капитальных вложений на их производство и транспортных расходов при их перевозке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамова Е.В., Будадин О.Н. Интегрированный тепловизионный контроль фактических теплотехнических показателей зданий // Строительные материалы. – 2004.–№. 7. – С. 10–13.
2. Алексеева В. Перспективы производства и использования вспученного перлита в качестве наполнителя для легкого бетона // Строительные материалы. – 2006. № 6. – С. 74 – 77.
3. Баженов Ю.М., Король Е.А., Ерофеев В.Т., Митина Е.А. Ограждение конструкций с использованием бетонов с низкой теплопроводностью. - М: АСВ, 2008.–319 с.
4. Баринова Л.С., Куприянов Л.И., Миронов В.В. Современное состояние и перспективы развития строительной отрасли в России // Строительные материалы. - 2004. – № 9. – С. 2 – 7
5. Бегулев С.А. Опыт снижения требований к теплотехнике для строительства конвертов в северо–западном регионе Российской Федерации // Строительные материалы. - 2007. – № 2. – С. 18–19.
6. Бернацкий А.Ф. Легкий бетон на основе алюмосиликатных микросфер из золы / Бетон и железобетон в третьем тысячелетии: Спички третьего сорта. Sci. Conf. Ростов–на–Дону: РГСУ, 2004. – С. 92 – 98.
7. Беров Я.И., Петров с.И., Дудко П.Г., Наседкин В.В. Некоторые аспекты использования перлитового бетона в строительстве // Строительные материалы. – 2006.– №. 6.– С. 82–83.
8. Бештоков Б.Х. Бетоны с компенсированной усадкой на природных пористых заполнителях Кабардино–Балкарии для зимнего бетонирования: Автореферат. Дисс. Канд. Техн. Наук, Ростов–на–Дону: РГСУ, 2006. – 23 с.
9. Бикбау М.Я. Новые технологии, конструкции и материалы для высотных зданий // Строительные материалы. - 2006. – № 5. – С. 47 – 50.
10. Блещик Н.П., Лазарашвили М.Г. Технология производства изделий из крупнопористого легкого бетона // Строительные материалы. - 2004. – № 11.– С. 35–37.

11. Бремнер Т.Ю., Ярмаковский В.Н. Легкий бетон – состояние и перспективы // Науч. Тр. 2-я Всероссийская. (Интерн.). На бетон и железобетон. 5–9 сентября 2005 г., Т. 1. – М.: Дипак, 2005. С. 65 – 82.

12. Брюссер М.И. Наполнители для бетона: современные требования к качеству // Сборка, матер. - 2004. – № 10. – С. 62 – 63.

13. Вяалис С.А., Гнип И.Я., Кершулис В.И. Равновесное удельное влажность теплоизоляционных изделий из стекловолокна и минеральной ваты // Строительные материалы. - 2002. – № 5. – С. 40 – 42.

14. Вейалис С.А., Каминкас А.Ю., Гнип И.Я., Кершулис В.И. Теплопроводность влажных плит из стекловолокна и минеральной ваты // Строительные материалы. - 2002. – № 6. – С. 38 – 40.

15. Вытчиков Ю.С. Определение плоскости конденсации для многослойных ограждающих конструкций // Строительные материалы. - 2006. – № 4. – С. 92–94.

16. Гагарин В.Г. Теория состояния и транспорта влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий: Автореферат. Дис. , Доктор технических наук. 05.23.01, 05.23.03.–М .: NIISF, 2000.–43 с.

17. Гагарин В.Г., Менетцев И.А., Ивакин Ю.Ю. Сорбция водяного пара материалами теплоизоляционных плит производства ООО «УРСА Евразия» // Строительные материалы. - 2007. – № 10. – С. 50–53.

18. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Расчет сопротивления теплопередаче фасадов с вентиляционным воздушным зазором // Строительные материалы. – 2004. - № 7.– С. 8–9.

19. Галкин С.Л. Строительство обволакивающих сооружений как средство обеспечения комфорта и безопасности строительства // Строительная наука и техника. – 2007.–№ 5. – С. 91–98.

20. Горин В.М., Токарева С.А., Кабанова М.К. Расширенная глина: опыт и перспективы развития производства и использования // Строительные материалы. - 2004. – № 11.– С. 32–34.

21. Горин В.М. 45 лет керамзиту в строительном комплексе России. – Строительные материалы. - 2006. – № 10. – С. 76 – 78.

22. Гришин Н.Н., Белогурова О.А., Иванова А.Г. Экспериментально проведено теоретическое исследование теплопроводности и ее влияние на термическую устойчивость беспорядочно–стеритовых огнеупоров // Огнеупоры и техническая керамика. – 2003. – № 12. – С. 4 – 15.

23. Гудков Ю.В., Ахундов А.А., Леонтьев Е.Н., Тяжлова В.Н. Трехслойные легкие панели изолированные слоем пенополистиролбетона // Строительные материалы. - 2004. – № 11. – С. 38 – 39.

24. Гусев Б.В., Лещиков В.А., Шембаков В.А., Торопьев А.К. К новому уровню жилищного строительства // Жилищное строительство. – 2003. – № 12. – С. 5–6.

25. Дамдинова Д.Р., Хардаев П.К., Карпов Б.А., Зонхийев М.М. Технологические методы получения вспененного стекла с регулируемой пористой структурой // Строительные материалы. – 2007. № 3. – С. 68 – 69.

26. Дворкин О.Ю. Об унифицированном физическом подходе к проектированию тяжелых и легких бетонов // Бетон и железобетон. - 2003. – № 6. – С. 13 – 15.

27. Дегтярев В.В. Прочность адгезии периодического профиля армирования с классами прочности бетона 10 В 100 // Бетон и железобетон. – 2005. – № 6.–С. 13 – 18.

28. Денисов А.С., Пичугин А.П. Оптимизация легкого бетона структурно–деформирующими и теплофизическими показателями // Строительные материалы. – 2006.– №4.– С. 90 – 91.

29. Довжик В.Г. Расчет и нормирование теплопроводности керамзитобетон и другие виды бетонов // Бетон и железобетон. - 2007. – № 5. – С. 15 – 19.

30. Емельянов А.Н. Особенности технологии керамзита для однослойных стеновых панелей // Строительные материалы. - 2000. – № 11. – С. 32 – 33.

31. Емельянов А.Н. Теплопроводность керамзита и песка // Строительные материалы. 2002. – № 11. – С. 38 – 39.

32. Ерохина Л.А., Вериаскина Е.М., Турубанов О.А. Сравнительный анализ смачивания ограждающих конструкций при эксплуатации зданий на Севере // Строительные материалы. - 2004. – № 8. – С. 50–53.

33. Жильникова Т.Н. Прогноз прочности, усадки и ползучести цементных бетонов на основе измерений в раннем периоде: Автореферат. Дисс. , Канд. Tech. Наук. Ростов–на–Дону: РГСУ, 2006. – 24 с.

34. Звездов А.И., Тамов М.Ч. Применение энергоэффективного заполнителя в бетонах // Бетон и железобетон. – 2004. № 5. – С. 2 – 4.

35. Казанцева Л.К., Верещагин В.И., Овчаренко Г.И. Вспененные стеклокерамические теплоизоляционные материалы из природного сырья // Строительные материалы. – 2001. - № 4. – С. 33 – 34.

36. Кетов А.А., Конев А.В., Саулин Д.В. Тенденции в развитии технологии пенного стекла // Строительные материалы. – 2007. - № 9. – С. 28 – 31.

37. Кетов А.А., Пузанов И.С., Саулин Д.В. Опыт производства пеноматериалов из стеклобоя // Строительные материалы. – 2007. - № 3. – С. 70 – 72.

38. Киселев И.Я. Зависимость теплопроводности современных теплоизоляционных строительных материалов от плотности, диаметра волокон или пор, температуры // Строительные материалы. - 2003. – № 7. – С. 17 – 18.

39. Кокоев М.Н. Вакуумное вспененное стекло – перспективный теплоизолятор // Строительные материалы. – 2004. – № 9. – С. 42–43.

40. Комиссаренко Б.С. Перспективы развития производства керамзитобетона и керамзитобетона с учетом текущих проблем строительной отрасли // Строительные материалы. - 2000. – № 6. – С. 22–23.

41. Коренкова С.Ф., Петров В.П., Максимов Б.А. Физико–механические свойства шлаги и шлакобетонного бетона // Строительные материалы. – 2002.– № 10.– С. 20–21.

42. Коренкова С.Ф., Сухов В.Ю., Веревкин О.А. Принципы формирования структуры ограждающих конструкций с использованием заполненных пенных тонов // Строительные материалы. - 2000. - № 8. - С. 29–32.

43. Корниенко С.В. Характеристика состояния влаги в материалах ограждающих конструкций зданий // Строительные материалы. - 2007. - № 4. - С. 74–75.

44. Корниенко С.В. Влажный потенциал для определения влажности наружных ограждающих материалов в неизотермических условиях // Строительные материалы. - 2006. - № 4. - С. 88 – 89.

45. Кошкарров В.В., Левин А.В., Дворкина Е.И. Производство тепловых наружных стеновых панелей для жилых зданий в северо–западном регионе // Строительные материалы. - 2000. - № 6. - С. 4–6.

46. Кудяков А.И., Радина Т.Н., Свергузова Н.А. Технология получения светлозернистого материала // Строительные материалы. - 2002. - № 10. - С. 34.

47. Кулаева Н.С., Гаркави М.С. Пеностекло из стеклобоя // Строительные материалы. - 2007. - № 3. - С. 74.

48. Лотов В.А. Перспективные теплоизоляционные материалы с жесткой структурой // Строительные материалы. 2004. - № 11. - С. 8–9.

49. Лузин В.П., Корнилов А.В. Эффективные теплоизоляционные материалы для строительной отрасли // Строительные материалы. - 2004. № 5. - С. 26–27.

50. Матанцев с.В. Трехслойная панель с изоляцией из экстрадированной пенополистирольной пены STYROFOAM system «STAYRODOM» / Разработка бетона и железобетонных конструкций: Scientific. Tr. Conf. – М.: НИИВ, 2005. – т. 2. – С. 190 –194.

51. Матросов Ю.А., Ярмаковский В.Н. Энергоэффективность зданий в комплексном использовании модифицированных легких бетонов // Строительные материалы. –2006. - № 1. - С. 19–21.

52 Мисников О. А., Гамаюнов С. Н. Полый заполнитель для легкого бетона на основе торфа и минерального сырья // Строительные материалы. – 2004. - № 5. – С. 22 – 24.

53. Митина Е.А. Стеновые панели на основе скелетного бетона / Новые научные направления материаловедения: Акад. Чтение RAASN. – Белгород, 2005.–т. 2. С. 34–41.

54. Наседкин В.В. Перлит в качестве наполнителя из легкого бетона // Строительные материалы. - 2006. – № 6. – С. 70–73.

55. Научно–техническая конференция «Строительная физика в XXI веке» // Под ред. И.Л. Шубина. - 2006. – № 10. – С.74 – 75.

56. Несветаев Г.В. Модуль эластичности бетона / Цемент, бетон, раствор и сухая смесь. Часть I: Реф. Издание Жилец Комохи. S.–Pb.: «Профессиональная» НПО, 2007. – С. 282–298.

57. Несветаев Г.В. Ползучесть бетона / Цементы, бетоны, растворы и сухие смеси. Часть I: Реф. Издание Жилец Комохи. S. – Pв: «Профессиональная» НПО, 2007. – С. 310–322.

58. Несветаев Г.В. Усадка цемента и бетона / Цементы, бетоны, растворы и сухие смеси. Часть I: Реф. Издание Жилец Комохи. – S.–Pb.: НПО «Профессионал», 2007. - С. 299 – 309.

59. Ожгибзов Ю.П. Теплые стеновые панели и блоки для второго этапа новых теплотехнических норм в существующих металлоконструкциях // Строительные материалы. - 2000. – № 2. – С. 12–14.

60. Ожгибсов Ю.П. Теплоэффективные промышленные конструкции для регионов с суровыми природными и климатическими условиями // Строительные материалы. - 2000. – № 4. – С. 23 – 25.

61. Опекунов В. В. Прочность, однородность и анизотропия свойств пористых бетонов // Строительные материалы. –2006. –№ 11.–С. 17–21.

62. Опекунов В.В. Конструкционно– теплоизоляционные бетоны. К.: Ака–демперидика. – 2002. – 270 с.

63. Орендлихер Л.П. Безобжиговый композиционный пористый наполнитель из влажных асбестоцементных отходов и легкие бетоны на его основе // Строительные материалы. - 2000. – № 7. – С. 18–19.

64. Пак А.А., Сухорукова Р.Н., Андреев Д.А., Цирлин А.М. Передача влаги в многослойных изделиях из полистирол–гальванизированного бетона // Строительные материалы. - 2007. - № 6. – С. 48 – 49.

65. Пак А.А., Сухорукова Р.Н., Гришин Н.Н. Составные изделия из полистирол–гальванизированного бетона и обоснование зависимости их теплопроводности от плотности и ламинирования материала // Строительные материалы. – 2006. - № 6.–С. 28–30.

66. Песцов В.И., Оцоков К.А., Вылегжанин В.П., Пинскер В.А. Эффективность использования ячеистого бетона в строительстве России // Строительные материалы. - 2004. – № 3. – С. 7–8.

67. Петров В.П. Пористые наполнители для стеновых панелей / Современное состояние и перспективы развития строительных материалов: Восьмой акад. Счен. РАСНН: Самара, 2004. С. 399 – 402.

68. Погребинский Г.М., Искоренко Г.И. Зернистое вспененное стекло в качестве перспективного изоляционного материала // Строительные материалы. –2003.–№3.–С. 28–29.

69. Сальников В.Б. Свойства минеральной ваты после длительной эксплуатации в стенах зданий на Среднем Урале // Строительные материалы. – 2003.–№ 3. - С. 42–43.

70. Сапелин Н.А., Бурянов А.Ф., Бортников А.В. Зависимость прочности бетона от неорганических связующих при средней плотности // Строительные материалы. - 2001. – № 6. – С. 36 – 38.

71. Сахаров Г.П., Курнышев Р.А., Эффективная изоляция из неавтоклавно пористого бетона для ограждающих конструкций зданий // Бетон и железобетон. –2004. № 1. – С. 2 – 5.

72. Седин С.С. Тепловые условия открытых жилых домов с керамзитобетонной изоляцией с дополнительной изоляцией // Строительные материалы. - 2007. - № 6. – С. 52 – 53.

73. Семченков А.С., Семечкин А.Е., Литвиненко Д.В., Антонов И.М., Гагарина О.Г. Прогрессивное несущее ограждение на основе минеральных материалов // Бетон и железобетон. - 2003. – № 1. – С. 2 – 4.

74. Семченков А.С., Семечкин А.Е., Литвиненко Д.В. Комплексный подход к проектированию наружных стен / Путь развития бетона и железобетона: Науч. – М.: НИИВ, 2005. – т. 2. – С. 211 – 222.

75. Семченков А.С., Ухова Т.А., Сахаров Г.П. О регулировании равновесного содержания влаги и теплопроводности ячеистого бетона // Строительные материалы. – 2006. - № 6. – С. 4 – 7.

76. Симагин В.А., Платонов И.Н. К проблеме технического перевооружения сборных железобетонных предприятий Новосибирской области // Строительные материалы. 2002. – № 7. – С. 22–27.

77. Симонов М.З., Саркисян П.П. Исследование бетонов на основе гранулята из пеностекла. Отчет исследовательской работы. - М.: Стройиздат, 1973. - 370 с.

78. Славчева Г.С., Чернышов Е.М., Коротких Д.Н., Кухтин Ю.А. Сравнительные характеристики одно– и двухслойных стеновых газосиликатных конструкций // Строительные материалы. – 2007. - № 4. – С. 13–15.

79. Строительные материалы: учебно- справочное пособие / Под ред. Г.А. Айрапетова, Г.В. Несветаева. – Ростов н/Д.: Феникс, 2004 – 608 с.

80. СП 23 101 – 2004 Проектирование тепловой защиты зданий.

81. Теплоэффективные конструкции наружных стен зданий, используемых в проектной и строительной практике Республики Башкортостан // Строительные материалы. - 2006. – № 5. – С. 43 – 46.

82. Тер-Петросян П.А., Саакян Е.Р., Восканян А.Л., Восканян Р.Л. Разработка конструкционного пеностекла из гранулята. // Технологии бетона. – 2006.–№. 2.– С. 12–14.

83. Тихонов И.Н., Мешков В.З., Судаков Г.Н. О нормировании анкерного крепления стержневой арматуры // Бетон и железобетон. – 2006. - № 3. – С. 2.

84. Тихонов Ю.М., Коломиец И.В. Аэрированные легкие бетоны и растворы с высокопористыми наполнителями // Строительные материалы. - 2004. – № 11.– С. 20–22.

85. Шох Т., Рымар Р. Исследование эксплуатационной влажности ячеистого бетона // Строительные материалы. – 2006. - № 11. – С. 22–23.

86. Чиненков Ю.В. Расчет железобетонных трехслойных ограждающих конструкций из легкого бетона // Бетон и железобетон. - 2007. – № 6. – С. 7.

87. Федосов С.В., Мизонов В.Е., Баранцева Е.А., Грабар Ю.Г., Новинский И.В., Фоломеев Д.Ю. Моделирование нагрева стеновых панелей во время термообработки // Строительные материалы. – 2007. - № 2. – С. 86 – 87.

88. Федосов С.В., Ибрагимов А.М. Нестационарный теплоперенос в многослойных ограждающих конструкциях // Строительные материалы. – 2006. - № 4. – С. 86 – 87.

89. Хихлуха Ю.И. Реализация Национального проекта «Доступное и комфортное жилье для граждан России» требует всестороннего научно–экономического исследования // Строительные материалы. – 2006. – № 4. – С. 4 – 8.

90. Юрков О.И., Кудревич О.О., Гончарик В.Н., Гарнашевич Г.С. О теплотехнических характеристиках клееного автоклавного упрочняющего силиката газа // Строительные материалы. - 2004. – № 3. – С. 42 – 43.

91. Несветаев Г.В. О критерии трещиностойкости бетона / Наука, технология и технология XXI века (НТТ 2007) / Научно–технич. – Нальчик, 2007. – Т.2 – С. 18 – 23.

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

93.ГОСТ 10180. Методы определения прочности по контрольным образцам.

94.ГОСТ 12730.1-78. Бетоны методы определения плотности.

[95.Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / А.Я. Вентцель.](#) – М.: Наука, 1969. – 576 с.