

# Легкий ячеистый бетон для геотехнических применений



National Concrete Pavement  
Technology Center



IOWA STATE  
UNIVERSITY  
Institute for  
Transportation

## О центре CP Tech Center

Миссия Национального технологического центра бетонных покрытий (CP Tech Center) в Университете штата Айова состоит в том, чтобы объединить ключевые заинтересованные стороны в сфере транспорта вокруг главной цели - продвижения технологии бетонных покрытий посредством исследований, передачи технологий и внедрения технологий.

## О СПС

Портлендская цементная ассоциация (PCA) - это некоммерческая организация, основанная в 1916 году, которая обслуживает американских производителей цемента посредством политики, исследований, образования и анализа рынка. Члены PCA представляют 91% мощностей по производству цемента в США и имеют предприятия во всех 50 штатах. PCA способствует безопасности, устойчивости и инновациям во всех аспектах строительства, способствует постоянному совершенствованию производства и распределения цемента и в целом способствует экономическому росту и надежным инвестициям в инфраструктуру.

### Отказ от ответственности

Ни Университет штата Айова, ни Портлендская цементная ассоциация, ни авторы, редакторы, дизайнеры, иллюстраторы, дистрибьюторы или технические консультанты этого документа не делают никаких заявлений и не дают никаких гарантий, явных или подразумеваемых, в отношении точности приведенной здесь информации и не несут ответственности за любые неточности.

Эта публикация предназначена исключительно для повышения квалификации квалифицированных специалистов. Эта публикация должна использоваться только квалифицированными специалистами, которые обладают всеми необходимыми лицензиями, которые компетентны оценивать значимость и ограничения информации, представленной в ней, и которые принимают на себя полную ответственность за применение этой информации.

Университет штата Айова не допускает дискриминации по признаку расы, цвета кожи, возраста, этнической принадлежности, религии, национального происхождения, беременности, сексуальной ориентации, гендерной идентичности, генетической информации, пола, семейного положения, инвалидности или статуса ветерана США. Запросы относительно политики недискриминации можно направлять в Управление равных возможностей, 3410 Beardshear Hall, 515 Morrill Road, Ames, Iowa 50011, телефон: 515-294-7612, горячая линия: 515-294-1222, электронная почта: eooffice@iastate.edu .

### Об этом руководстве

Этот документ, *Руководство по легкому ячеистому бетону для геотехнических применений*, предоставляет информацию о материалах, свойствах, конструкции, правильном обращении и применении легкого ячеистого бетона (LCC) для геотехнических применений.

Хотя этот документ может не касаться всех конкретных деталей проекта, он предоставляет информацию для специалистов-строителей и инженеров-проектировщиков по использованию LCC в геотехнических приложениях, включая общие применения, концептуальные рекомендации и рекомендации по проектированию. Приложения, представленные в этом руководстве, продемонстрировали хорошую долгосрочную производительность, предлагая экономичные решения, а также улучшенные и безопасные конструкции для проектов по всей Северной Америке.

Этот документ включает в качестве приложения в конце руководства спецификацию, охватывающую материалы, оборудование, строительные проверки и требования к испытаниям для строительства засыпок LCC.

### Справочная информация для этого руководства

Тейлор, С. и Г. Холстед. 2021 г. *Руководство по легкому ячеистому бетону для геотехнических применений*. Портлендская цементная ассоциация, Вашингтон, округ Колумбия, и Национальный технологический центр бетонных покрытий в Университете штата Айова, Эймс, штат Айова.

© 2021 Портлендская цементная ассоциация

### Авторы изображений на передней обложке

Вверху: Throop Lightweight Fill, используется с разрешения.

Центр: Cell-Crete Corporation, используется с разрешения.

Внизу: Portland Cement Association.

### Для дополнительной информации

Для получения технической помощи по поводу бетонных покрытий на основе цемента обращайтесь в Portland Cement Association или в Технический центр CP:

Грег Холстед, менеджер  
Тротуары и геотехнические рынки  
Portland Cement Association  
200 Massachusetts Avenue NW, Suite 200  
Вашингтон, округ Колумбия 20001  
847-972-9058  
[info@cement.org](mailto:info@cement.org)  
<https://www.cement.org/>

Питер Тейлор, директор  
Национальный технологический центр бетонных покрытий  
Государственный университет штата Айова  
2711 S. Loop Drive, Suite 4700  
Ames, IA 50010-8664  
515-294-5798  
[cpotech@iastate.edu](mailto:cpotech@iastate.edu)  
<https://cpotechcenter.org>

**Страница документации технического отчета**

<b>1. Отчет №</b> Специальный отчет PCA SR1008P	<b>2. Номер регистрации правительства.</b>	<b>3. Каталогный номер получателя.</b>	
<b>4. Название и подзаголовок</b> Руководство по легкому ячеистому бетону для геотехнических применений		<b>5. Дата отчета</b> Январь 2021 г.	
<b>7. Автор (ы)</b> Скотт Тейлор и Грег Холстед		<b>6. Код организации-исполнителя</b>	
<b>9. Название и адрес организации-исполнителя.</b> Национальный технологический центр бетонных покрытий Государственный университет штата Айова 2711 South Loop Drive, Suite 4700 Ames, IA 50010-8664		<b>8. Отчет организации-исполнителя №</b>	
<b>12. Название и адрес организации-спонсора.</b> Портлендская цементная ассоциация 200 Massachusetts Avenue NW, Suite 200 Вашингтон, округ Колумбия 20001		<b>10. Рабочий блок №.</b>	
<b>15. Дополнительные примечания.</b> Посетите <a href="https://cptechcenter.org">https://cptechcenter.org</a> , чтобы получить цветные PDF-файлы этой и других публикаций.		<b>11. Контракт или грант №</b>	
<b>16. Аннотация</b> Основная цель этого руководства - предоставить информацию о материалах, свойствах, конструкции, правильном обращении и применении легкого ячеистого бетона (LCC) для геотехнических применений.  LCC представляет собой смесь портландцемента и водной суспензии в сочетании с предварительно сформированной пеной для создания воздушных пустот, которые могут выступать в качестве прочной, легкой, долговечной и недорогой альтернативы грунту или замене засыпки для многих геотехнических применений. Легкость LCC снижает осадку грунта и улучшает несущую способность, а также статическую и сейсмическую устойчивость насыпей. Учитывая, что смесь LCC является очень текучей, ее можно эффективно и безопасно размещать в замкнутых или проблемных пространствах, таких как трубы, траншеи, туннели, засыпки стен и других местах, где рутинная укладка земляной засыпки затруднена, если не невозможна. Эти атрибуты делают LCC недорогим решением для многих геотехнических приложений.  Хотя этот документ может не касаться всех конкретных деталей проекта, он предоставляет информацию для специалистов-строителей и инженеров-проектировщиков по использованию LCC в геотехнических приложениях, включая общие применения, концептуальные рекомендации и рекомендации по проектированию. Приложения, представленные в этом руководстве, продемонстрировали хорошую долгосрочную производительность, предлагая экономичные решения, а также улучшенные и безопасные конструкции для проектов по всей Северной Америке.  Помимо прочего, в этом руководстве представлены примеры подготовки проекта смесей и установок в полевых условиях, геотехнической оценки, а также проектирования, строительства и полевых испытаний LCC. В этом руководстве рассматривается важность геотехнического надзора в начале проекта, на этапе проектирования смеси и во время строительства, чтобы гарантировать, что проект соответствует своему прямому назначению.		<b>13. Тип отчета и охватываемый период</b> Руководство	
<b>17. Ключевые слова</b> геотехнические решения - руководство по проектированию LCC - геотехнические примеры LCC - геотехническое руководство LCC - легкий ячеистый бетон		<b>14. Код спонсорского агентства</b>	
<b>19. Классификация безопасности (этого отчета) (этой страницы)</b> Несекретный. Несекретный.		<b>18. Заявление о распространении</b> Нет ограничений.	
<b>20. Классификация безопасности</b>		<b>21. Количество страниц</b> 58	<b>22. Цена</b> NA



# Руководство по легкому ячеистому бетону для геотехнических применений

Январь 2021 г.

## Авторы

Скотт М. Тейлор, ЧП

Грег Э. Холстед, ЧП, Портлендская цементная ассоциация

## Главный редактор

Оксана Гиземан

## Графический дизайн, верстка и производство

Алисия Хоерманн

## Редакторы

Сью Стокке и Питер Хансингер

При финансовой поддержке

© 2021 Портлендская цементная ассоциация

## Гид от

Национальный технологический центр бетонных покрытий

Государственный университет штата Айова

2711 South Loop Drive, Suite 4700

Ames, IA 50010-8664

Телефон: 515-294-5798 / Факс: 515-294-0467

<https://cptechcenter.org>



## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Благодарности</b> .....	viii	<b>Глава 3. Соображения по инженерно-геологическому проектированию</b> .....	20
<b>Управляющее резюме</b> .....	1	Уменьшение поселений / уменьшение веса .....	20
<b>Глава 1 Введение</b> .....	3	Метод расчета чистой нагрузки для снижения несущей способности осадки .....	20
<b>Фон из легкого ячеистого бетона</b> .....	3	Пробивные ножницы .....	23
<b>Определение LCC</b> .....	3	Плавучесть .....	24
Сфера применения данного руководства <b>Преимущества</b> .....	3	Основания тротуара и основания .....	26 год
<b>Приложения</b> .....	4	Подпорная стена Засыпка Грунт Давление .....	26 год
<b>Легкие дорожные основания и насыпи</b> .....	4	Дренаж .....	26 год
<b>Подъезд к мосту Насыпи Заполнение пустот и пустот</b> .....	5	<b>Глава 4. Дизайн смеси</b> .....	27
Заполнение заброшенных труб и водоотводящего канала Заливка цементного раствора в кольцевом пространстве .....	6	Ингредиенты .....	27
<b>Фундаментные заливки</b> .....	8	Портландцемент .....	27
<b>Системы блокировки энергии</b> .....	8	<b>Воды</b> .....	27
<b>Подпорные стены и сборные стеновые панели Легкие</b> .....	8	Воздух .....	28 год
<b>плотины и дамбы Структурные насыпи Ремонт оползней и стабилизация откосов Заполнение с контролируемой плотностью</b> .....	9	Пенообразователи .....	28 год
<b>плотностью</b> .....	10	Соотношение вода / цемент .....	28 год
<b>Глава 2. Физические свойства</b> .....	11	Пример конструкции смеси (метод проб и ошибок) .....	28 год
Свежая недвижимость .....	11	Подготовка лабораторных проб .....	30
Плотность литья .....	11	<b>Глава 5. Строительство</b> .....	32
Плотность на месте .....	11	Характеристики .....	32
Плотность сушки в духовке .....	11	Требования к собственности .....	32
<b>Вязкость</b> .....	12	Полевые наблюдения по подготовке земляного полотна и основания .....	33
Боковое давление жидкости .....	12	Армирование .....	33
Установить время .....	12	Транспорт .....	33
<b>Закаленные свойства</b> .....	13	Завершение размещения и консолидации .....	34
<b>Закаленное описание</b> .....	13	Поверхностная обработка .....	34
<b>Сила</b> .....	13	<b>Лечение и защита</b> .....	35 год
<b>Сцепление и модуль упругости по углу трения</b> .....	14	Погодные условия .....	35 год
Содержание воздуха .....	15	<b>Сроки</b> .....	35 год
Усадка при высыхании .....	15	Полевое оборудование .....	35 год
<b>Проницаемость / сорбция</b> .....	16	Пакетное смешивание .....	36
<b>Тепло гидратации</b> .....	16	Дозирование с высоким сдвигом .....	36
<b>Теплопроводность</b> .....	18	Шнековый смеситель / Мобильные объемные смесители Доставка цемента .....	37
<b>Устойчивость к агрессивным средам</b> .....	19	Комбинированные бетонные заводы .....	37

Насосные устройства .....	37
Насос с прогрессивным резонатором .....	38
Перистальтический насос .....	38
Поршневой насос .....	38

**Глава 6. Осмотр, тестирование и обслуживание**..... 39

Полевой контроль качества Испытания Полевой .....	39
контроль качества Наблюдение Инспекция и .....	40
испытания после строительства Испытания на .....	40
прочность при сжатии .....	41 год
Обслуживание .....	41 год

использованная литература .....

**Приложение. Руководство по устройству легкого ячеистого бетонного наполнителя**...45



## Цифры

Рисунок 1.1. Сравнение конструкции дорожного покрытия	4
Рисунок 1.2. Легкие дорожные основания и насыпи (Огайо)	5
Рисунок 1.3. Набережные подходов к мосту (Индиана) Рисунок 1.4. Заполнение пустот и полостей (Альберта)	5 6
Рисунок 1.5. Заполнение заброшенных труб и водопропускных труб (Мичиган)	6
Рисунок 1.6. Заливка затрубного пространства (штат Мэн)	7
Рисунок 1.7. Незакрепленные и залитые кольцевые пространства	7
Рис. 1.8. Фундаментные заливки (Флорида)	8
Рисунок 1.9. Системы блокировки энергии (Западная Вирджиния)	8
Рисунок 1.10. Укладка засыпки LCC за сборными стеновыми панелями (Калифорния)	9
Рисунок 1.11. Легкие структурные насыпи плотин и дамб (Калифорния)	9
Рисунок 1.12. Ремонт оползней и стабилизация откосов (Калифорния)	9
Рисунок 1.13. Заполнение с контролируемой плотностью Рис. 2.1. Везикулы / воздушные пустоты	10 13
Рисунок 3.1. Метод расчета чистой нагрузки для уменьшения осадки	21 год
Рисунок 3.2. Несущая способность и разброс сжимающих сил в LCC	23
Рисунок 3.3. Сопротивление продавливанию в слое LCC	24
Рис. 3.4. Соображения плавучести в слое LCC	25
Рисунок 4.1. Генератор готовой пены	31
Рисунок 5.1. Подготовленное земляное полотно в ожидании размещения ЖЦК 32 Рисунок 5.2. Сварная проволочная сетка в размещении LCC 33 Рисунок 5.3. Как пена вводится в готовую смесь Насосная система на базе автобетоносмесителя Рисунок 5.4.	34
Поверхность заливки ЖЦК на месте Рис. 5.5. Смеситель периодического действия	35 год 36
Рисунок 5.6. Мобильный объемный смеситель	36
Рисунок 5.7. Встроенная система пенообразования	37
Рисунок 5.8. Автобетоносмеситель Рисунок 5.9. Винтовой насос винтового типа	37 38
Рисунок 6.1. Отбор проб / тестирование LCC в полевых условиях (Мичиган)	39
Рисунок 6.2. Поверхность недавно размещенного ЖКУ	40
Рисунок 6.3. Неограниченное испытание прочности на сжатие LCC	41 год

## Таблицы

Таблица 2.1. Физические свойства LCC	13
Таблица 2.2. Углы трения и значения сцепления для LCC	14
Таблица 2.3. Модуль упругости отношения LCC	15
Таблица 2.4. Резюме испытаний на гидравлическую проводимость ячеистого бетона	16
Таблица 2.5. Расчетная теплоемкость и теплопроводность пенобетонных смесей, 300 кг / м <sup>3</sup> содержание портландцемента, мелкозернистый кварцевый песок	17
Таблица 2.6. Тепловые свойства LCC при разной плотности	18
Таблица 4.1. Типы портландцемента	27
Таблица 4.2. Смешанные типы гидравлического цемента	27
Таблица 4.3. Характеристики характеристик гидравлического цемента	27

## Благодарности

Авторы, Национальный центр технологии бетонных покрытий (CP Tech) и Портлендская цементная ассоциация с благодарностью признают вклад технических участников и членов Технического консультативного комитета (ТАС), которые помогли установить техническое направление для руководства и рассмотрели несколько проектов. Их отзывы и предложения были бесценны.

- Уэйн Адамс, Портлендская цементная ассоциация (ранее) \*
  - Стивен Бартлетт, Университет Юты \*
  - Стив Бент, SEMATRIX
  - Жак Блумфилд, Компания «Усиленные земли» \*
  - Тайлер Боднар, Цементная ассоциация Калифорнии и Невады
  - Тони Борглум, Richway Industries, Ltd.
  - Джесси Даунс, Strong Manufacturing
  - Милтон Гомес, Aerix Industries \*
  - Рэй Хенн, RW Henn LLC \*
  - Крейг Хркал, Cellular Concrete Inc. \*
  - Джон (Айк) Исааксон, Brierley Associates Corporation
  - Джеймс Крстулович, Департамент транспорта Иллинойса
  - Тарья Кюллонен, Группа безопасности взлетно-посадочной полосы
  - Роберто Монтемайор, Иллинойский университет в Урбане-Шампейн
  - Гордон Смит, Национальный технический центр CP \*
  - Нико Сутмоллер, Aerix Industries
  - Бинод Тивари, Калифорнийский государственный университет, Фуллертон \*
  - Тревор Тауэри, Elastizell Corporation of America \*
  - Диего Вильегас, Cell-Crete Corporation
  - Джефф Вайкофф, Цементная ассоциация Калифорнии Невада (ранее) \*
- \* Члены ТАК

## Управляющее резюме

Основная цель этого руководства - предоставить специалистам-строителям и инженерам-проектировщикам информацию о материалах, свойствах, конструкции, правильном обращении и применении легкого ячеистого бетона (LCC) для геотехнических применений, включая общие применения, концептуальное руководство и рекомендации по проектированию. В этом руководстве не рассматриваются свойства или использование LCC для систем кровельного настила, автоклавного ячеистого бетона для создания легких сборных железобетонных изделий или легкого конструкционного бетона для снижения собственных нагрузок на бетонные элементы. В этом руководстве также не обсуждается использование проницаемого ячеистого бетона низкой плотности или ячеистого бетона с плотностью сушки в печи более 50 фунтов / фут<sup>3</sup> (800 кг / м<sup>3</sup>).

Первоначально использовавшийся в качестве строительного продукта для систем полов как в Европе, так и в Соединенных Штатах в первой половине 20-го века, LCC в конечном итоге получил патент в 1934 году. С тех пор коммерческое использование LCC переросло в отрасль, которой оно является сегодня, с множеством типов приложений в самых разных областях.

LCC представляет собой смесь портландцемента и водной суспензии в сочетании с предварительно сформированной пеной для создания воздушных пустот, которые могут выступать в качестве прочной, легкой, долговечной и недорогой альтернативы грунту или замене засыпки для многих геотехнических применений. Его легкий вес снижает оседание грунта и улучшает несущую способность, а также статическую и сейсмическую устойчивость насыпей.

Учитывая, что смесь LCC является очень текучей, ее можно эффективно и безопасно размещать в замкнутых или проблемных пространствах, таких как трубы, траншеи, туннели, засыпки стен и других замкнутых пространствах, где рутинная укладка земляной засыпки затруднена, если не невозможна. Эти атрибуты делают LCC недорогим решением для многих геотехнических приложений.

Несмотря на то, что этот документ может не касаться всех конкретных деталей проекта, в этом руководстве представлены, среди прочего, примеры подготовки проекта смеси и установки в полевых условиях, геотехнической оценки, а также проектирования, строительства и полевых испытаний LCC. В этом руководстве рассматривается важность геотехнического надзора в начале проекта, на этапе проектирования смеси и во время строительства, чтобы гарантировать, что проект соответствует своему прямому назначению.

В шести главах этого руководства содержится следующая информация:

### • Глава 1 Введение

Глава 1 охватывает объем руководства, дает определение LCC и основы его работы, описывает преимущества использования LCC для геотехнических приложений и перечисляет многие из этих приложений.

### • Глава 2. Физические свойства

В главе 2 рассматриваются как свежие, так и затвердевшие свойства LCC, а также важность этих свойств в геотехнических приложениях.

### • Глава 3. Соображения по инженерно-геологическому проектированию

Глава 3 охватывает важные принципы инженерного проектирования, необходимые для рассмотрения LCC в геотехнических проектах.

### • Глава 4. Дизайн смеси

Глава 4 описывает ингредиенты LCC и процесс, используемый для определения надлежащего содержания цемента, воды и воздуха для LCC, а также включает информацию о подготовке лабораторных проб.

### • Глава 5. Строительство

В главе 5 обсуждаются требования и процесс для строительства насыпи LCC, необходимое оборудование и процедуры, а также полевые наблюдения для обеспечения качества.

### • Глава 6. Осмотр, тестирование и обслуживание

В главе 6 представлена информация о полевых испытаниях и наблюдениях для контроля качества, инспекциях и испытаниях после строительства, а также о техническом обслуживании.

Следующее приложение включено в конце этого руководства:

### • Приложение. Руководство по устройству легкого ячеистого бетонного наполнителя

В приложении приведены технические требования к материалам, оборудованию, строительному контролю и требованиям к испытаниям для строительства насыпок LCC.



# Глава 1 Введение

## Фон из легкого ячеистого бетона

Первоначально использовавшийся в качестве строительного продукта для систем полов как в Европе, так и в Соединенных Штатах в первой половине 20-го века, легкий ячеистый бетон (LCC) в конечном итоге получил патент в 1934 году (Bayer v. Rice 1934). С тех пор коммерческое использование LCC переросло в ту отрасль, которой она является сегодня, с множеством типов приложений в самых разных областях.

## Определение LCC

LCC представляет собой смесь портландцемента и водной суспензии в сочетании с предварительно сформированной пеной для создания воздушных пустот, которые могут выступать в качестве прочной, легкой, долговечной и недорогой альтернативы грунту или замене засыпки для геотехнических применений. Комитет 523 Американского института бетона (ACI), который предоставляет информацию о материалах, изготовлении, свойствах, конструкции и обращении с продуктом, определяет этот материал в своих документах. *Руководство по монолитному ячеистому бетону низкой плотности* следующее:

Бетон, изготовленный из гидравлического цемента, воды и предварительно отформованной пены с образованием затвердевшего материала, имеющего плотность в сушильном шкафу 50 фунтов / фут<sup>3</sup> (800 кг / м<sup>3</sup>) или меньше. Эти смеси могут включать заполнители и другие компоненты материала, включая, помимо прочего, летучую золу и химические примеси. (ACI 2006)

Ключевым моментом является получение однородной и стабильной воздушной пустоты или ячеистой структуры. Ячеистая структура достигается в основном за счет включения макроскопических пустот (пузырьков воздуха), возникающих в результате механического включения воздуха или других газов.

Помимо LCC, для описания этого материала часто используются многие другие термины, в том числе ячеистый бетон низкой плотности (LDCC), пенобетон и контролируемый низкопрочный материал (CLSM) (ACI 2006). Чтобы избежать путаницы и обеспечить единообразие, термин, используемый в этом документе, если специально не указано иное, - это LCC, поскольку это лучший дескриптор продукта, он не привязан к бренду и четко и надлежащим образом идентифицирует материал.

## Сфера применения данного руководства

Это руководство предоставляет информацию для специалистов-строителей и инженеров-проектировщиков о материалах, свойствах, конструкции, правильном обращении и применении LCC для геотехнических приложений, включая общие применения, концептуальные рекомендации и рекомендации по проектированию. В этом руководстве не рассматриваются свойства или использование LCC для систем кровельного настила, автоклавного ячеистого бетона для создания легких сборных железобетонных изделий или легкого конструкционного бетона для снижения собственных нагрузок на бетонные элементы. В этом руководстве также не обсуждается использование проницаемого ячеистого бетона низкой плотности или ячеистого бетона с плотностью сушки в печи более 50 фунтов / фут<sup>3</sup> (800 кг / м<sup>3</sup>).

## Преимущества

Четыре основных преимущества LCC для геотехнических приложений заключаются в следующем:

### • Значительно легче почвы

• Обладает высокой текучестью и может заполнять пространства любого размера и формы.

• Часто дешевле, чем многие альтернативные системы.

• Может ускорить график строительства

Свойство легкого веса LCC снижает оседание грунта и улучшает несущую способность, а также статическую и сейсмическую устойчивость насыпей при использовании в качестве легкого насыпи, размещаемого поверх мягких сжимаемых грунтов. Кроме того, учитывая, что смесь LCC является очень текучей (даже на большие расстояния), ее можно эффективно и безопасно размещать в замкнутых или проблемных пространствах, таких как трубы, траншеи, туннели, засыпки стен и другие области, где обычно укладывается уплотненное пространство. засыпать земляным полотном сложно, а то и невозможно. Эти атрибуты делают LCC недорогим решением для многих геотехнических приложений.

Быстрое размещение и достаточно быстрое время схватывания LCC ускоряют строительные работы. Многие другие атрибуты LCC предоставляют дополнительные преимущества для решения конкретных задач, в том числе следующие:

- Консервация агрегатов
- Изоляция
  - Устойчивость к замораживанию-оттаиванию
  - Самовыравнивающиеся и уплотняющие
  - Рассеяние энергии и демпфирование
  - Контроль плотности, прочности и проницаемости
- Возможность раскопок
- Инертный / негорючий
- Наличие на месте
- Легкость прокатки
- Динамические свойства
- Снижение транспортных расходов и выбросов.
- Повышенная безопасность работников

В этом руководстве обсуждаются сегменты геотехнического рынка, в которых успешно применяется LCC, и рассматриваются указанные выше свойства, функции / преимущества и преимущества. Приложения LCC, представленные в этом руководстве, продемонстрировали отличную долгосрочную производительность, предлагая рентабельные решения, а также лучшие и более безопасные конструкции для проектов по всей Северной Америке.

## Приложения

### Легкие дорожные основания и насыпи

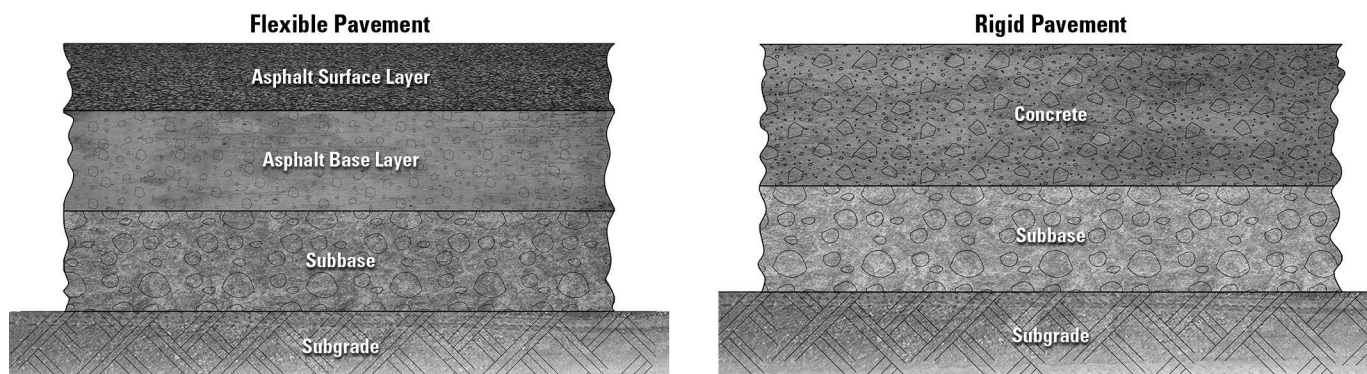
Большинство современных дорог состоят из структурного участка дорожного покрытия, состоящего из бетонного или асфальтового покрытия.

слой на поверхности, размещенный поверх слоев основания и / или основания (обычно щебня или стабилизированных материалов) и подстегнутый уплотненным земляным полотном (см. Рисунок 1.1).

Эти системы дорожного покрытия доказали свою эффективность в стабильных условиях почвы и фундамента, обеспечивая прочное и долговечное покрытие. Однако, когда почва и условия площадки менее чем оптимальны, установка слоя прочного и легкого LCC может укрепить и преодолеть многие проблемы, связанные с плохими материалами земляного полотна (мягкие или расширяющиеся глины, разрушающиеся или реактивные грунты и т. Д.). Основным соображением при проектировании использования LCC в таких ситуациях является компенсация веса.

Смещение мягкого сжимаемого грунта обычно происходит из-за чрезмерных нагрузок, прилагаемых к этим грунтам. LCC может использоваться в качестве полной или частичной замены подстилающего слоя в этих приложениях для обеспечения нулевого или небольшого увеличения полезной нагрузки на грунт фундамента.

Инженеры-геологи проводят расчеты толщины покрытия, снижения веса и устойчивости насыпи, полученные в основном в результате лабораторных испытаний, с использованием репрезентативных свойств материалов и удельного веса соответствующих материалов и грунтов. Эти расчеты также должны учитывать возможные изменения высоты проезжей части и грунтовых вод в результате сезонных циклов или осушения при строительстве при рассмотрении конфигураций строительства и долгосрочной нагрузки. В этом документе это определение балансировки нагрузки на систему дорожного покрытия / насыпи называется методом расчета чистой нагрузки и дополнительно описывается в главе 3. Этот метод используется для обеспечения краткосрочной и долгосрочной стабильности и характеристик осадки. система проезжей части.



Национальный технический центр СР

Рисунок 1.1. Сравнение конструкции дорожного покрытия



© 2002 Elastizell Corporation of America, используется с разрешения

**Рисунок 1.2. Легкие дорожные основания и насыпи (Огайо)**

Преимущества этого геотехнического структурного решения для проезжей части с активной осадкой начинаются с ее ожидаемых долгосрочных характеристик с небольшой осадкой или без нее. За счет установки инертного, спроектированного, легкого цементного слоя или насыпи из материала с неограниченной прочностью на сжатие, которая в 5-10 раз сильнее, чем обычно уплотненный грунт или гранулированный материал, основание укрепляется и уменьшается в весе. Кроме того, это практическое решение позволяет получить относительно прочный, самоуплотняющийся материал основания проезжей части, который увеличивает срок службы покрытия и значительно снижает вероятность значительного оседания (см. Рисунок 1.2).

Еще одно преимущество установки LCC по сравнению с другими альтернативами заключается в том, что установка обычно занимает меньше времени и оборудования, что может привести к значительной экономии средств и времени, особенно по сравнению с решением, требующим значительных дополнительных нагрузок на фундамент насыпи, что может занять много времени, месяцы. Поскольку LCC является очень текучим материалом, который также самоуплотняется и самовыравнивается, он избавляет от необходимости уплотнять и выравнивать земляное полотно перед его укладкой. Эти свойства уменьшают потребность в дополнительном оборудовании и рабочей силе на рабочем месте.

Наконец, это применение LCC также является экологически чистым, поскольку импортные LCC-заполнители обеспечивают 130 ярдов<sup>3</sup> (100 м<sup>3</sup>) на доставленную загрузку сухого цемента, в то время как грунтовые и гранулированные насыпи обеспечивают только 10-15 ярдов<sup>3</sup> (8-11 м<sup>3</sup>) на загрузку. Уменьшение объемов перевозок значительно снижает выбросы CO<sub>2</sub> и заторы на дорогах, износ дорожного покрытия и шум. Это также снижает использование ограниченных природных ресурсов.

### Мостовой подход к набережным

Подходы к мосту представляют собой участки эстакады, подходящие к краю опоры моста. Соответствующие насыпи подхода LCC спроектированы с использованием метода расчета чистой нагрузки, часто с использованием строгих критериев проектирования и требований к характеристикам. Проблема в том, что типичная высота откосов набережной

вверх по мере приближения к мосту, вызывая увеличение вероятности осадки и гарантируя более высокий коэффициент безопасности (FOS) и большую расчетную толщину LCC для устранения потенциала осадки. Если не принять меры на этапах проектирования и строительства, может произойти длительная дифференцированная оседание грунтов основания, часто приводящая к образованию неровностей на мосту, которые обычно находятся между опорой и подходной плитой. Это урегулирование может привести к потенциальной угрозе безопасности и вызвать проблемы с комфортом для водителей, а также привести к увеличению скорости структурного износа и долгосрочным расходам на техническое обслуживание проезжей части.

Оценки показывают, что проблемы с перекрытиями на подходе к мосту затрагивают около 25% мостов в США (Briaud et al. 1997). В более позднем отчете (2017 г.) Федерального управления шоссейных дорог (FHWA) говорится, что около 9% из более чем 600 000 мостов в США имеют дефекты конструкции. Несомненно, на многие из этих мостов влияет осадка на подходе или неровности. К счастью, когда встречаются мягкие и сжимаемые грунты, функция снижения веса LCC может решить проблемы с почвой, устраняя неровности на мосту без необходимости в более дорогостоящих методах восстановления почвы.

Так же, как дорожные основания и насыпи, еще одним преимуществом установки LCC для насыпей на подходе к мосту является то, что установка обычно требует меньше времени и оборудования, чем альтернативные решения, что может привести к значительной экономии средств и времени.

Другими соображениями проектирования и строительства при выборе LCC являются ширина насыпи и использование боковых откосов для растительности или подпорных стен. Наклонные насыпи LCC обычно строятся со ступенчатой поверхностью ниже готового уровня (см. Рисунок 1.3) и покрытый сверху слоем почвы примерно на 2 фута (0,6 м), чтобы создать поверхность с растительным ландшафтом.



© 1993 Elastizell Corporation of America, используется с разрешения

**Рисунок 1.3. Мостовые набережные (Индиана)**

При проектировании подпорных стен или опор с засыпкой из LCC боковые нагрузки на конструкции снижаются, что позволяет использовать менее дорогостоящие системы. Такое снижение нагрузки часто может привести к значительной экономии затрат на стены, фундамент и внутреннее армирование.

Использование LCC в качестве насыпи для насыпей оказалось успешным во многих ситуациях. Типичные проекты включают большие разделительные конструкции грузовых рельсов, построенные с использованием больших объемов LCC в сочетании с системами сборных железобетонных панелей. В проектах такого типа LCC используется в качестве замены «облегченного грунта» в структурных и геотехнических проектах.

### Заполнение пустот и полостей

Одна из наиболее распространенных причин использования LCC - его высокая текучесть. Пузырьки воздуха, добавленные к цементной пасте, действуют как крошечные шарикоподшипники в пустоте или полости, позволяя материалу быстро течь во все доступные пространства. После того, как вся вода была удалена из пустот перед запуском, высокая текучесть LCC позволяет легко перекачивать и транспортировать на большие расстояния в шлангах, что упрощает установку в труднодоступных местах (см. Рисунок 1.4).

### Заполнение заброшенных труб и водоотводов

Часто коммунальные компании, государственные учреждения и частные владельцы требуют обновления своей сети подземных трубопроводов. Хотя многие трубы остаются на месте после истечения срока их службы, в соответствии с требованиями многих местных агентств эти трубы нельзя оставлять пустыми из соображений безопасности и / или расчетов. Решение состоит в том, чтобы либо заплатить за демонтаж трубы, либо заполнить выведенную из эксплуатации трубу. Если выбран вариант заполнения трубы, LCC можно производить на месте и закачивать непосредственно в заброшенную трубу через переборки и входные отверстия, предоставленные установщиком (см. Рисунок 1.5).

Эти перегородки служат для того, чтобы блокировать движение высокотекучего материала LCC в неправильном направлении и могут быть изготовлены из многих продуктов, обеспечивающих водонепроницаемое уплотнение. После того, как вся вода будет удалена из пустот, через эти переборки пропускается нагнетательная труба диаметром 2, 3 или 4 дюйма (50, 75 или 100 мм), через которую прокачивается LCC. Затем LCC заполняет трубу от одного конца до другого, удаляя весь воздух через вентиляционную трубу (и), расположенную в высоких точках.



CEMATRIX, используется с разрешения

Рисунок 1.4. Заполнение пустот и полостей (Альберта)



© 2017 Elastizell Corporation of America, используется с разрешения

Рисунок 1.5. Заполнение заброшенных труб и водоотпускных труб (Мичиган)

Хотя для заполнения заброшенных труб можно использовать множество различных материалов, в том числе песок, CLSM и пенополиуритан, возможность эффективной укладки материала имеет решающее значение. С LCC большинство труб можно перекачивать от одного конца до другого за одну операцию. Способность LCC заполнять трубу следует оценивать не только по длине или абсолютному объему, но и по времени, необходимому для заполнения полости. Основной подход заключается в том, что труба не должна закачиваться дольше четырех часов из-за времени гидратации (отверждения) цемента, если только не используется замедляющая схватывание добавка.

Например, при неограничительных условиях целевая норма внесения, которую должен достичь типичный установщик LCC, составляет около 100 ярдов<sup>3</sup> (75 м<sup>3</sup>) в час. При такой скорости заполняемая труба не должна превышать 400 ярдов<sup>3</sup> (300 м<sup>3</sup>). Размеры оборудования и производительность могут сильно различаться, поэтому это количество не обязательно является требованием или ограничением. На это влияют температура окружающей среды, и состав добавок и смесей может быть скорректирован с учетом времени перекачивания, превышающего четыре часа.



После того, как требуемые свойства материала заполнителя определены (обычно эквивалентны свойствам соседнего грунта или лучше, чем достаточно), это простое решение между различными типами текучих продуктов. Типичный продукт, который часто указывается, представляет собой текучий наполнитель или CLSM, который представляет собой одно- или двухмешковый (94 или 188 фунтов [43 или 85 кг]) цемент и смесь песка и / или летучей золы, создающую бетонный продукт низкой прочности. с пределом прочности при неограниченном сжатии от 50 до 150 фунтов / дюйм<sup>2</sup> (от 0,34 до 1,03 МПа). Однако эти смеси бывает очень трудно перекачивать. Для перекачивания на расстояние более 200 футов (60 м) часто требуются дополнительные выемки грунта, чтобы можно было разделить трубу на достаточно маленькие сегменты заполнения. Во многих случаях стоимость этих дополнительных земляных работ, засыпки, а лоскутное покрытие дорожке, чем стоимость выполнения работы за одну непрерывную операцию с использованием LCC. Другая проблема со стандартным текучим наполнителем или CLSM заключается в том, что прочность на сжатие не так стабильна, как у LCC. Точно так же текучая заливка и CLSM часто продолжают набирать прочность с течением времени, в результате чего получается материал, который очень трудно удалить, если потребуется дальнейшая выемка грунта.

#### Заполнение кольцевого пространства раствором

Кольцевое пространство - это область между объектом и другим объектом, который вставляется в этот объект, например, труба или водопропускная труба (см. Рисунок 1.6).



Aerix Industries, используется с разрешения

Рисунок 1.6. Заливка затрубного пространства (штат Мэн)

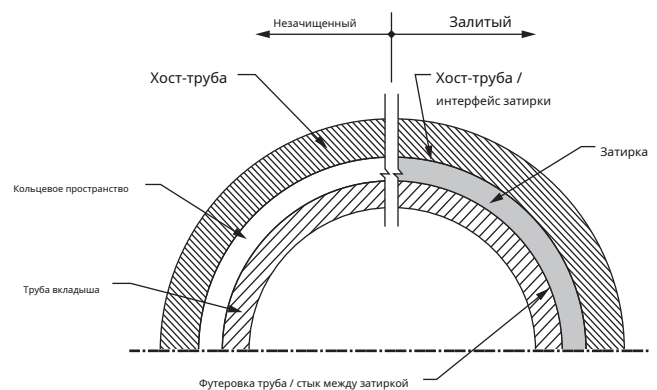
Затирка туннеля кольцевого пространства представляет собой стандартную установку LCC и представляет собой подмножество трубных заполнителей, описанных ранее. Применяются те же преимущества, но расстояния часто намного больше. Целью затирки туннеля кольцевого пространства является заполнение открытого пространства за пределами новой трубы, которая устанавливается в новом туннеле или канале. Обычно это трубы среднего и большого диаметра.

Для создания туннеля с поддерживающими его системами используется специальный метод выемки грунта. Этот метод подходит для удержания пустоты открытой, но не для содержания жидкости под давлением. В проем устанавливаются указанные трубы для пропускания конечного продукта (канализация, вода, газ и т. Д.). Эта установка оставляет пустоту между трубой и обсадной трубой туннеля, которую необходимо заполнить (см. Рисунок 1.7).

Перед затиркой необходимо удалить воду из межтрубных пространств. Вентиляция в верхней точке (ax) требуется для полной заделки швов и удаления воздушных карманов.

Очень текучая природа LCC чрезвычайно полезна при заливке туннелей из-за того, что часто используются большие расстояния. Туннели можно заделать несколькими стандартными способами в зависимости от требуемой длины и объема, а именно:

- Устанавливается аналогично заброшенному трубопроводу от переборки к переборке (наименее затратный метод).
- Транспортируйте раствор снаружи трубы через предварительно установленные трубы для цементации к секции, подлежащей заливке.
- Транспортируйте раствор в шлангах изнутри трубы, а затем введите раствор в пустоту через трубу через отверстия для раствора (самый дорогой метод)



Примечание. Блокировка не показана для ясности.

Brierly Associates Corporation, используется с разрешения

Рисунок 1.7. Незакрытые и залитые кольцевые пространства

При выполнении всех трех этих процедур установщик LCC должен активно участвовать в определении наилучшего метода на основе опыта, оборудования и персонала, чтобы обеспечить полное заполнение должным образом указанными материалами.

Заполнение резервуаров для хранения и шахт очень похоже на заполнение труб и кольцевых пространств, но с потенциалом для гораздо больших объемов LCC.

#### Фундаментные заливки

Иногда в фундаменте возникают недопустимые осадки или пустоты, требующие заполнения (см. Рисунок 1.8).

Концепции заполнения пустот и метод расчета чистой нагрузки также используются для заполнения фундамента, в зависимости от цели использования. Вот несколько примеров типов заливки фундамента:

- Засыпка / засыпка по периметру - новые конструкции часто устанавливают в непосредственной близости от ямы с опорой в земле. После завершения строительства зазор между зданием и опорой необходимо заполнить. LCC, обладающий большим объемом и текучестью, заполняет эту пустоту быстро и недорого.
- Уменьшение оседания / матовый фундамент - вся площадь фундамента выкапывается на основе метода расчета чистой нагрузки и заменяется LCC. Затем на поверхность LCC устанавливается фундамент.
- Труднодоступное место - при ремонте фундамента иногда требуется заливка в труднодоступном подвале. Благодаря возможности перекачивания на большие расстояния LCC, шланг может быть проложен от производственной площадки LCC к месту раздачи с небольшими трудностями.
- Изоляционная засыпка - слой LCC размещается под фундаментом для увеличения значения изоляции между землей и конструкцией.

Засыпки при повышении и повышении уровня моря аналогичны засыпкам фундамента, но могут быть полностью выше уровня земли. Приподнятые морские дамбы и переборки LCC представляют собой тип прибрежной брони, которая может защитить береговую линию от сильных волн. Эти типы насыпей могут защитить существующую застройку от подъема воды из-за штормовых нагонов и повышения базового уровня моря. Это геотехническое приложение включает в себя опалубку и соображения плавучести. Как уже упоминалось, LCC может быть эффективным материалом для упрощения конструкции фундамента для многих приложений.

#### Системы блокировки энергии

В этом приложении блоки или панели LCC используются в качестве системы рассеивания кинетической энергии. По сути, образуя рампу для разгона грузовиков для самолетов (см. Рис. 1.9), это



© 1988 Elastizell Corporation of America, используется с разрешения

Рисунок 1.8. Фундаментные заливки (Флорида)



Группа безопасности взлетно-посадочной полосы, используется с разрешения

Рисунок 1.9. Системы блокировки энергии (Западная Вирджиния)

Система представляет собой основу из спроектированных LCC, построенных в конце взлетно-посадочной полосы, чтобы уменьшить серьезность последствий выхода самолета за пределы взлетно-посадочной полосы с твердым покрытием, которая была принята Федеральным управлением гражданской авиации (FAA) для использования в аэропортах по всей стране (FAA 2012).

Прежде чем приступить к производству этих сборных элементов, требуются многие годы проектирования, испытаний и согласований.

#### Подпорные стены и сборные стеновые панели

При использовании в качестве легкой засыпки вместо гранулированного грунта LCC идеально подходит для подпорных стен, где требуются легкие вертикальные насыпи. При использовании в сочетании со сборными стеновыми панелями эти системы разрабатываются с учетом геотехнических свойств удерживаемого грунта. Когда LCC заменяют засыпку грунтом, текущая практика заключается в консервативном проектировании стен, как если бы LCC был сыпучим материалом, используя его удельный вес и угол внутреннего трения. Прочность сцепления в LCC консервативно игнорируется при проектировании подпорных стенок грунта; однако заметная сплоченность в LCC является постоянной и обеспечивает дополнительный FOS в таких конструкциях.



Throop Lightweight Fill, используется с разрешения

**Рисунок 1.10.** Укладка засыпки LCC за сборными стеновыми панелями (Калифорния)

Системы сборных железобетонных стен широко используются при сооружении насыпей LCC (см. Рисунок 1.10). Эти системы обычно усилены боковой металлической или пластиковой арматурой, идущей от задней части стен до заделки конструкции. Стены этого стиля являются собственностью и обычно разрабатываются производителем стеновой системы в соответствии с его собственными испытаниями и параметрами системы, но в соответствии с правилами проектирования механически стабилизированных грунтовых стен (MSE), установленными Американской ассоциацией государственных служащих автомобильных дорог и транспорта (AASHTO). LCC рассматривается как грунт для целей проектирования стен MSE, при этом удельный вес и углы трения зависят от класса или расчетного абсолютного объема расчетной смеси LCC. Эти стены из LCC - очень экономичный метод создания вертикальных граней,

### Легкие конструкционные насыпи плотин и дамб

Легкие плотины и дамбы часто устанавливаются в регионах с глубокими рыхлыми отложениями, где осадение может быть серьезной проблемой. LCC может решить эту проблему, будучи установленным в секции дамбы ниже поверхности при ремонте дамбы и ее заполнении до проектного уровня (см. Рисунок 1.11).

В расчетах, относящихся к этому приложению LCC, снова используется метод расчета чистой нагрузки, чтобы избежать увеличения веса на глубоких мягких грунтах. Секция LCC может быть размещена на любом уровне для достижения снижения веса, и важно исследовать ее эффект плавучести, чтобы определить подходящее место в дамбе или дамбе для размещения LCC. Слой LCC помещается под расчетное количество тяжелого грунта, включая винтовые анкеры или дорожное покрытие, чтобы поддерживать устойчивость конструкции во время паводка, с преимуществом снижения веса круглый год, тем самым уменьшая или исключая любые будущие



Cell-Crete Corporation, используется с разрешения

**Рисунок 1.11.** Легкие структурные насыпи плотин и дамб (Калифорния)

поселок. Благодаря низкой проницаемости и монолитности LCC, количество отказов из-за размыва, трубопроводов и размыва в конструкции дамбы уменьшается.

### Ремонт оползней и стабилизация откосов

Оползни могут быть быстрыми и опасными, вызывая серьезные проблемы для участников. Если оползень небольшой, вероятно, будут применимы традиционные и простые методы выемки грунта и выравнивания откосов. Однако, если горка массивная, удаление неустойчивой почвы становится неприменимым и слишком дорогостоящим. Один из методов борьбы с большими оползнями - стабилизировать участок (с помощью опор, подпорок, обезвоживания и т. Д.) И оставить почву на месте. В качестве альтернативы, LCC можно использовать на вершине / вершине уступа зоны скольжения, чтобы уменьшить движущую силу от веса существующего грунта (см. Рисунок 1.12).

При удалении верхней части области скольжения и замене ее на LCC масса уменьшается, уклон восстанавливается, а движущая сила, действующая на массу скольжения, значительно снижается.



© Корпорация Cell-Crete, 2019, используется с разрешения

**Рисунок 1.12.** Ремонт оползней и стабилизация откосов (Калифорния)

#### Заполнение с контролируемой плотностью

Заливка с контролируемой плотностью (CDF), включая CLSM, текучую засыпку, цементный раствор, суспензию с двумя мешками или песчаную суспензию, поставляется по всей стране поставщиками товарного бетона в качестве замены уплотненной засыпки в траншеях или под фундаментом (см. Рисунок 1.13).



РСА

Рисунок 1.13. Заполнение с контролируемой плотностью

Типичная прочность на неограниченное сжатие составляет от 50 до 150 фунтов / дюйм<sup>2</sup> (от 0,34 до 1,03 МПа), что делает CDF более прочным и стабильным, чем грунт, но все же пригодным для выемки с помощью обычного строительного оборудования. LCC - отличный материал для CDF, потому что его можно использовать во многих из тех же приложений.

LCC становится все более рентабельной по мере увеличения установленного объема. При сравнении применимости LCC и CDF следует учитывать следующее:

- Цена
- Сыпучесть
- Расстояние до завода по производству товарного бетона
- Наличие воды
- Требования к перекачке
- Плавуемость наполнителя
- Размер проекта
- Время размещения
- Доступ трафика к сайту

## Глава 2. Физические свойства

Хотя LCC обычно состоит только из портландцемента, воды и воздуха, поступающих через предварительно сформованную пену, огромное количество возможных смесей может обеспечить желаемые технические характеристики. Введение дополнительных вяжущих материалов, таких как летучая зола или шлак, вместе с химическими добавками и заполнителями (мелкими, крупными или легкими) в LCC для изменения свежих и затвердевших свойств усложняет определение его физических свойств.

Свойства материалов, обсуждаемые в этой главе, основаны на исследованиях, проводимых во всем мире на протяжении многих лет. Правильное проектирование и конструкция смеси играют важную роль в определении этих инженерных свойств. Глава 4 этого руководства, «Проектирование смеси», дает некоторые рекомендации по особенностям дизайна смеси.

### Свежая подвижность

LCC обычно получают путем смешивания портландцемента, воды и воздуха через предварительно сформованную пену (с добавками, иногда добавляемыми) в смесительной камере. После смешивания и в свежем состоянии материал LCC является самокрепляющимся и очень текучим, с соотношением вода / цемент (в / ц) в диапазоне от 0,45 до 0,80. Производители пенопласта предоставляют рекомендации, учитывая, что содержание воды значительно влияет на многие свойства LCC, особенно на его прочность и вязкость.

### Плотность литья

Полевые измерения удельного веса или плотности (массы на единицу объема), наряду с известным соотношением в / ц свежей смеси LCC, являются основными механизмами контроля качества (Hoff, 1972). Образцы LCC обычно отбираются из проточного шланга с использованием емкости для образцов, и измерения часто проводятся во время производства. Плотность уложенного материала во влажном состоянии можно оценить, используя рекомендации ASTM International (ASTM) C796, Стандартный метод испытаний пенообразователей для использования при производстве ячеистого бетона с использованием предварительно сформованной пены.

Это измерение влажного LCC называется плотностью отливки и является плотностью, которая должна использоваться в спецификации и дизайне проекта LCC. Установщик может также взять пробы свежего материала LCC из зоны размещения, где материал собирается, или на конце шланга в течение 30 минут после установки, чтобы убедиться, что плотности соответствуют конструкции и что воздушные пустоты не рассеиваются, что может привести к неожиданному увеличению плотности.

В течение 8–24 часов, в зависимости от условий окружающей среды (температура, осадки, ветер и т. Д.) И конструкции смеси, размещенный LCC превращается из жидкого в твердое. Плотность затвердевшего LCC примерно такая же, как у его отливки, но из-за процесса гидратации цемента и потери воды за счет испарения плотность затвердевшего материала может быть немного ниже. Твердые частицы в размещенном LCC постоянны, но содержание влаги меняется. Плотность заливки используется для представления плотности предоставленного LCC. Смачивание или высыхание в течение всего срока службы продукта изменяет его фактическую плотность поля. Хотя дренаж сам по себе не полностью предотвратит колебания плотности, когда эти колебания недопустимы, может потребоваться обеспечение герметичной поверхности, которая не пропускает дополнительную воду.

### Плотность на месте

Термин плотность в сухом состоянии не определен в приложениях LCC, и его следует избегать из-за его потенциальной двусмысленности. Авторы спецификаций часто неправильно называют конечную плотность LCC на месте после его отверждения как его плотность в сухом состоянии. В то время как инженеры-геологи хотят знать, сколько весит общий заполнитель в долгосрочных условиях для расчетов осадки и консолидации, установщик LCC может контролировать плотность только во время размещения. Разработчик может контролировать изменения содержания влаги в течение срока службы продукта, задавая герметики, уклон отделки на уклоне и дренажные системы.

Поскольку установщик может нести ответственность только за измерение плотности во время размещения LCC, установщик не должен нести ответственности за окончательную долговременную плотность после размещения. Хотя долговременная плотность может меняться в зависимости, например, от того, был ли в системе включен надлежащий дренаж или поверхностное уплотнение, начальная и долговременная плотности не сильно различаются в полевых условиях по сравнению с плотностями литья.

### Плотность сушки в духовке

Термин «плотность при сушке в печи» может быть полезен, но обычно о нем не сообщают, если не требуется. Хотя никогда не рекомендуется сушить в печи образцы LCC, которые должны быть испытаны для анализа прочности на неограниченное сжатие, плотность после сушки в печи может быть полезным параметром для обратного расчета плотности отливки. Во время гидратации цемента плотность при сушке в печи немного увеличится; однако, как только цемент полностью гидратирован, плотность после высушивания в печи будет постоянной в течение всего срока службы LCC. Плотность сушки в печи можно определить следующим образом (уравнение 1):

Плотность в сухом состоянии (фунт / фут3) = Плотность заливки (фунт / фут3) ÷ (1 + Содержание влаги (%))

Плотность при сушке в печи (кг / м3) = Плотность заливки (кг / м3) ÷ (1 + Содержание влаги (%))

Например, плотность при сушке в печи для образца LCC 24 фунт / фут3 (384 кг / м3) может составлять всего 16 фунтов / фут3 (256 кг / м3). Определение плотности LCC в сушильном шкафу путем тестирования позволяет определить содержание цемента и может быть полезно инженеру, который наблюдает за операцией укладки, или в качестве инструмента расследования в случае возникновения проблем.

## Вязкость

Одной из основных причин использования LCC является его текучесть или вязкость. Низкая вязкость позволяет размещать на больших расстояниях и устанавливать почти самовыравнивающиеся. Вязкость LCC, как и любого продукта на основе цемента, в первую очередь зависит от содержания в нем воды. Однако в LCC также учитываются пузырьки воздуха. Обычно считается, что пузырьки воздуха увеличивают текучесть, действуя как крошечные шарикоподшипники внутри насадки.

Вязкость LCC часто неправильно указывается и измеряется с использованием инструментов для измерения цементного раствора, которые не подходят для LCC инженерного корпуса армии США (USACE) или ASTM International. Эти измерения текучести часто называют измерениями вязкости и включают ASTM C939, Стандартный метод испытания потока раствора для бетона с предварительно нанесенным заполнителем (метод конуса потока); ASTM C1611, Стандартный метод испытаний на оседание самоуплотняющегося бетона; и ASTM D6103, Стандартный метод испытаний на однородность потока контролируемого низкопрочного материала (CLSM).

Несмотря на то, что эти процедуры являются превосходными измерениями текучести для текучей заливки и растворов с нормальным весом и традиционно используются для приема продукта перед попыткой перекачки в длинные трубы или места с аналогичным сужением, LCC не соответствует этим установленным испытаниям. Гравитация является ключевым компонентом точности этих испытаний, а плотность LCC составляет от 1/3 до 1/4 цементного раствора, для которого предназначены испытания. Испытания часто обеспечивают более высокую вязкость, чем можно было бы ожидать, из-за того, что сила тяжести не протягивает легкий продукт через отверстие или не распределяет его достаточно тщательно.

В конечном счете, истинным испытанием текучести для LCC является измерение давления нагнетания, когда продукт проталкивается через шланг. Следует разработать допуски на максимальное давление закачки для проектных условий и контролировать их во время размещения. Следует тщательно контролировать максимальное время откачки при укладке в ограниченные пространства, такие как заброшенные трубы и кольцевые пространства.

Дополнительная информация о надлежащих методах строительства приведена в главе 5.

Вязкость LCC варьируется из-за его тиксотропных свойств (вязкость уменьшается при приложении напряжения, например при перемешивании). Свежие цементные пасты в LCC становятся жидкими при взбалтывании, но восстанавливают свою структурную форму в состоянии покоя. Это связано с тем, что цементные пасты со временем претерпевают изменения микроструктуры из-за флокуляции частиц и гидратации цемента (Quanji 2010). С LCC текучесть может поддерживаться в течение продолжительных периодов времени, если перемешивание продолжается, как при непрерывной перекачке на одной линии, где движется вся масса. Однако существует предел того, как долго LCC остается стабильным с течением времени и перемешивания. Сегрегация, при которой цементный раствор оседает и оставляет пену на поверхности, может происходить на больших площадях, и ее следует избегать. Сегрегированные участки часто обнаруживаются на следующий день по хрустящей / пенистой верхушке, и эти сегрегированные участки следует удалить и заменить.

## Боковое давление жидкости

LCC размещается как жидкость. Во время размещения прикладываемая гидростатическая сила должна основываться на фактической плотности заливки LCC. Если стена или опора засыпаются LCC, она должна быть спроектирована таким образом, чтобы она могла выдерживать влажную жидкость. LCC обычно размещается в лифтах глубиной 4 фута (1,2 м); однако также распространены более толстые и тонкие лифты. Учитывая, что LCC со временем затвердевает, гидростатическая сила полностью исчезает, когда продукт затвердевает и принимает свою окончательную форму. Опалубку можно снимать после того, как материал полностью затвердеет в однородную массу.

## Установить время

LCC - это бетонный продукт, и большинство исследований, касающихся типов цемента и бетона, также применимы к LCC. LCC может работать по-разному в различных условиях, причем факторами изменения являются перемешивание, температура и конструкция смеси. Свежий бетон - это тиксотропный материал, который разжижается при подаче энергии. Так же, как автобетоносмесители непрерывно вращают свой груз, чтобы бетон оставался в жидком состоянии, LCC также выигрывает от перемешивания.

Хотя для LCC не существует точного установленного времени, на практике можно предположить, что время установки составляет от двух до четырех часов для заливки, такой как укладка фундамента или других крупномасштабных низкоэнергетических заливок с открытым верхом. Заполнения с низким энергопотреблением - это большие области, где вся масса не находится в движении, и подобласти могут начать формироваться до завершения.

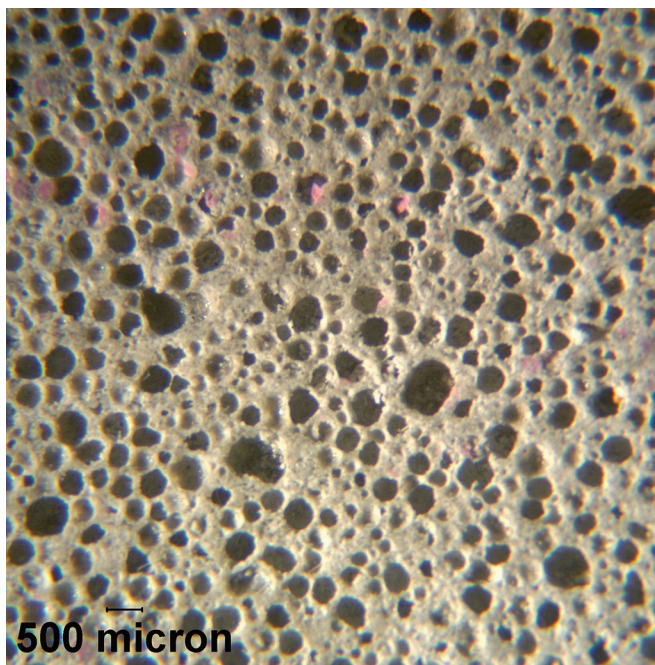
В трубопроводах вся масса перемешивается, потому что насос толкает LCC; поэтому проблемы с установкой не возникают до тех пор, пока не прекратится перекачивание. Если установленное время является критическим фактором, установщик должен оценить размер размещения, конкретное сочетание и методы и сравнить их со спецификациями проекта. Эта проблема часто решается созданием ячеек меньшего размера для размещения или включением замедляющих схватывание добавок, совместимых с LCC.

## Закаленные свойства

Закаленные свойства LCC - это свойства, которые инженерное сообщество использует на протяжении всего срока службы проекта. Это свойства конечного продукта, которые показывают, как продукт работает в структуре. Наиболее распространенными характеристиками упрочнения являются удельный вес и прочность на неограниченное сжатие, которые следует измерять при каждой работе. Большинство других свойств упрочнения, таких как содержание воздуха, проницаемость, сорбция, модуль упругости и другие, обычно не проверяются, если иное не требуется инженером-проектировщиком.

## Закаленное описание

После того, как LCC находился на месте в течение 8–24 часов и произошло окончательное схватывание или LCC затвердел, он выглядит как пемза или вулканический пучок (однородная лавовая порода). Он имеет серый цвет и состоит из матрицы портландцемента, заполненной крошечными, круглыми, стабильными воздушными пустотами или пузырьками, примерно Диаметр 0,04 дюйма (1,0 мм) (см. Рисунок 2.1).



© 2014 Elastizell Corporation of America, используется с разрешения

Рисунок 2.1. Везикулы / воздушные пустоты

Фактический диаметр воздушных пустот в свежем LCC зависит от методов смешивания и используемых материалов. В руке он заметно легкий, и разница в плотности между образцами очевидна. Прочность остаточной матрицы создает полезные свойства конечного продукта. Вода используется во время гидратации цемента, а предварительно сформированная пена впитывается в смесь, оставляя воздушные пустоты, видимые невооруженным глазом. Отвержденный LCC выглядит влажным или сухим, что зависит от степени высыхания и содержания воды.

## Сила

LCC очень прочен по сравнению с материалом, обычно грунтом и уплотненными заполнителями, который он заменяет в геотехнической среде. Образец LCC 30 фунтов / фут3 (480 кг / м3) имеет минимальную прочность на неограниченное сжатие 40 фунтов / дюйм2 (0,28 МПа), что соответствует несущей способности 2,9 тонны / фут2 (0,28 МПа). В Таблице 2.1 представлена сводка общепринятых значений максимальной плотности отливки, минимальной прочности на неограниченное сжатие в течение 28 дней и несущей способности, которые можно ожидать для типичных смесей LCC, используемых в США.

Фактические свойства смеси LCC всегда следует проверять перед установкой.

Прочность на сжатие, прочность на сдвиг, модуль упругости и коэффициент несущей способности (CBR) LCC в Калифорнии варьируются в зависимости от таких факторов, как качество цемента, тип цемента, плотность, качество пены, соотношение воды и цемента, смесительное оборудование, соотношение песка и цемента (если добавлен песок), интенсивность перемешивания, температуры производства и укладки, а также добавки или примеси. К этому списку можно добавить несколько других факторов, потому что, хотя LCC состоит только из трех основных компонентов (цемент, вода и воздух), количество переменных в смеси огромно.

Таблица 2.1. Физические свойства LCC

Максимальный каст плотность		Минимум прочность на сжатие		Несущий емкость	
фунт / фут <sup>3</sup>	КГ / Мз	фунт / дюйм <sup>2</sup>	МПа	тонна / фут <sup>2</sup>	МПа
24	385	10	0,07	0,7	0,07
30	480	40	0,28	2,9	0,28
36	575	80	0,55	5,8	0,56
42	675	120	0,83	8,6	0,82
50	800	160	1,10	11,5	1,10

Источник: ACI 2006.

**Большое количество переменных смешивания приводит к невозможности принятия проектных решений, полностью основанных на значениях свойств материала из таблиц, рисунков и уравнений, представленных в этом документе. Представленная информация предназначена только для руководства, и инженеру рекомендуется провести необходимые испытания и проконсультироваться с установщиком и / или производителем, чтобы определить подходящую конструкцию смеси для достижения заданных требований к свойствам материала.**

В Калифорнии было проведено исследование для оценки большого набора данных из более чем 3000 тестовых образцов LCC в самых разных условиях (Siebold and Tootle, 2016). Необработанные данные были оценены, и значения прочности на сжатие в неограниченном состоянии варьировались от одного до трех раз для той же плотности (т.е. 30 фунтов / фут<sup>3</sup> [481 кг / м<sup>3</sup>] плотности приравняются к 50-150 фунтов / дюйм<sup>2</sup> [0,34-1,03 МПа] без ограничений. прочность на сжатие). Это приемлемо для геотехнической засыпки, когда все, что требуется, - это минимальная прочность. Однако это может быть неприемлемо в приложениях, когда необходимо знать фактическую прочность и соответствующий механизм разрушения.

Исследование было проведено, чтобы просто оценить способность материала LCC быть достаточно последовательным для структурных приложений. Цель исследования заключалась в том, чтобы показать, что 60 образцов, все из одной партии, будут последовательно проверять одно и то же. Это докажет, что смеси LCC с почти идентичной прочностью могут быть сделаны повторно, если потребуется, и что переменные, если они будут постоянными, могут дать стабильный продукт.

В ходе исследования 60 образцов были разделены на шесть групп по 10. Шесть групп были выделены тремя различными способами. Половина групп была ограничена серой, а половина - нет; 20 были отверждены во влажном состоянии, 20 были отверждены насухо и 20 были отверждены в соответствии с процедурой, описанной в ASTM C495. Каждая из шести групп последовательно тестировалась на прочность, доказывая, что однородно изготовленный / отвержденный LCC может получить ожидаемую прочность. Наиболее информативной частью результатов было то, что процесс отверждения имел решающее значение. Значения прочности, полученные для образцов, отвержденных влажным и сухим способом, были очень похожими, в то время как образцы, отвержденные с помощью процедуры ASTM C495, достигли почти вдвое большей прочности, чем другие. Это показало, что правильное соблюдение процедуры ASTM C495 имеет решающее значение для лабораторий, измеряющих образцы LCC на прочность на неограниченное сжатие.

## Угол сцепления и трения

В одном исследовании лабораторные испытания почвы проводились на образцах LCC четырех различных плотностей; Были измерены параметры прочности на сдвиг, коэффициенты проницаемости и коэффициенты давления грунта в состоянии покоя (Tiwari et al.2017). Было обнаружено, что неограниченная прочность на сжатие и недренированные прочностные характеристики (общий угол трения и сцепление) частично насыщенных материалов зависят от плотности образца LCC. Однако эффективный угол трения и сцепление насыщенных материалов не зависели от веса испытательной единицы в диапазоне испытанных напряжений. Эффективный угол трения и значения когезии материалов LCC, определенные в результате прямых испытаний на простой сдвиг, составили 35 градусов и 36 кПа (5,2 фунт / дюйм<sup>2</sup>), соответственно, как показано в таблице 2.2.

**Таблица 2.2. Углы трения и значения сцепления для LCC**

Материал	Неограниченный сжимающий прочность (кПа)	Угол трения для частично насыщенный условия (градусы)	Сплоченность для частично насыщенный условия (кПа)	Угол трения для насыщенных условия (градусы)	Сплоченность для насыщенных условия (кПа)
Класс II - партия 1	265-1 657	19	408	35 год	36
Класс II - партия 2		20	187	35 год	36
IV класс	628-2 765	21 год	615	35 год	36
7,1 кН / м <sup>3</sup> литые единица измерения	8 979-10 845	22	820	35 год	36
8,6 кН / м <sup>3</sup> лит. единица измерения	10 729-13 406	21 год	1,174	35 год	36

1 кПа = 0,145 фунта / дюйм<sup>2</sup>

1 кН / м<sup>3</sup> = 6,423 фунт / фут<sup>3</sup>

Источник: Tiwari et al. 2017 г.



Таблица 2.3. Модуль упругости отношения LCC

Автор и год	Отношение	Замечания
Тада 1986	$E = 5,31 \times W + 853$	Плотность от 200 до 800 кг / м <sup>3</sup>
Маккормик 1967	$E = 33 W_{T1} f_{c5}$	Уравнение Пау
Джонс и Маккарти 2005а	$E = 0,42 f_{k1,18}$	Песок как мелкий заполнитель
	$E = 0,99 f_{c0,67}$	Летучая зола как мелкий заполнитель

$E =$  модуль упругости (кН / мм<sup>2</sup>)  $W =$  плотность LCC на месте (кг / м<sup>3</sup>)  $f_c =$  прочность на сжатие (Н / мм<sup>2</sup>)

1 кН / мм<sup>2</sup> = 145 037,738 фунтов / дюйм<sup>2</sup>  
 1 кг / м<sup>3</sup> = 0,062 фунт / фут<sup>3</sup>  
 1 Н / мм<sup>2</sup> = 145,038 фунтов / дюйм<sup>2</sup>

Источник: Ramamurthy et al. 2009 г.

## Модуль упругости

Было разработано и опубликовано несколько математических моделей, связывающих плотность или прочность на сжатие LCC с модулем упругости. Таблица 2.3 суммирует их.

Простое измерение кривой напряжения-деформации также может быть использовано для определения точности этих формул для предлагаемых конструкций смеси.

Значения модуля упругости, полученные из уравнений взаимосвязи в таблице 2.3, выгодно отличаются для смесей LCC, в том числе из исследования в Калифорнии (Siebold and Tootle, 2016).

### Содержание воздуха

Содержание воздуха в типичной смеси LCC 30 фунтов / фут<sup>3</sup> (481 кг / м<sup>3</sup>) находится в диапазоне от 70% до 75%. Иногда в спецификациях проекта требуются измерения содержания воздуха. К сожалению, стандартная процедура определения содержания воздуха в бетоне неприменима при очень высоком содержании воздуха, как в случае с LCC. Вместо этого, содержание воздуха можно рассчитать, измерив плотность цементно-водной суспензии, а затем измерив плотность заливки конечного продукта. Уравнение 2, полученное из ASTM C796, можно использовать для приблизительного определения содержания воздуха в процентах от объема.

Уравнение 9, приведенное в главе 6, дает информацию о расчете плотности навозной жижи.

Более точный анализ может включать массу / плотность пены.

Воздух (%) =  $100 \times (\text{Плотность суспензии (фунт / фут}^3) - \text{Плотность заливки (фунт / фут}^3)) \div \text{Плотность суспензии (фунт / фут}^3)$

Воздух (%) =  $100 \times (\text{Плотность суспензии (кг / м}^3) - \text{Плотность заливки (кг / м}^3)) \div \text{Плотность суспензии (кг / м}^3)$

### Усадка при высыхании

Все продукты из портландцемента испытывают некоторую автогенную усадку при потере влаги. Это называется усадкой при высыхании. Усадка при высыхании, проявляемая LCC, может быть в 10 раз больше, чем наблюдаемая для бетона с нормальным весом (Narayanan and Ramamurthy 2000, Ramamurthy et al. 2009).

Усадка происходит в цементном тесте и сдерживается в бетоне с нормальным весом инертными материалами, такими как гравий и песок. В LCC заполнители заменяются открытыми пустотами, которые позволяют цементному тесту без ограничений усаживаться. Усадка в первую очередь вызвана изменением содержания воды, которое можно уменьшить, уменьшив количество воды в исходной смеси или уменьшив степень сушки, которая происходит с течением времени. Усадка LCC уменьшается с увеличением плотности (ACI 2006). Эта усадка объясняется уменьшением содержания воды в цементном тесте.

В среде геотехнического заполнения усадка LCC обычно не наблюдается в полевых условиях из-за его расположения в земле и отсутствия высыхания, которое происходит. Если вероятность усадки вызывает беспокойство, накройте наполнитель для уменьшения испарения или добавьте воды для отверждения, чтобы минимизировать потерю влаги. Условия долговременной влажности как для плотности, так и для усадки должны быть такими, чтобы они оставались постоянными, как во влажном, так и в сухом состоянии. Можно предположить, что усадка составляет от 0,5% до 1,0% для большинства конструкций смесей. Фактическое сочетание полей следует проверить перед установкой, если чрезмерная усадка вызывает беспокойство.

(2)

## Проницаемость / сорбция

Понимание проницаемости LCC улучшилось в последние годы. Предыдущие исследования показали, и общее понимание заключалось в том, что LCC имеет чрезвычайно низкую проницаемость. Недавние исследования показали, что полностью насыщенный LCC демонстрирует высокие характеристики проницаемости (Maw and Cole 2015); однако в ненасыщенном состоянии LCC не пропускает воду.

Противоречие связано с начальным смачиванием. Погружение полностью сухого образца в воду приведет к быстрому увлажнению цементной пасты внутри образца. Затем образец очень медленно впитывает воду, чтобы в конечном итоге заполнить пустоты. Показатели проницаемости указаны в Таблице 2.4, с рекомендацией о проведении дополнительных испытаний на гидравлическую проводимость из-за изменчивости расчетной гидравлической проводимости, ограниченности данных и исторического характера испытаний (Tiwari et al., 2017).

Хотя проницаемость является стандартной концепцией, хорошо понимаемой в геотехнической области, лучшим механизмом для понимания потока воды через LCC может быть сорбция. Сорбция - это измерение расхода влаги, которое включает коэффициенты переноса водяного пара и диффузии влаги, где капиллярное всасывание и водопроницаемость характеризуют перенос воды. Инженеры, которым требуется более полное представление о потоке воды в массе LCC, должны ознакомиться с литературой по сорбции LCC (Narayanan and Ramamurthy 2000, Nambiar and Ramamurthy 2007).

## Тепло гидратации

LCC состоит из портландцемента, воды и воздуха (добавляется через предварительно сформированный пенообразователь). Отверждение цемента - это экзотермическая реакция, обычно известная как теплота гидратации. Это быстро встречающееся химическое вещество

Известно, что реакция генерирует температуры выше точки кипения воды. В нормальных условиях тепло гидратации в заливке LCC начинается через два-четыре часа после размещения. Скорость повышения температуры, а также максимальная достигаемая температура зависят от типа и количества цемента, плотности и размера укладки массы LCC (Тарасов и др., 2010).

Теплота гидратации может быть значительной проблемой при размещении пластиковых труб внутри больших масс LCC, подвергающихся отверждению, и всегда должна учитываться при проектировании заполнения LCC. В то время как наполнитель LCC всегда будет нагреваться, размещение с открытым верхом не приведет к получению максимального прогнозируемого тепла, что предполагает отсутствие потерь тепла и представляет собой максимально возможные температуры. Внутренняя температура в больших плоских заполнителях обычно составляет от 100 ° F до 150 ° F (от 38 ° C до 66 ° C).

Обширное исследование теплоты гидратации LCC было выполнено исследователями из Южной Африки (Tarasov et al. 2010). В ходе исследования оценивалось влияние компонентов смеси и был сделан вывод о том, что количество цемента было самым большим показателем максимального достигнутого тепла, за которым следует размер образца. Исследователи определили, что добавление летучей золы или других наполнителей снижает максимальную температуру, достигаемую за счет увеличения массы или более медленной химической реакции. Было обнаружено, что увеличение количества пенообразователя в LCC замедляет реакцию и снижает максимальную температуру.

Хотя фактические краевые условия не могут быть полностью охарактеризованы, исследование действительно представило ценный метод для прогнозирования максимально возможного тепла при большой массе LCC. Таблицу 2.5 и уравнения 3 и 4 можно использовать для оценки максимально возможной температуры, которой может достичь масса LCC.

Таблица 2.4. Резюме испытаний на гидравлическую проводимость ячеистого бетона

Класс ячеистого бетона	Дата трансляции	ID образца	Гидравлическая проводимость $K_{в}$ среднее $\sigma$ (см / сек)	Вес влажной единицы (фунт / фут <sup>3</sup> )	Сдерживающий стресс (фунт / кв. дюйм)
II	Июль 2014 г.	13	1.9E-4	29,2	5
	Июль 2014 г.	13	1,7E-4	29,2	12,5
	Июль 2014 г.	19	7.7E-4	27,1	5
	Июль 2014 г.	19	7.2E-4	27,1	12,5
IV (низкая плотность)	Февраль 2015 г.	213-31	1.2E-3	31,2	5
	Февраль 2015 г.	213-21	9,5E-4	33,5	12,5

$\sigma$  С поправкой на 20 ° C (68 ° F) 1

1 фунт / фут<sup>3</sup> = 16,018 кг / м<sup>3</sup>

см / сек = 0,394 дюйма / сек

1 фунт / дюйм<sup>2</sup> = 6,895 кПа

Источник: Tiwari et al. 2017 г.

**Таблица 2.5. Расчетная теплоемкость и теплопроводность пенобетонных смесей, 300 кг / м<sup>3</sup> содержание портландцемента, мелкозернистый кварцевый песок**

Характеристики	Ед. изм	Значения для классов плотности на месте			
		350 *	400	800	1,200
Объемное тепло емкость, C <sub>v</sub>	кДж / (° C · м <sup>3</sup> )	915,70	966,90	1 479,40	1,997,80
Тепловой проводимость, λ <sub>v</sub>	Вт / мК	0,19	0,28	0,53	0,84

\* Значения действительны для пенобетонной смеси без заполнителя 1 кг / м<sup>3</sup>

= 0,062 фунт / фут<sup>3</sup>

1 кДж / (° C · м<sup>3</sup>) = 0,027 БТЕ (тепл.) / фут<sup>3</sup>

1 Вт / м · К = 0,580 БТЕ · фут / (ч · фут<sup>2</sup> · ° F)

Источник: Тарасов и др. 2010 г.

Обратите внимание, что это исследование относится к плотности на месте и относится к плотности сушки в печи. Посредством конструкции смеси можно оценить, какой должна быть плотность при сушке в печи для этого анализа, используя уравнение 1.

Сначала, используя уравнение 3, найдите значение α, которое представляет собой тепло, выделяемое конструкцией смеси.

$$\alpha = \lambda v \div C_v \times \rho v$$

куда,

α = коэффициент теплопроводности

(м / с<sup>2</sup>) λ<sub>v</sub> = теплопроводность (Вт / (м ° C))

C<sub>v</sub> = объемная теплоемкость (кДж / (м<sup>3</sup> ° C)) ρ<sub>v</sub> =

плотность отливки (кг / м<sup>3</sup>)

$$1 \text{ м} / \text{с}^2 = 3,281 \text{ фут} / \text{с}^2$$

$$1 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{° C}) = 0,578 \text{ БТЕ} \div (\text{ч} \cdot \text{фут} \cdot \text{° F}) \quad 1 \text{ кДж} /$$

$$(\text{м}^3 \text{ C}) = 0,027 \text{ БТЕ (тепл.)} / \text{Фут}^3 \quad 1 \text{ кг} / \text{м}^3 =$$

$$0,062 \text{ фунт} / \text{фут}^3$$

Во-вторых, рассчитайте максимальную температуру, ожидаемую от конструкции смеси и размера образца. Можно предположить, что большое плоское размещение представляет собой куб, равный высоте размещения, как показано в уравнении 4.

$$T_{\text{Максимум}} = 120,29 (a \text{ Cem}2 \text{ V}2 \div S \text{ A}2) 0,17$$

(4)

куда,

T<sub>Максимум</sub> = «Максимальная» температура в герметичной коробке сердечника из LCC (° C)

a знак равно коэффициент теплопроводности

(м / с<sup>2</sup>) Cem = содержание цемента в LCC (кг / м<sup>3</sup>) V =

объем LCC в герметичной коробке (м<sup>3</sup>)

S = масса всех твердых ингредиентов в данной смеси LCC

(кг / м<sup>3</sup>)

A = общая площадь куба LCC в запечатанном ящике (м<sup>2</sup>)

$$° \text{ C} = (5/9) (° \text{ F} - 32) \quad 1$$

$$\text{м} / \text{с}^2 = 3,281 \text{ фут} / \text{с}^2$$

$$1 \text{ кг} / \text{м}^3 = 0,062 \text{ фунта} /$$

$$\text{фут}^3 \quad 1 \text{ м}^3 = 35,315 \text{ фут}^3$$

$$1 \text{ кг} / \text{м}^3 = 0,062 \text{ фунта} /$$

$$\text{фут}^3 \quad 1 \text{ м}^2 = 10,764 \text{ фут}^2$$

Тепловыделение напрямую связано с содержанием цемента и объемом размещения в LCC. Соотношение цемента и твердого вещества в функции учитывает наличие инертных наполнителей, которые являются аккумуляторами выделяемого тепла. Чем больше наполнителя в твердой фазе, тем ниже максимальная температура. Объем массы LCC отражает влияние размера куба на выделение тепла. Плотность LCC, теплопроводность и теплоемкость объединены в термине теплопроводности, который описывает скорость изменения температуры в массе, которая зависит от физических характеристик исходных ингредиентов в смешивании. Общая площадь поверхности является косвенным параметром потерь тепла для массы LCC, при этом более высокие площади поверхности приводят к более высоким потерям тепла.

(3)

Тарасов и др. (2010) сравнили фактические измеренные температуры с температурами, предсказанными с помощью уравнения 4, и расчетные температуры хорошо сравниваются с измеренными температурами. Исследователи обнаружили, что подобранная модель объясняет 89,3% изменчивости температур. Более эффективная теплоизоляция форм, вероятно, дала бы еще более высокую корреляцию. Хотя эту функцию можно использовать только для прогнозирования температуры в лабораторных условиях, она отражает общую тенденцию, указывающую на то, что наиболее доминирующими факторами, влияющими на развитие температуры, являются содержание цемента и объем укладки.

Хотя необходимы дополнительные исследования и местные составляющие влияют на применимость функции, этот метод является разумным для оценки максимальной температуры, возможной во время процесса отверждения LCC. Даже с учетом количества выделяемого тепла не было зарегистрировано проблем с растрескиванием, как это обычно бывает с обычным бетоном. Во время строительства не требуется никаких мер предосторожности, чтобы минимизировать разницу температур между поверхностным LCC и внутренним ядром, в отличие от укладки массивного бетона.

## Теплопроводность

Теплопроводность LCC обычно пропорциональна плотности (чем легче образец, тем выше коэффициент изоляции). В начале 1900-х годов, когда различные изобретатели со всего мира подавали заявки на патенты на LCC (например, Bayer v. Rice 1934), изобретатели в первую очередь сосредоточились на изоляционном потенциале. Патенты на изоляцию изделий из LCC - стен, полов и кровли - можно найти во многих частях мира. Значения изоляции, найденные в ходе исследования, могут быть ограниченными и сбивающими с толку из-за большого разнообразия продукции LCC, производимой по всему миру, и различного качества материалов. Тем не менее, локально доступный LCC всегда должен проверяться на предмет желаемых свойств перед установкой.

Исследования LCC обычно сравнивают, что его теплопроводность значительно ниже, чем у традиционного бетона (Aldridge et al. 2005). В среднем теплопроводность обычного бетона нормальной прочности при комнатной температуре составляет от 1,4 до 3,6 Вт / м · К (0,81–2,09 БТЕ фут / ч (ч фут<sup>2</sup> ° F)) (Bažant and Karlan 1996), тогда как LCC имеет гораздо более низкую теплоотдачу. проводимость.

Обширное исследование, проведенное в Малайзии, показало, что термические свойства LCC могут изменяться в зависимости от состава смеси и добавок (Mydin et al. 2012). В ходе исследования было создано 22 различных смеси, приготовленных с тремя разными плотностями и с различным количеством летучей золы, извести и полипропиленовых волокон в качестве добавок. Различные термические свойства при разной плотности смесей, содержащих только портландцемент, представлены в таблице 2.6.

Меру теплового сопротивления или R-значение можно рассчитать для изоляционной среды с помощью уравнения 5, на которое ссылаются в ASTM C168, Стандартная терминология, относящаяся к теплоизоляционным материалам.

Таблица 2.6. Тепловые свойства LCC при разной плотности

Плотность (кг / м <sup>3</sup> )	Тепловой проводимость (Вт / мК)	Тепловой диффузионность (мм <sup>2</sup> / с)	Специфический тепло (МДж / м <sup>3</sup> К)	Пористость (%)
D	k	α	Cp	
600	0,19	0,35	0,54	69
1,000	0,43	0,54	0,81	49
1,400	0,59	0,60	0,98	36
Миномет	1.4	0,96	1,47	-

1 кг / м<sup>3</sup> = 0,062 фунт / фут<sup>3</sup>

1 Вт / м · К = 0,580 БТЕ · фут / (ч · фут<sup>2</sup> · ° F)

1 мм<sup>2</sup> / с = 0,002 дюйма<sup>2</sup> / с 1 МДж / м<sup>3</sup>К =

26,839 БТЕ / фут<sup>3</sup> · ° F

Источник: Mydin et al. 2012 г.

Значение  $R = L$  (толщина в футах)  $\div$   $k$  (теплопроводность в БТЕ / ч (фут) F)

Значение  $R = L$  (толщина в метрах)  $\div$   $k$  (теплопроводность в Вт / мК)

Единицы R-значения даны в градусах Фаренгейта в квадрате-часах на британскую тепловую единицу или F-ft<sup>2</sup>-h / BTU (кельвин-метр в квадрате на ватт или K-м<sup>2</sup> / Вт). Обратите внимание: чем толще материал, тем выше значение R. Если желательнее более высокое значение R, добавление дополнительной толщины может обеспечить повышенную изоляцию.

Испытания LCC при плотности заливки, содержащей свободную воду, покажут относительно более низкие значения изоляции; при повторном тестировании это значение резко возрастет. Mudin et al. (2012) утверждают, что образцы были испытаны в сухом состоянии. Можно предположить, что LCC, помещенный в сухое поле и полностью высохший, будет работать, как показано в Таблице 2.6. И наоборот, если LCC размещается в земле, где имеется длительная влажность, теплопроводность увеличится, что приведет к снижению изоляционных свойств. Требуется дополнительные испытания для определения значений изоляции в условиях продолжительной влажности.

### Устойчивость к агрессивным средам

LCC демонстрирует хорошую устойчивость к агрессивным средам (Ramamurthy et al. 2009). Большинство пенобетонных смесей, правильно разработанных при низкой плотности, с учетом глубины начального проникновения, абсорбции и скорости абсорбции, обеспечивают хорошую химическую стойкость.

12-месячное исследование сульфатостойкости LCC показало, что LCC обладает хорошей устойчивостью к агрессивному химическому воздействию (Jones and McCarthy 2005b). Сравнение характеристик смесей с песком и летучей золой показало, что смеси с летучей золой показали более высокую карбонизацию, чем смеси с песком. Ускоренное испытание на проникновение хлоридов показало, что характеристики LCC эквивалентны характеристикам обычного бетона с повышенной коррозионной стойкостью при более низких плотностях.

Ячеистая структура LCC и возможная пористость его ячеистых стенок не обязательно делают LCC менее устойчивым к проникновению влаги, чем плотный бетон, но воздушные пустоты действуют как буфер, предотвращающий быстрое проникновение и разрушение.

### Глава 3. Соображения по инженерно-геологическому проектированию

Как и при выборе всех строительных материалов, квалифицированные инженеры-проектировщики должны использовать соответствующие свойства материалов вместе с утвержденными методологиями проектирования и соответствующим образом оценивать приложения LCC. Материалы, описанные в этом руководстве, можно использовать во многих различных геотехнических приложениях. LCC не следует использовать в конструкциях в качестве замены обычных бетонных элементов.

Во многих случаях может потребоваться LCC с большей или меньшей плотностью или прочностью, как описано в Таблице 2.1. Все ячеистые бетоны, в том числе LCC, также могут использоваться как версии традиционных бетонов на легких заполнителях, которые имеют более низкую плотность по сравнению с обычным бетоном. Типовые соображения по проектированию, описанные в этом руководстве, включают инженерно-геологические аспекты использования LCC.

Когда LCC используется в качестве геотехнического материала, приложения и соображения могут включать улучшение несущей способности, снижение гидростатического давления, снижение веса, плавучесть, предотвращение продавливания и другие улучшенные механизмы прочности, увеличенный расчетный срок службы, сейсмические улучшения, контроль повышения температуры во время гидратации, улучшенный дренаж или проницаемость, улучшенное структурное число и более высокий угол внутреннего трения.

#### Уменьшение поселений / уменьшение веса

Наиболее распространенным преимуществом LCC является снижение веса / нагрузки, которое оценивается с использованием метода расчета чистой нагрузки. Этот метод предназначен для оценки изменений эффективного давления почвы (или эффективного вертикального напряжения на месте), которые могут вызвать краткосрочное и долгосрочное оседание в глубоких слоях мягких грунтов. С этой целью следует провести оценку осадки первичной и вторичной консолидации, чтобы определить допустимое увеличение чистой нагрузки на сжимаемые слои грунта, чтобы сохранить ожидаемую осадку в пределах допустимой величины.

В некоторых случаях желательна нулевая чистая нагрузка, что просто означает, что частично выкопанный приповерхностный грунт заменяется обратной засыпкой и насыпью LCC, чтобы в критическом подслое (ax) не происходило чистого увеличения эффективного вертикального напряжения. В таких случаях урегулирование консолидации обычно незначительно.

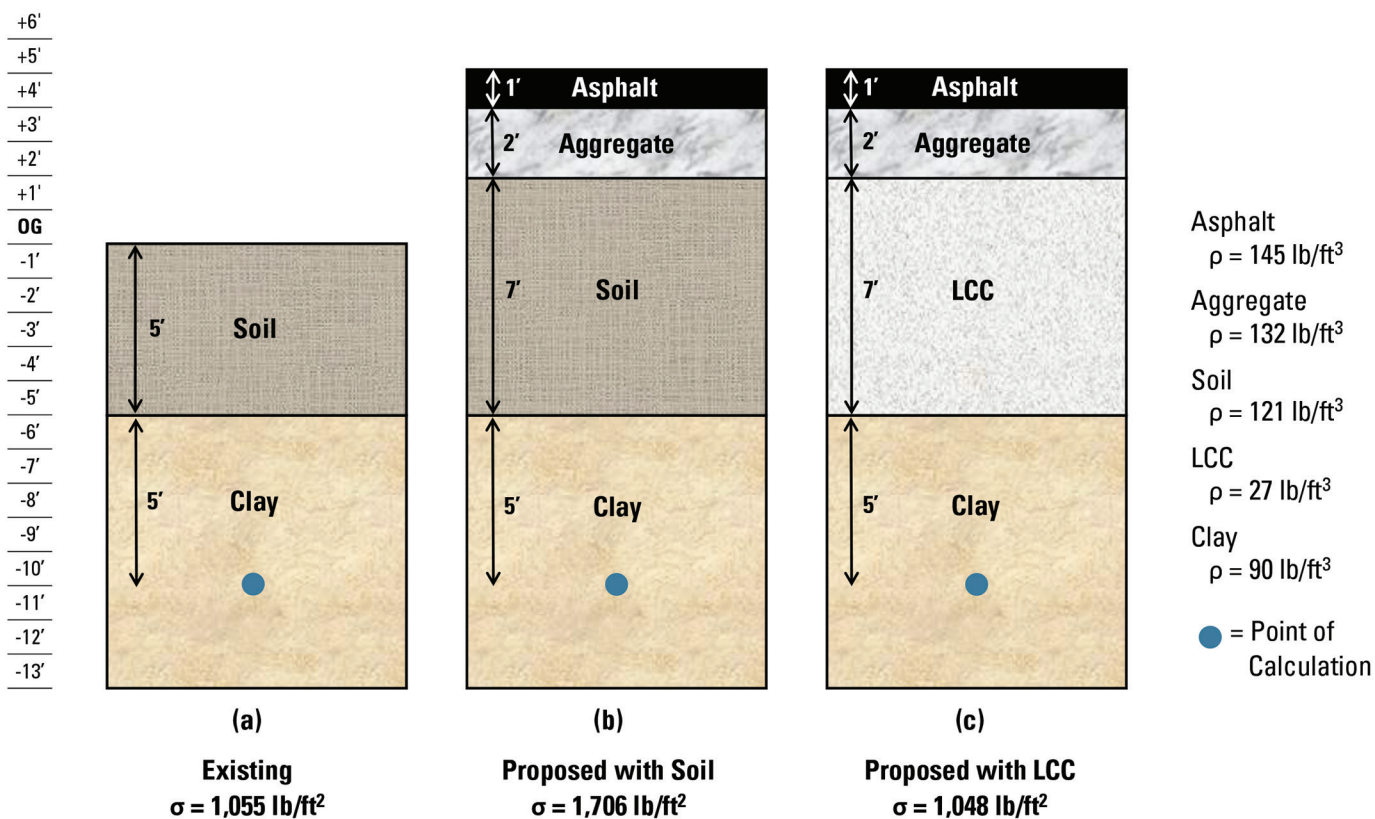
#### Метод расчета чистой нагрузки для сокращения расчетов

Жизненно важным для метода расчета чистой нагрузки является удаление заранее определенного количества грунта земляного полотна и его замена легкой засыпкой, насыпью или легкой конструкцией. Во многих случаях проектирование начинается с того, чтобы не добавлять дополнительный вес сайту (или с нулевой чистой нагрузкой). Однако вариант с нулевой чистой загрузкой требуется не во всех ситуациях. Специфический для проекта подход к проектированию и цель расчета расчетных показателей часто уточняются инженером-геологом в соответствии с фактическими условиями площадки и целями расчетов.

Ниже приведен пример, в котором конечные нагрузки на почву и дорожное покрытие меньше существующей нагрузки на грунт; поэтому ожидается, что ожидаемое урегулирование будет незначительным.

**Пример:** Предлагается новый гибкий участок покрытия, состоящий из 1 фута (0,3 м) асфальта плотностью 145 фунтов / фут<sup>3</sup> (2323 кг / м<sup>3</sup>), более 2 футов (0,6 м) основания из заполнителя с плотностью 132 фунта / фут<sup>3</sup>. (2114 кг / м<sup>3</sup>), более 7 футов (2,1 м) грунта плотностью 121 фунт / фут<sup>3</sup> (1938 кг / м<sup>3</sup>) на глубоком участке сжимаемой глины с плотностью 90 фунтов / фут<sup>3</sup> (1442 кг / м<sup>3</sup>). Поскольку место расположения площадки находится рядом с океаном, новое покрытие планируется иметь шириной 5 футов (1,5 м) выше, чем исходная ненарушенная отметка.

Верх сжимаемого слоя расположен на высоте 5 футов (1,5 м) ниже исходной поверхности земли и не будет нарушен во время строительства. Этот слой неглубокий и имеет потенциал оседания, потому что обычно он консолидирован. Уровень грунтовых вод находится ниже критического слоя, и его ожидаемые колебания не повлияют на условия эффективного вертикального напряжения в глине. Этот расчет выполняется на случайно выбранной глубине 10 футов (3,0 м), как показано на Рисунке 3.1 и подробно описано ниже.



1 фут = 0,305 м      1 фунт / фут<sup>3</sup> = 16,018 кг / м<sup>3</sup>      1 фунт / фут<sup>2</sup> = 4,882 кг / м<sup>2</sup>

PCA

**Рисунок 3.1. Метод расчета чистой нагрузки для уменьшения осадки**

Расчеты существующих условий (см. Рисунок 3.1 (a)): 5 футов (1,5 м) грунта на 5 футов (1,5 м) сжимаемой глины до расчетной точки на 10 футов (3,0 м) ниже уровня земли:

Вертикальное напряжение от грунта: 5 футов (1,5 м) грунта × 121 фунт / фут<sup>3</sup> (1938 кг / м<sup>3</sup>) = 605 фунтов / фут<sup>2</sup> (2907 кг / м<sup>2</sup>)

Вертикальное напряжение (слой глины): слой глины 5 футов (1,5 м) × 90 фунтов / фут<sup>3</sup> (1442 кг / м<sup>3</sup>) = 450 фунтов / фут<sup>2</sup> (2163 кг / м<sup>2</sup>)

Общее вертикальное напряжение на высоте 10 футов (3,0 м) ниже исходного уровня: 605 фунтов / фут<sup>2</sup> (2907 кг / м<sup>2</sup>) + 450 фунтов / фут<sup>2</sup> (2163 кг / м<sup>2</sup>) = 1055 фунтов / фут<sup>2</sup> (5070 кг / м<sup>2</sup>)

Предлагаемые условия без LCC (см. Рисунок 3.1 (b)): Добавьте 1 фут (0,3 м) асфальта, 2 фута (0,6 м) основания из заполнителя и 7 футов (2,1 м) грунта к существующему земляному полотну и рассчитайте при 15 футов (4,6 м) ниже готовой отметки:

Вертикальное напряжение от асфальта: 1 фут (0,3 м) асфальта × 145 фунтов / фут<sup>3</sup> (2323 кг / м<sup>3</sup>) = 145 фунтов / фут<sup>2</sup> (697 кг / м<sup>2</sup>)

Вертикальное напряжение от заполнителя: 2 фута (0,6 м) заполнителя × 132 фунта / фут<sup>3</sup> (2114 кг / м<sup>3</sup>) = 264 фунт / фут<sup>2</sup> (1268 кг / м<sup>2</sup>)

Вертикальное напряжение от грунта: 7 футов (2,1 м) грунта × 121 фунт / фут<sup>3</sup> (1938 кг / м<sup>3</sup>) = 847 фунтов / фут<sup>2</sup> (4070 кг / м<sup>2</sup>)

Вертикальное напряжение от существующего слоя глины: слой глины 5 футов (1,5 м) × 90 фунтов / фут<sup>3</sup> (1442 кг / м<sup>3</sup>) = 450 фунтов / фут<sup>2</sup> (2163 кг / м<sup>2</sup>)

Общее вертикальное напряжение на высоте 15 футов (4,6 м) ниже исходного уровня: 145 фунтов / фут<sup>2</sup> (697 кг / м<sup>2</sup>) + 264 фунт / фут<sup>2</sup> (1268 кг / м<sup>2</sup>) + 847 фунтов / фут<sup>2</sup> (4070 кг / м<sup>2</sup>) + 450 фунтов / фут<sup>2</sup> (2163 кг / м<sup>2</sup>) = 1706 фунтов / фут<sup>2</sup> (8198 кг / м<sup>2</sup>)

Добавление асфальта, щебня и грунта приведет к увеличению на 3178 кг / м<sup>2</sup> по сравнению с существующими условиями. В этом примере инженер-геотехник решает, что дополнительные материалы вызовут неприемлемую осадку, и рекомендует вернуть давление к исходному существующему состоянию или ниже.

Предлагаемые окончательные условия с LCC (см. Рисунок 3.1 (с)): Замените почву на 7 футов (2,1 м) LCC с плотностью 27 фунтов / фут<sup>3</sup> (432 кг / м<sup>3</sup>):

Вертикальное напряжение от асфальта: 1 фут (0,3 м) асфальта × 145 фунтов / фут<sup>3</sup> (2323 кг / м<sup>3</sup>) = 145 фунтов / фут<sup>2</sup> (697 кг / м<sup>2</sup>)

Вертикальное напряжение от заполнителя: 2 фута (0,6 м) заполнителя × 132 фунта / фут<sup>3</sup> (2114 кг / м<sup>3</sup>) = 264 фунт / фут<sup>2</sup> (1268 кг / м<sup>2</sup>)

Вертикальное напряжение от замены LCC: 7 футов (2,1 м) LCC × 27 фунтов / фут<sup>3</sup> (432 кг / м<sup>3</sup>) = 189 фунтов / фут<sup>2</sup> (907 кг / м<sup>2</sup>)

Вертикальное напряжение от существующего слоя глины: слой глины 5 футов (1,5 м) × 90 фунтов / фут<sup>3</sup> (1442 кг / м<sup>3</sup>) = 450 фунтов / фут<sup>2</sup> (2163 кг / м<sup>2</sup>)

Общее вертикальное напряжение на высоте 15 футов (4,6 м) ниже исходного уровня: 145 фунтов / фут<sup>2</sup> (697 кг / м<sup>2</sup>) + 264 фунт / фут<sup>2</sup> (1268 кг / м<sup>2</sup>) + 189 фунтов / фут<sup>2</sup> (907 кг / м<sup>2</sup>) + 450 фунтов / фут<sup>2</sup> (2163 кг / м<sup>2</sup>) = 1048 фунтов / фут<sup>2</sup> (5,035 кг / м<sup>2</sup>)

За счет использования LCC вместо грунта в этом примере общее вертикальное напряжение снижается на 7 фунтов / фут<sup>2</sup> (34 кг / м<sup>2</sup>) по сравнению с существующими условиями. Это отрицательное количество приводит к небольшому снижению веса нетто в этом месте и указывает на то, что вариант LCC является жизнеспособной альтернативой для получения незначительной компенсации.

В приведенном выше примере не учитываются колебания грунтовых вод. Если это возможно в течение жизненного цикла проекта, расчеты общих вертикальных напряжений следует заменить расчетами эффективных вертикальных напряжений, которые учитывают количество изменений уровня грунтовых вод. Кроме того, в зависимости от величины колебаний уровня грунтовых вод, как обсуждается далее в этой главе, могут потребоваться расчеты плавучести.

Поскольку окончательное расчетное давление в расчетной точке меньше первоначального давления в месте, где грунт оставался неизменным, расчет показывает, что проект не вызовет осадки, и проект готов к отправке инженеру-геологу на утверждение. Используя правильно охарактеризованный профиль, инженер-геолог может снизить затраты на площадке, допуская некоторый положительный вес нетто и, следовательно, меньший объем земляных работ и легкую засыпку. Инженер может также знать, что почвы на площадке чрезвычайно чувствительны и что отрицательная сетка

вес необходим для достижения соответствующего FOS. Важно отметить, что этот метод расчета чистой нагрузки не включает транспортные нагрузки, а только нагрузки замещения грунта.

## Несущая способность

LCC - это жесткий продукт на основе цемента, который ведет себя так же, как конструкционный бетон, при гораздо более низких плотностях и прочности. Разрушение обычно наблюдается как раздавливание, но также может быть следствием разрушения или сдвига. Допустимая несущая способность секции рассчитывается на основе минимально необходимой прочности на сжатие предоставленной LCC. Использование указанной минимальной прочности служит только для увеличения конечной FOS, достигаемой за счет использования фактической прочности LCC, испытанной в ходе работы. Эта несущая способность затем переносится через слой LCC, расширяясь с глубиной примерно под углом 45 градусов (в зависимости от плотности LCC), чтобы распределить нагрузку на нижнее земляное полотно. Важно отметить, что угол разрушения при сдвиге и угол распределения нагрузки не совпадают.

**Пример:** На рис. 3.2 груз в 10 000 фунтов (4536 кг) помещен на стальную плиту размером 2 фута (0,6 м) в квадрате.

Эта нагруженная плита расположена на слое толщиной 4 фута (1,2 м) из LCC (481 кг / м<sup>3</sup>) толщиной 30 фунтов / фут<sup>3</sup>, имеющем минимальную прочность на сжатие 40 фунтов / дюйм<sup>2</sup> (28,123 кг / м<sup>2</sup>). Грунты ниже LCC имеют допустимую несущую способность 1 000 фунтов / фут<sup>2</sup> (4882 кг / м<sup>2</sup>). Следующие расчеты используются для определения FOS с LCC.

Напряжение сжатия: 10000 фунтов на 2 фут<sup>2</sup> = 10000 фунтов ÷ (2 футов × 2 фута) = 10000 фунтов ÷ 4 фут<sup>2</sup> = 2500 фунтов / фут<sup>2</sup>

Напряжение сжатия: 4536 кг, опора на 0,6 м квадрат = 4536 кг ÷ (0,6 м × 0,6 м) = 4536 кг ÷ 0,36 м<sup>2</sup> = 12 600 кг / м<sup>2</sup>

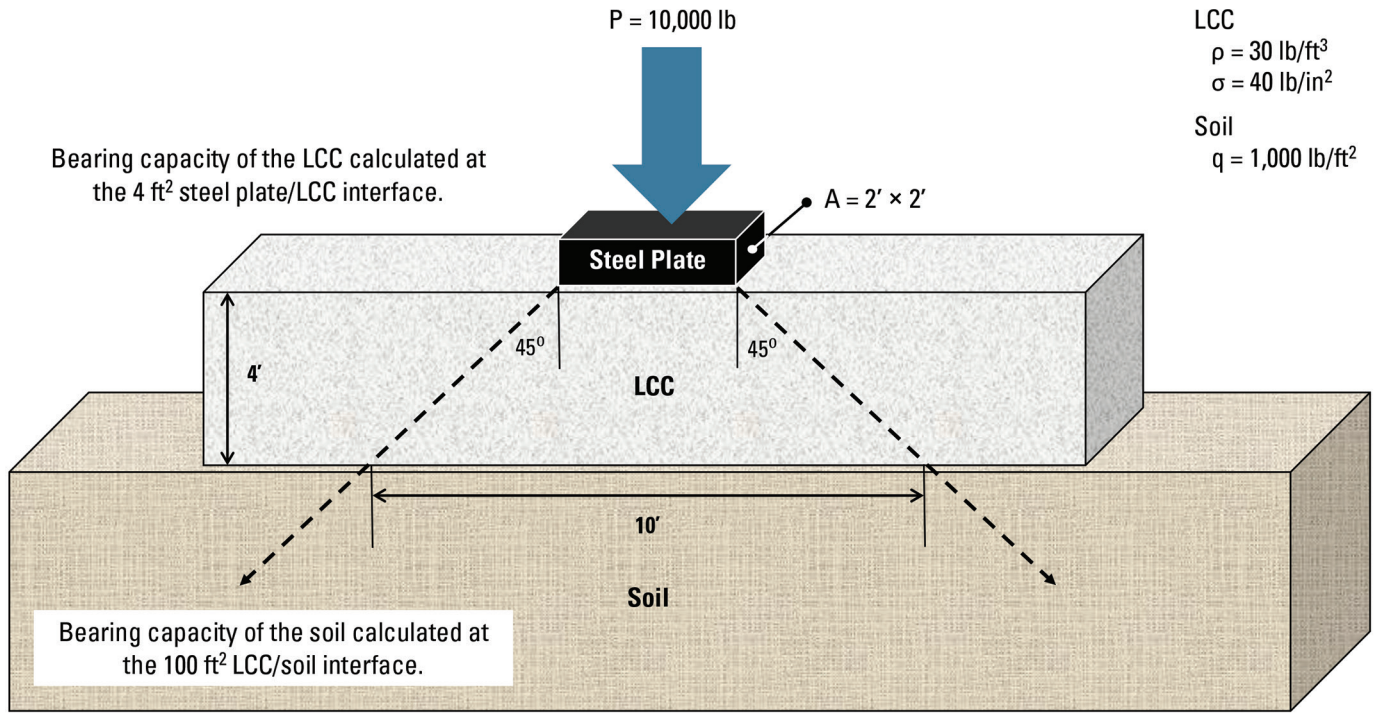
Прочность на сжатие: 40 фунтов / дюйм<sup>2</sup> × (12 дюймов / фут × 12 дюймов / фут) = 40 фунтов / дюйм<sup>2</sup> × 144 дюйм<sup>2</sup> / фут<sup>2</sup> = 5760 фунтов / фут<sup>2</sup>

Прочность на сжатие: 28,123 кг / м<sup>2</sup>

В зависимости от расчетных коэффициентов безопасности результаты показывают, что давление (напряжение сжатия) от нагрузки 2 500 фунтов / фут<sup>2</sup> (12 600 кг / м<sup>2</sup>) могут поддерживаться несущей способностью (пределом прочности на сжатие) LCC, которая составляет 5760 фунтов / фут<sup>2</sup> (28 123 кг / м<sup>2</sup>).

Несущее давление на нижележащий грунт рассчитывается на площади 10 футов на 10 футов (3,05 м на 3,05 м) или 100 футов<sup>2</sup> (9,30 м<sup>2</sup>), исходя из квадратной нагрузки 2 фута (0,6 м), распределенной под углом 45 градусов. под углом до глубины 4 фута (1,2 м).





1 фут = 0,305 м      1 фунт = 0,454 кг      1 фунт / фут<sup>3</sup> = 16,018 кг / м<sup>3</sup>      1 фунт / дюйм<sup>2</sup> = 0,007 МПа      1 фунт / фут<sup>2</sup> = 4,882 кг / м<sup>2</sup>

РСА

**Рисунок 3.2. Несущая способность и разброс сжимающих сил в ЛСС**

Почва:  $10000 \text{ фунтов} \div 100 \text{ фут}^2 = 100 \text{ фунтов} / \text{фут}^2$  ЛСС:

$30 \text{ фунтов} / \text{фут}^3 \times 4,0 \text{ фута} = 120 \text{ фунтов} / \text{фут}^2$

Общее давление:  $100 \text{ фунтов} / \text{фут}^2 + 120 \text{ фунтов} / \text{фут}^2 = 220 \text{ фунтов} / \text{фут}^2$

Конструкция FOS:  $\text{несущая способность} \div \text{общее давление} = 1000 \text{ фунт} / \text{фут}^2 \div 220 \text{ фунт} / \text{фут}^2 = 4,5$

Грунт:  $4536 \text{ кг} \div 9,30 \text{ м}^2 = 488 \text{ кг} / \text{м}^2$

ЛСС:  $481 \text{ кг} / \text{м}^3 \times 1,2 \text{ м} = 577 \text{ кг} / \text{м}^2$

Общее давление:  $488 \text{ кг} / \text{м}^2 + 577 \text{ кг} / \text{м}^2 = 1065 \text{ кг} / \text{м}^2$

Конструкция FOS:  $\text{несущая способность} \div \text{общее давление} = 4882 \text{ кг} / \text{м}^2 \div 1065 \text{ кг} / \text{м}^2 = 4,6$

Результаты показывают, что общее давление от нагрузки  $220 \text{ фунтов} / \text{фут}^2$  ( $1065 \text{ кг} / \text{м}^2$ ) может поддерживаться несущей способностью почвы, которая составляет  $1000 \text{ фунтов} / \text{фут}^2$  ( $4882 \text{ кг} / \text{м}^2$ ).

Самая низкая конструкция FOS находится на интерфейсе между пластиной и ЛСС, а именно:

Расчетный FOS:  $5760 \text{ фунтов} / \text{фут}^2 \div 2500 \text{ фунтов} / \text{фут}^2 = 2,3$

Расчетный FOS:  $28123 \text{ кг} / \text{м}^2 \div 12,600 \text{ кг} / \text{м}^2 = 2,2$

Отметим, что не менее важно проверить прогибы и другие критерии проекта.

### Пробивные ножницы

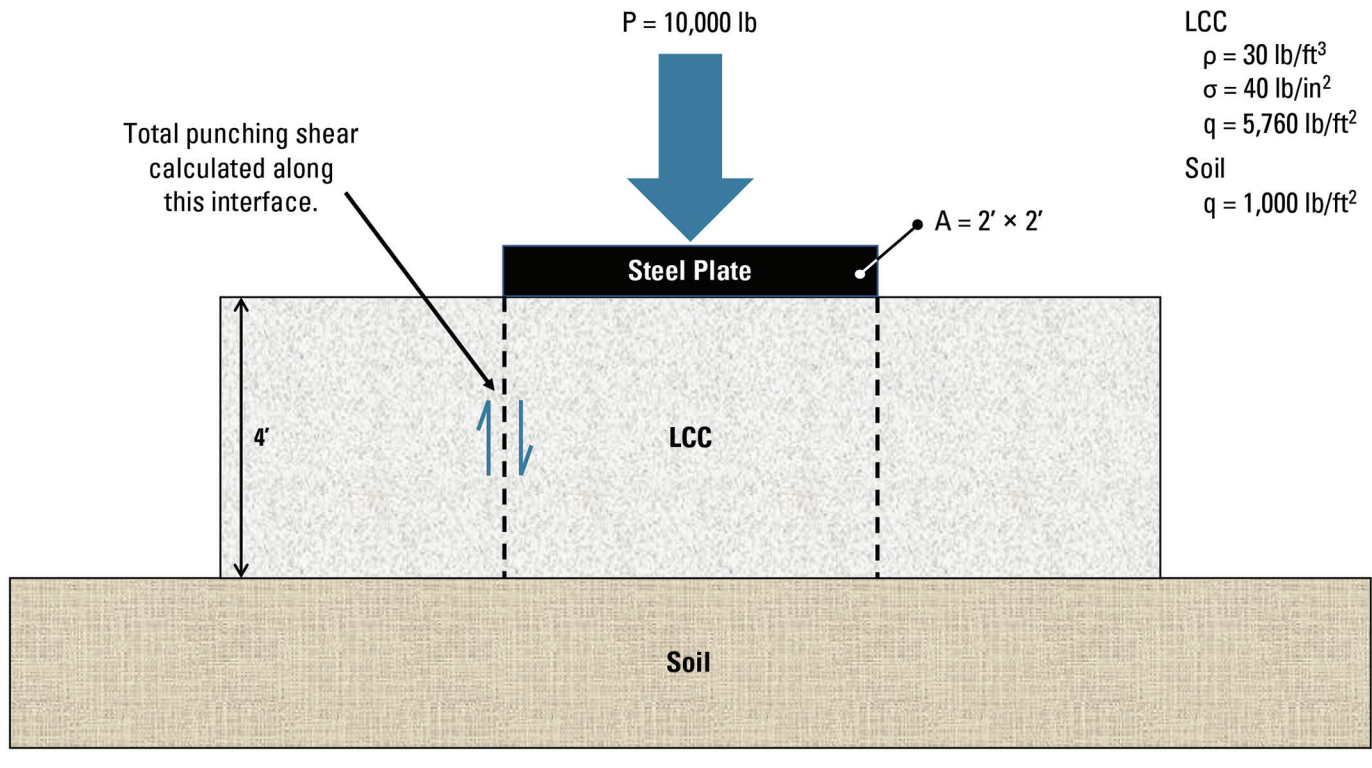
Когда ЛСС используется в несущем слое, пробивной сдвиг следует проверять по периметру, чтобы убедиться, что слой достаточно толстый, чтобы выдерживать сдвигающую нагрузку. Для ранее рассмотренного примера несущей способности и результатов сдвига при продавливании будет рассчитываться по краю стального листа, как показано на Рисунке 3.3 и подробно описано ниже.

Сопrotивление сдвигу на сторону:  $2 \text{ фута в ширину на } 4 \text{ фута в глубину} = 2 \text{ фута} \times 4 \text{ фута} = 8 \text{ футов}^2$

Сопrotивление сдвигу с каждой стороны:  $\text{ширина } 0,6 \text{ м на глубину } 1,2 \text{ м} = 0,6 \text{ м} \times 1,2 \text{ м} = 0,72 \text{ м}^2$

Общее сопротивление сдвигу:  $\text{сопrotивление сдвигу на каждую сторону} \times 4 \text{ стороны} = 8 \text{ фут}^2 \times 4 = 32 \text{ фут}^2$

Общее сопротивление сдвигу:  $\text{сопrotивление сдвигу на сторону} \times 4 \text{ стороны} = 0,72 \text{ м}^2 \times 4 = 2,88 \text{ м}^2$



1 фут = 0,305 м      1 фунт = 0,454 кг      1 фунт / фут<sup>2</sup> = 16,018 кг / м<sup>2</sup>      1 фунт / дюйм<sup>2</sup> = 0,007 МПа      1 фунт / фут<sup>3</sup> = 4,882 кг / м<sup>3</sup>

РСА

Рисунок 3.3. Сопротивление продавливанию в слое LCC

Консервативно, если предполагается, что прочность на сдвиг LCC составляет половину его прочности на сжатие, общая прочность на сдвиг при штамповке может быть определена следующим образом:

Общее сопротивление сдвигу при штамповке: общее сопротивление сдвигу × (прочность на сжатие ÷ 2) = 32 фут<sup>2</sup> × (5760 фунтов / фут<sup>2</sup> ÷ 2) = 92,160 фунтов

Общее сопротивление сдвигу при штамповке: общее сопротивление сдвигу × (прочность на сжатие ÷ 2) = 2,88 м<sup>2</sup> × (28,123 кг / м<sup>2</sup> ÷ 2) = 40 497 кг

## Плавучесть

Одной из основных причин использования LCC является его низкая плотность. Его плотность обычно намного меньше плотности воды, и плавучесть иногда может быть серьезной проблемой. Чтобы учесть плавучесть, необходимо определить уровень грунтовых вод наихудшего случая, а также количество LCC, которое будет затоплено. Затем выполняется расчет баланса веса, чтобы убедиться, что веса над заполнением LCC достаточно для преодоления любых эффектов плавучести. Обычно это выполняется для колонны размером 1 фут<sup>2</sup> (или 1 м<sup>2</sup>) для простых вычислений.

Выталкивающая сила, которую будет испытывать погруженная часть LCC, рассчитывается на основе наихудшего сценария с использованием плотности заливки LCC. Выталкивающая сила для

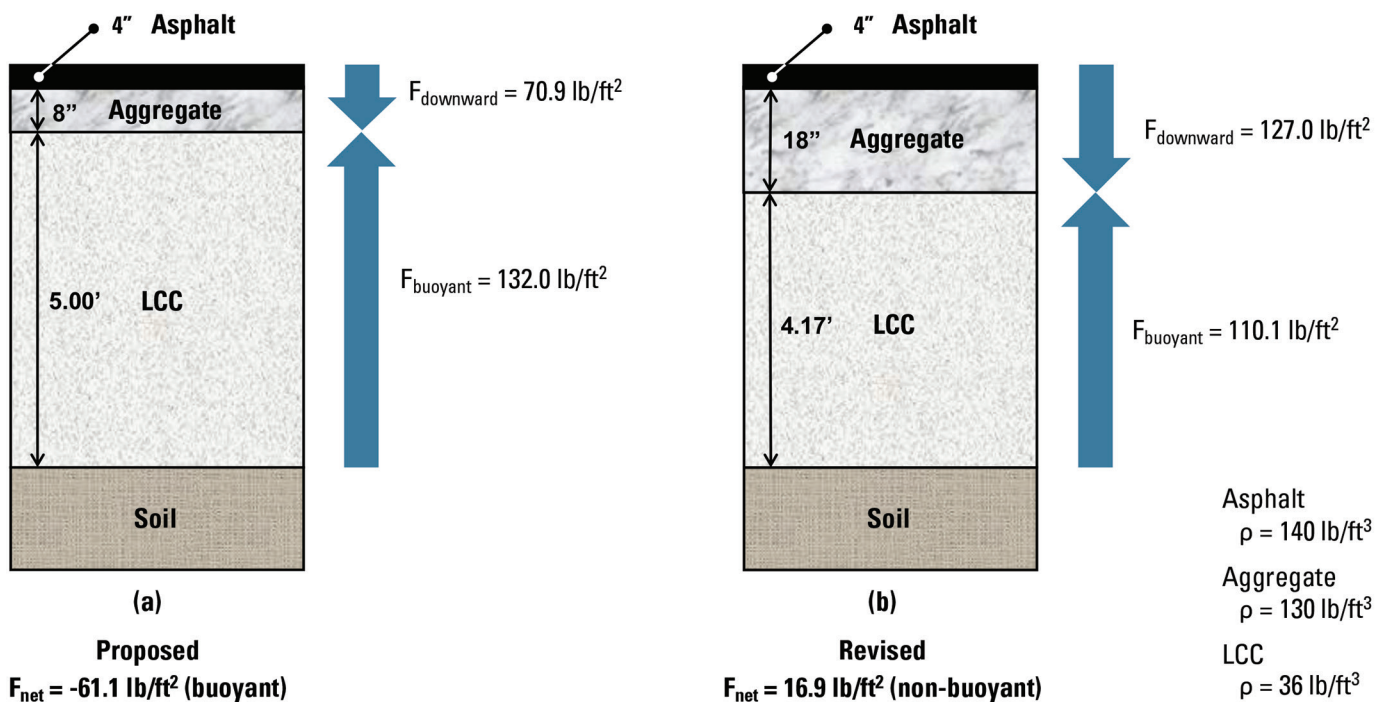
один кубический фут (или кубический метр) рассчитывается путем вычитания плотности LCC из плотности воды. Например, выталкивающая сила на погруженной насыпи LCC на 36 фунтов / фут<sup>3</sup> (577 кг / м<sup>3</sup>) определяется следующим образом:

Выталкивающая сила: плотность воды - плотность LCC = 62,4 фунта / фут<sup>3</sup> - 36 фунтов / фут<sup>3</sup> = 26,4 фунта / фут<sup>3</sup>

Выталкивающая сила: плотность воды - плотность LCC = 1000 кг / м<sup>3</sup> - 577 кг / м<sup>3</sup> = 423 кг / м<sup>3</sup>

Подводный наполнитель LCC суммируется для обеспечения общей поднимающей силы, а вес над уровнем грунтовых вод также суммируется для обеспечения сдерживающей силы. Затем рассчитывается чистая плавучесть путем вычитания общей направленной вверх силы из общей направленной вниз силы для получения положительного или отрицательного результата. Если восходящая сила больше, чем нисходящая, общая масса LCC может выплыть из земли, и необходимо будет пересмотреть конструкцию. FOS рассчитывается путем деления направленной вниз силы на направленную вверх.

**Пример:** Секция толщиной 5 футов (1,5 м) и LCC 36 фунтов / фут<sup>3</sup> (577 кг / м<sup>3</sup>) должна быть размещена непосредственно под предлагаемым участком тротуара для жилых помещений из 4 дюймов (100 мм) асфальта плотностью 140 фунтов / фут<sup>3</sup> (2243 кг / м<sup>3</sup>) более 8 дюймов (200 мм) заполнителя с плотностью 2082 кг / м<sup>3</sup> (130 фунтов / фут<sup>3</sup>) (см. Рисунок 3.4 (а)).



1 дюйм = 25,4 мм      1 фут = 0,305 м      1 фунт / фут³ = 16,018 кг / м³      1 фунт / фут² = 4,882 кг / м²

PCA

### Рисунок 3.4. Соображения плавучести в слое LCC

Район, как известно, наводнен, поэтому в худшем случае уровень грунтовых вод находится на поверхности. Плавучее состояние определяется следующим образом:

Подъемная сила: 5 футов × (плотность воды - плотность LCC) = 5 футов × (62,4 фунта / фут³ - 36 фунтов / фут³) = 5 футов × 26,4 фунта / фут³ = 132,0 фунт / фут²

Выталкивающая сила: 1,5 м × (плотность воды - плотность LCC) = 1,5 м × (1000 кг / м³ - 577 кг / м³) = 1,5 м × 423 кг / м³ = 634,5 кг / м²

В этом примере участок покрытия также находится под водой, поэтому его плотность в погруженном состоянии включается путем вычитания веса воды из плотности участка на месте следующим образом:

Сила, направленная вниз: [(4 дюйма ÷ (12 дюймов / фут)) × (плотность асфальта - плотность воды)] + [(8 дюймов ÷ (12 дюймов / фут)) × (плотность заполнителя - плотность воды)] = [0,33 фута × (140 фунтов / фут³ - 62,4 фунта / фут³)] + [0,67 футов × (130 фунтов / фут³ - 62,4 фунта / фут³)] = (0,33 фута × 77,6 фунта / фут³) + (0,67 фута × 67,6 фунта / фут³) = 25,6 фунт / фут² + 45,3 фунт / фут² = 70,9 фунт / фут²

Сила, направленная вниз: [(100 мм ÷ (1000 мм / м)) × (плотность асфальта - плотность воды)] + [(200 мм ÷ (1000 мм / м)) × (плотность заполнителя - плотность воды)] = [0,1 м × (2243 кг / м³ - 1000 кг / м³)] + [0,2 м × (2082 кг / м³ - 1000 кг / м³)] = (0,1 м × 1243 кг / м³) + (0,2 м × 1,082 кг / м³) = 124,3 кг / м² + 216,4 кг / м² = 340,7 кг / м²

Это приводит к плавучести, поскольку восходящая сила 132,0 фунт / фут² (634,5 кг / м²) больше, чем направленная вниз сила 70,9 фунт / фут² (340,7 кг / м²). Чтобы сохранить постоянную конечную отметку проезжей части и избежать дорогостоящих выемок грунта на месте, толщина слоя LCC и заполнителя основания регулируется. Пересмотренный участок покрытия будет иметь 4,17 фута (1,27 м) LCC и 18 дюймов (457 мм) основания из заполнителя (см. Рисунок

3.4 (б)). Пересмотренная выталкивающая сила рассчитывается следующим образом:

Пересмотренная выталкивающая сила: 4,17 фута × (плотность воды - плотность LCC) = 4,17 фута × (62,4 фунта / фут³ - 36 фунтов / фут³) = 4,17 фута × 26,4 фунта / фут³ = 110,1 фунт / фут²

Пересмотренная выталкивающая сила:  $1,27 \text{ м} \times (\text{плотность воды} - \text{плотность LCC}) = 1,27 \text{ м} \times (1000 \text{ кг / м}^3 - 577 \text{ кг / м}^3) = 1,27 \text{ м} \times 423 \text{ кг / м}^3 = 537,2 \text{ кг / м}^2$

Аналогичным образом, новое состояние плавучести рассчитывается следующим образом:

Пересмотренная направленная вниз сила:  $[(4 \text{ дюйма} \div (12 \text{ дюймов / фут})) \times (\text{плотность асфальта} - \text{плотность воды})] + [(18 \text{ дюймов} \div (12 \text{ дюймов / фут})) \times (\text{плотность заполнителя} - \text{плотность воды})] = [0,33 \text{ фута} \times (140 \text{ фунтов / фут}^3 - 62,4 \text{ фунта / фут}^3)] + [1,50 \text{ фута} \times (130 \text{ фунтов / фут}^3 - 62,4 \text{ фунта / фут}^3)] = (0,33 \text{ фута} \times 77,6 \text{ фунта / фут}^3) + (1,50 \text{ фута} \times 67,6 \text{ фунт / фут}^3) = 25,6 \text{ фунт / фут}^2 + 101,4 \text{ фунт / фут}^2 = 127,0 \text{ фунт / фут}^2$

Пересмотренная направленная вниз сила:  $[(100 \text{ мм} \div (1000 \text{ мм / м})) \times (\text{плотность асфальта} - \text{плотность воды})] + [(457 \text{ мм} \div (1000 \text{ мм / м})) \times (\text{плотность заполнителя} - \text{плотность воды})] = [0,1 \text{ м} \times (2243 \text{ кг / м}^3 - 1000 \text{ кг / м}^3)] + [0,46 \text{ м} \times (2082 \text{ кг / м}^3 - 1000 \text{ кг / м}^3)] = (0,1 \text{ м} \times 1243 \text{ кг / м}^3) + (0,46 \text{ м} \times 1082 \text{ кг / м}^3) = 124,3 \text{ кг / м}^2 + 497,7 \text{ кг / м}^2 = 622,0 \text{ кг / м}^2$

Регулировка LCC и базовых слоев заполнителя позволяет преодолеть состояние плавучести, поскольку пересмотренная восходящая сила 110,1 фунт / фут<sup>2</sup> (537,2 кг / м<sup>2</sup>) теперь меньше пересмотренной нисходящей силы 127,0 фунт / фут<sup>2</sup> (622,0 кг / м<sup>2</sup>). FOS в условиях наводнения теперь можно определить следующим образом:

FOS: направленная вниз сила  $\div$  направленная вверх сила =  $127,0 \text{ фунт / фут}^2 \div 110,1 \text{ фунт / фут}^2 = 1,15$

FOS: направленная вниз сила  $\div$  направленная вверх сила =  $622,0 \text{ кг / м}^2 \div 537,2 \text{ кг / м}^2 = 1,16$

FOS 1,15 или выше обычно является приемлемым значением для такого типа ситуации.

### Основания и основания дорожного покрытия

LCC, с его многочисленными вариациями, является отличным материалом основания и основания дорожного покрытия и должен быть рассмотрен проектировщиками дорожного покрытия. Как упоминалось ранее, несмотря на свой легкий вес, LCC имеет высокую несущую способность, которая обычно выше, чем у грунтов или уплотненных насыпей. При размещении в конструкции дорожного покрытия LCC приводит к получению значительно более жесткого слоя, который не растягивается, не разрушается и не склонен к оседанию.

### Давление на грунт обратной засыпки подпорной стены

LCC помещается на свое окончательное место в виде жидкого материала, который затем затвердевает и схватывается в течение следующих 8–12 часов. В течение этого установленного периода любая опалубка или подпорные стены должны выдерживать всю гидростатическую силу жидкого LCC.

Хотя LCC легкий, его горизонтальное давление не снижается, как в засыпном грунте, когда он полностью жидкий. Например, LCC с плотностью заливки 2,0 фута (0,61 м) и 30 фунтов / фут<sup>3</sup> (481 кг / м<sup>3</sup>) будет оказывать эквивалентное давление жидкости 60 фунтов / фут<sup>2</sup> (293 кг / м<sup>2</sup>) на тыльную сторону стены. Это лишь немного ниже долгосрочной расчетной нагрузки для многих грунтов при проектировании на активную силу.

Эту силу можно уменьшить, ограничив высоту подъема мест размещения LCC. Важно понимать, что на следующий день после установки LCC полностью затвердела и больше не оказывает давления жидкости на опалубку или стену. В случаях, когда LCC размещается за сборными стенами, требуются временные распорки. Долговременное крепление стен следует определять с помощью сопротивления, основанного на полномасштабных испытаниях на выдергивание. Любой анкерный материал должен быть совместим с LCC в течение расчетного срока службы.

Конструирование LCC в качестве засыпки - это больше, чем просто определение гидростатического давления жидкости; существует также давление почвы рядом с LCC, так как LCC недостаточно толстая, чтобы сдерживать движение почвы и воды. При проектировании подпорной конструкции с засыпкой из LCC проектировщик должен оценить нагрузки от слоя LCC вместе с любыми нагрузками, приложенными к слою LCC со стороны почвы за ним. Стандартной практикой для устранения или уменьшения этой силы является наклон поверхности раздела грунта, который должен быть заглублен, под углом, который считается стабильным. Затем LCC можно разместить на склоне (предпочтительно ступенчато), создав таким образом условие нулевой боковой нагрузки.

## Дренаж

Учитывая, что LCC должен быть защищен от движения и атмосферных воздействий, для заливки LCC должен быть предусмотрен соответствующий дренаж, даже если он имеет низкую проницаемость и может легко проливать воду. Когда LCC размещается за сборными стенами, необходим вертикальный дренаж с дренажными отверстиями или другие непрерывные пути для уклона, чтобы предотвратить чрезмерное гидравлическое давление на стены. Кроме того, дренажные отверстия или другие выделения должны стекать в сторону от проезжей части.

## Глава 4. Дизайн смеси

LCC состоит из портландцемента, воды и воздуха (добавляется через предварительно приготовленный пенообразователь). В смесь могут быть включены дополнительные ингредиенты, если они не влияют отрицательно на качество, размер и распределение воздушных матриц. Некоторые общие примеры включают летучую золу, шлаковый цемент, микрокремнезем, волокна, ускорители, замедлители схватывания и другие модификаторы цемента. Хотя смеси LCC обычно разрабатываются установщиками LCC, в этом руководстве описывается, как создать простую конструкцию смеси для достижения правильной плотности при известном соотношении вода / цемент. Все ингредиенты и добавки должны быть проверены на их совместимость со смесью LCC и их влияние на свойства LCC в свежем и затвердевшем состоянии перед использованием в проекте.

### Ингредиенты

#### Портландцемент

В LCC можно использовать все типы портландцемента. ASTM C150, Стандартная спецификация портландцемента, описывает типы портландцемента, перечисленные в таблице 4.1.

Смешанные гидравлические цементы, полученные путем тщательного и равномерного измельчения или смешивания двух или более типов мелких материалов, также могут использоваться в LCC. ASTM C595, Стандартные спецификации для смешанных гидравлических цементов, выделяет четыре основных класса смешанных цементов, как указано в таблице 4.2.

Кроме того, в свете интереса в отрасли к спецификациям, основанным на характеристиках, ASTM C1157, Стандартные технические условия для гидравлического цемента, описывает цементы по их характеристикам, указанным в таблице 4.3.

Различные типы портландцемента производятся в соответствии с различными физическими и химическими требованиями для конкретных целей (Kosmatka and Wilson 2016), поэтому рекомендуется проверить наличие и совместимость проекта на местах.

#### Воды

В смеси LCC вода смешивается с цементом для образования суспензии, а вода также смешивается с пенообразователем для создания предварительно сформированной пены. Чистая питьевая вода важна для пенообразования. Качество воды должно соответствовать требованиям ASTM C1602, Стандартные технические условия на воду для смешивания, используемую в

Таблица 4.1. Типы портландцемента

Тип цемента	Описание
Тип I	Обычный
Тип II	Умеренная сульфатостойкость
Тип II (МН)	Умеренная теплота гидратации / Умеренная сульфатостойкость
Тип III	Высокая ранняя прочность
Тип IV	Низкая теплота гидратации
Тип V	Высокая сульфатостойкость

Источник: ASTM C150, Стандартные спецификации для портландцемента.

Таблица 4.2. Смешанные типы гидравлического цемента

Тип цемента	Описание
Тип IS	Портландцемент доменный шлаковый (допускается до 95% шлака)
Тип IP	Портланд-пуццолановый цемент (до 40% пуццолан [летучая зола] разрешен)
Тип IL	Портланд-известняковый цемент (до 15% известняк разрешен)
Введи это	Трехкомпонентный цемент с добавками (портландцемент) цемент плюс два дополнительных вяжущих материала)

Источник: ASTM C595, Стандартные спецификации для смешанных гидравлических цементов.

Таблица 4.3. Характеристики характеристик гидравлического цемента

Тип цемента	Описание
Тип ГУ	Общее использование
Тип HE	Высокая ранняя прочность
Тип MS	Умеренная сульфатостойкость
Тип HS	Высокая сульфатостойкость
Тип МН	Умеренная теплота гидратации
Тип LH	Низкая теплота увлажнения

Источник: ASTM C1157, Стандартные технические условия для гидравлического цемента.

Производство гидроцементного бетона. Можно использовать непитьевую воду; тем не менее, рекомендуется, чтобы проект смеси был подготовлен в лаборатории с фактическими пробами воды на участке до начала проекта. Вредные компоненты в воде могут привести к разрушению материала и разрушению окончательной смеси.

Потребление воздуха от воздушного компрессора составляет большую часть объема любой конструкции смеси LCC. Температура воздуха может повлиять на скорость отверждения, а любые загрязнители в воздухе могут вызвать сбой пенообразователя. Известно, что изменение температуры захваченного воздуха в пустотах во время экзотермической реакции отверждения приводит к расширению смеси.

Хотя обычно используется естественный воздух, и мало что можно сделать для изменения атмосферы, важно понимать, что свойства, температура и чистота этого ингредиента важны для успеха любой смеси LCC. Загрязнение воздушных компрессоров чрезмерным количеством масла также может вызвать колебания плотности LCC.

### Пенообразователи

Пенообразователи или пенообразователи химически разработан для создания и поддержания стабильных воздушных пустот в конечном продукте LCC. Наиболее распространенные запатентованные рецептуры пенообразователей содержат гидролизаты белков или синтетические поверхностно-активные вещества (ACI 2006). Имеющиеся в продаже пенообразователи должны соответствовать требованиям стандарта ASTM C869 «Стандартные технические условия на пенообразователи, используемые при изготовлении предварительно отформованной пены для ячеистого бетона».

Пенообразователь и состав смеси следует протестировать перед использованием, чтобы убедиться в получении требуемых свойств. Рекомендуется согласовывать действия с производителем пенообразователя, чтобы обеспечить получение необходимых свойств для успеха проекта.

### Соотношение вода / цемент

Отношение в / ц - это вес воды в партии, деленный на вес цемента в партии. Подойдет любая единица веса, например фунты или килограммы. Чем выше соотношение в / ц, тем более текучая смесь и тем ниже ее прочность. И наоборот, чем ниже соотношение вода / цемент, тем прочнее и гуще смесь.

LCC обычно смешивают с соотношением в / ц от 0,45 до 0,80, как указано в рекомендациях производителя пенопласта. Слишком высокое соотношение воды и воды может вызвать сегрегацию и избыток стекающей воды. Вес воды в смеси LCC определяется из всех источников, включая воду для смешивания, пенную воду, содержание влаги в заполнителях (если используется) и неактивные части примесей.

### Пример конструкции смеси (процедура проб и ошибок)

Один из подходов к созданию дизайна смеси LCC, обычно выполняемый подрядчиком, включает повторяющийся процесс, который может потребовать нескольких итераций для получения правильного количества ингредиентов. Процесс начинается с известных констант целевой плотности и водо-водяного отношения, которые обычно указываются в проектных спецификациях или технических чертежах или инженером-проектировщиком, который во многих случаях является инженером-геологом.

Хотя плотность LCC можно изменять, регулируя любой из ингредиентов, для того, чтобы плотность оставалась на заданном уровне, увеличение одного ингредиента потребует уменьшения другого для компенсации. Учитывая, что эти ингредиенты имеют разную плотность, состав смеси быстро меняется с увеличением или уменьшением одного ингредиента, в то время как целевая плотность никогда не меняется и считается постоянной. Это соотношения компонентов, которые изменяются по мере изменения конструкции смеси для достижения целевой плотности.

Прежде чем будет определена конструкция смеси LCC, должны быть известны все критерии проектирования. К ним относятся расчетная плотность смеси, соотношение в / ц и удельный вес (SG) или плотности всех различных ингредиентов.

При проектировании смесей обычно считается, что вода имеет плотность 62,4 фунта / фут<sup>3</sup> (1000 кг / м<sup>3</sup>) со значением удельной плотности 1,0 в зависимости от ее температуры и чистоты. Производство портландцемента строго контролируется с постоянной расчетной плотностью смеси 196,5 фунт / фут<sup>3</sup> (3148 кг / м<sup>3</sup>) и общепринятым значением удельной плотности 3,15. Плотность предварительно сформованной пены должна быть предоставлена производителем пены и может варьироваться от 2 до 4 фунтов / фут<sup>3</sup> (от 32 до 64 кг / м<sup>3</sup>) со значением удельной плотности от 0,032 до 0,064. Предварительно сформованная пена всегда должна производиться в соответствии с рекомендациями производителя.

Как отмечалось в главе 2, содержание воздуха в типичной пробе LCC 30 фунтов / фут<sup>3</sup> (481 кг / м<sup>3</sup>) находится в диапазоне от 70% до 75%. Поскольку большую часть веса в любой смеси LCC составляют вода и цемент, их количества приблизительно соответствуют заданной плотности и составляют оставшиеся 25-30% от общего объема.

Хотя следующий пример дизайна смеси был разработан, чтобы продемонстрировать, как работает итерационный процесс, доступны несколько калькуляторов дизайна смеси LCC, а также простые электронные таблицы, которые могут быть разработаны для более быстрого и точного выполнения расчетов. Если используется расчетный калькулятор, рекомендуется дважды проверить плотность и объем смеси, используя уравнения, приведенные в этом руководстве, чтобы убедиться, что полученные ответы точны.

### Пример:

- Целевая плотность \* = 30 фунтов / фут<sup>3</sup> (481 кг / м<sup>3</sup>)
- Соотношение вода / ц \* = 0,55
- Общий объем = 1,0 фут<sup>3</sup> (1,0 м<sup>3</sup>)
- Портландцемент SG = 3,15
- Плотность пенообразователя \*\* = 3 фунта / фут<sup>3</sup> (48 кг / м<sup>3</sup>)
- Пенообразователь SG \*\* = 0,048
- Удельный вес воды = 1,0
- Плотность воды = 62,4 фунта / фут<sup>3</sup> (1000 кг / м<sup>3</sup>).
- \* Предоставляется в контрактных документах, спецификациях, чертежах или установщиком LCC.
- \*\* Предоставляется производителем пенообразователя.

Первым шагом является определение первоначального веса пробной партии ингредиентов цемента и воды. Как было отмечено, поскольку большую часть веса смеси LCC составляет цемент и вода, их количества приблизительно соответствуют количеству, используемому для определения целевой плотности. Целевая плотность в этом примере составляет 30 фунтов / фут<sup>3</sup> (481 кг / м<sup>3</sup>), поэтому отправной точкой для определения веса цемента и воды будет 30 фунтов (481 кг).

$$\begin{aligned} \text{Цемент (фунты)} &= \text{Целевая плотность (фунт / фут}^3) \div (1 \text{ фут}^3 + \text{в / ц}) \\ \text{Цемент (кг)} &= \text{Целевая плотность (кг / м}^3) \div (1 \text{ м}^3 + \text{в / ц}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Вода (фунты)} &= \text{Цемент и водный раствор (фунты)} - \text{Цемент} \\ \text{(фунты) Вода (кг)} &= \text{Цемент и водный раствор (кг)} - \text{Цемент (кг)} \end{aligned}$$

$$\text{Объем ингредиента} = \text{Вес партии ингредиента} \div (\text{SG ингредиента} \times \text{вес единицы воды})$$

Используя уравнения 6 и 7, начальные веса цемента и воды будут следующими:

$$\begin{aligned} \text{Цемент (фунт): } & 30 \text{ фунтов / фут}^3 \div (1 \text{ фут}^3 + 0,55) = 19,35 \\ \text{фунта Цемент (кг): } & 481 \text{ кг / м}^3 \div (1 \text{ м}^3 + 0,55) = 310 \text{ кг} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Вода (фунт): } & 30 \text{ фунтов} - 19,35 \text{ фунта} = 10,65 \\ \text{фунта Вода (кг): } & 481 \text{ кг} - 310 \text{ кг} = 171 \text{ кг} \end{aligned}$$

Учитывая, что пенообразователь, используемый в этом примере конструкции смеси, имеет плотность 3 фунта / фут<sup>3</sup> (48 кг / м<sup>3</sup>) и составляет примерно от 70% до 75% от общего объема, его начальный вес партии может быть определен следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{Пенообразователь (фунт): } & 3 \text{ фунта / фут}^3 \times 0,75 \text{ фут}^3 = 2,25 \\ \text{фунта Пенообразователь (кг): } & 48 \text{ кг / м}^3 \times 0,75 \text{ м}^3 = 36 \text{ кг} \end{aligned}$$

Установив исходные веса пробных партий для трех ингредиентов, их объемы можно рассчитать с помощью уравнения 8.

Результирующие объемы ингредиентов для исходных весов пробной партии следующие:

$$\text{Объем цемента: } 19,35 \text{ фунта} \div (3,15 \times 62,4 \text{ фунта / фут}^3) = 0,098 \text{ фут}^3$$

$$\text{Объем цемента: } 310 \text{ кг} \div (3,15 \times 1000 \text{ кг / м}^3) = 0,098 \text{ м}^3$$

$$\text{Объем воды: } 10,65 \text{ фунта} \div (1,0 \times 62,4 \text{ фунта / фут}^3) = 0,171 \text{ фут}^3$$

$$\text{Объем воды: } 171 \text{ кг} \div (1,0 \times 1000 \text{ кг / м}^3) = 0,171 \text{ м}^3$$

(6)

(7)

(8)

Объем пены:  $2,25 \text{ фунта} \div (0,048 \times 62,4 \text{ фунта} / \text{фут}^3) = 0,75 \text{ фут}^3$

Объем пены:  $36 \text{ кг} \div (0,048 \times 1000 \text{ кг} / \text{м}^3) = 0,75 \text{ м}^3$

Общий объем:  $0,098 \text{ фут}^3 + 0,171 \text{ фут}^3 + 0,75 \text{ фут}^3 = 1,019 \text{ фут}^3$

Общий объем:  $0,098 \text{ м}^3 + 0,171 \text{ м}^3 + 0,75 \text{ м}^3 = 1,019 \text{ м}^3$

Хотя объемы как пенообразователя, так и цементно-водной суспензии находятся в желаемых пределах после этой первой итерации, общий вес смеси, 32,25 фунта (517 кг), превышает целевой показатель в 30 фунтов (481 кг), а общий объем, 1,019 фут<sup>3</sup> (1,019 м<sup>3</sup>), немного превышает целевой показатель в 1 фут<sup>3</sup> (1 м<sup>3</sup>). Добавление пенообразователя привело к увеличению веса, чем хотелось. Если веса просто опустить, общий объем больше не будет правильным. Необходимо уменьшить начальную заданную массу цемента и водной суспензии, чтобы выдержать и удерживать вес пенообразователя.

Путем простой регулировки этих трех весов и поддержания постоянного отношения в / ц можно выполнить дополнительные итерации для точного получения требуемых проектных параметров смеси LCC. Вторая итерация, в которой вес цемента пропорционально снижается на 1,0 фунт (16 кг), что также приводит к соответствующему уменьшению количества воды, приводит к следующему:

Объем цемента:  $18,35 \text{ фунта} \div (3,15 \times 62,4 \text{ фунта} / \text{фут}^3) = 0,093 \text{ фут}^3$

Объем цемента:  $294 \text{ кг} \div (3,15 \times 1000 \text{ кг} / \text{м}^3) = 0,093 \text{ м}^3$

Объем воды:  $(\text{Вес цемента (фунт)} \times \text{вес} / \text{ц}) \div (1,0 \times 62,4 \text{ фунта} / \text{фут}^3) = (10,09 \text{ фунта} \div 62,4 \text{ фунта} / \text{фут}^3) = 0,162 \text{ фут}^3$

Объем воды:  $(\text{Вес цемента (кг)} \times \text{в} / \text{ц}) \div (1,0 \times 1000 \text{ кг} / \text{м}^3) = (162 \text{ кг} \div 1000 \text{ кг} / \text{м}^3) = 0,162 \text{ м}^3$

Объем пены:  $2,25 \text{ фунта} \div (0,048 \times 62,4 \text{ фунта} / \text{фут}^3) = 0,75 \text{ фут}^3$

Объем пены:  $36 \text{ кг} \div (0,048 \times 1000 \text{ кг} / \text{м}^3) = 0,75 \text{ м}^3$

Общий вес:  $18,35 \text{ фунта} + 10,09 \text{ фунта} + 2,25 \text{ фунта} = 30,69 \text{ фунта}$

Общий вес:  $294 \text{ кг} + 162 \text{ кг} + 36 \text{ кг} = 492 \text{ кг}$

Общий объем:  $0,093 \text{ фут}^3 + 0,162 \text{ фут}^3 + 0,75 \text{ фут}^3 = 1,005 \text{ фут}^3$

Общий объем:  $0,093 \text{ м}^3 + 0,162 \text{ м}^3 + 0,75 \text{ м}^3 = 1,005 \text{ м}^3$

После второй итерации, хотя значения больше соответствуют желаемому, общий вес и общий объем все еще немного повышены по сравнению с целевыми значениями. Выполнение третьей итерации, в которой вес цемента пропорционально снижается на дополнительные 0,45 фунта (7 кг), а соответствующий вес воды также снижается, приводит к следующему:

Объем цемента:  $17,90 \text{ фунта} \div (3,15 \times 62,4 \text{ фунта} / \text{фут}^3) = 0,091 \text{ фут}^3$

Объем цемента:  $287 \text{ кг} \div (3,15 \times 1000 \text{ кг} / \text{м}^3) = 0,091 \text{ м}^3$

Объем воды:  $(\text{Вес цемента (фунт)} \times \text{вес} / \text{ц}) \div (1,0 \times 62,4 \text{ фунта} / \text{фут}^3) = 9,85 \text{ фунта} \div 62,4 \text{ фунта} / \text{фут}^3 = 0,158 \text{ фут}^3$

Объем воды:  $(\text{Вес цемента (кг)} \times \text{в} / \text{ц}) \div (1,0 \times 1000 \text{ кг} / \text{м}^3) = 158 \text{ кг} \div 1000 \text{ кг} / \text{м}^3 = 0,158 \text{ м}^3$

Объем пены:  $2,25 \text{ фунта} \div (0,048 \times 62,4 \text{ фунта} / \text{фут}^3) = 0,75 \text{ фут}^3$

Объем пены:  $36 \text{ кг} \div (0,048 \times 1000 \text{ кг} / \text{м}^3) = 0,75 \text{ м}^3$

Общий вес:  $17,90 \text{ фунта} + 9,85 \text{ фунта} + 2,25 \text{ фунта} = 30,00 \text{ фунта}$

Общий вес:  $287 \text{ кг} + 158 \text{ кг} + 36 \text{ кг} = 481 \text{ кг}$

Общий объем:  $0,091 \text{ фут}^3 + 0,158 \text{ фут}^3 + 0,75 \text{ фут}^3 = 0,999 \text{ фут}^3$

Общий объем:  $0,091 \text{ м}^3 + 0,158 \text{ м}^3 + 0,75 \text{ м}^3 = 0,999 \text{ м}^3$

После этой третьей итерации все значения - процентное содержание цемента и воды, процентное содержание пенообразователя, общий вес, общий объем, заданная плотность и соотношение в / ц - максимально приближены к проектным требованиям. Это значения, которые следует использовать для этого дизайна смеси.

## Подготовка лабораторных проб

Используя количества материала, полученные с помощью описанной выше методики расчета смеси, следует подготовить лабораторные пробы с использованием утвержденного и подходящего оборудования. Подготовка материала к пробе должна приводить к получению смеси, максимально приближенной к реальной конструкции смеси, предназначенной для использования в полевых условиях. Если это невозможно, можно приготовить меньшую пробу и приблизить смесь. Энергия, передаваемая смеси LCC, влияет на конечные свойства образцов и объясняет, почему образцы, приготовленные в лаборатории, являются лишь приближением образцов, испытанных в полевых условиях.



Смесь трех ингредиентов так же сложно правильно смешать, как и точно рассчитать, особенно для небольших образцов. Сложность состоит в том, чтобы измерить компонент пены, который слишком легкий для точного взвешивания. Самый простой способ - создать емкость известного количества, например ведро на 5 галлонов (19 л).

Сначала определите абсолютный объем ковша до известного уровня. Например, налейте в него ровно 5 галлонов (19 л) воды и отметьте уровень. Затем отрегулируйте дизайн смеси до соотношения 5 галлонов (19 л) и 1 ярда<sup>3</sup> или 1 м<sup>3</sup>. При таком размере контейнера 5 галлонов (19 л) равняются 0,67 фута<sup>3</sup> (0,019 м<sup>3</sup>). Это означает, что соотношение будет 0,67 фута<sup>3</sup> ÷ 27 фута<sup>3</sup> или 0,0248 ярда<sup>3</sup> (0,019 м<sup>3</sup> ÷ 1 м<sup>3</sup>, или 0,019 м<sup>3</sup>). Умножив каждый из трех ингредиентов на 0,0248 (0,019 метрической системы), расчетные пропорции смеси определены для партии объемом 5 галлонов (19 л).

Как упоминалось ранее, проблема для небольших партий заключается в определении правильного количества пены. Для получения правильного количества пены для тестовой партии с достаточной степенью точности можно использовать следующие шаги:

- Используйте емкость для смешивания известного объема.
- Определите соотношение ингредиентов и индивидуальные количества
- Добавьте определенную порцию воды в емкость.
- Тщательно добавьте и перемешайте определенную порцию цемента в емкости с водой (будьте осторожны, чтобы не перемешать повторно, поскольку дополнительная энергия перемешивания изменит результаты)
- Создайте пену в соответствии с инструкциями производителя, используя пеногенератор (рис. 4.1).
- Добавьте определенную порцию пены в емкость с водой и цементом при перемешивании до тех пор, пока емкость не наполнится до известного объема.
- Проверьте точное количество введенной пены и добавьте еще, если смешанный образец ниже ожидаемого уровня.



Aerix Industries, используется с разрешения

**Рисунок 4.1. Генератор готовой пены**

После того, как определенные количества цемента, воды и пены смешаны вместе, взвесьте полный контейнер, вычитите вес тары пустого контейнера и рассчитайте конечную плотность смеси. Приготовленную смесь LCC следует поместить в контейнеры для образцов для тестирования и отверждения.

Лабораторные испытания могут быть проведены любым квалифицированным испытательным центром; однако предприятие должно следовать процедурам ASTM C495, чтобы обеспечить повторяющиеся и оптимальные результаты испытаний. Для проведения этих испытаний часто используются бетонные лаборатории, и их следует предупредить о том, что стандартное оборудование недостаточно чувствительно и что процедуры в ASTM C495 отличаются от процедур для обычного бетона.

## Глава 5. Строительство

В этой главе описываются методы, оборудование и операции для типового проекта заполнения LCC. Он начинается с обзора спецификаций и соответствующих полевых условий, освещаются общие соображения по строительству, а затем обсуждаются используемые методы и оборудование. Эти методы сильно различаются в зависимости от региона, установщика и времени создания и всегда должны проверяться конкретным локальным установщиком.

### Характеристики

Стандартные спецификации LCC сильно различаются по стране, и многие агентства полагаются на опыт инженеров-проектировщиков и установщиков LCC, чтобы понять материалы и подготовить соответствующие требования для конкретного проекта. Несколько агентств подготовили формальные стандартизированные строительные спецификации или специальные положения для своих штатов, включая Калифорнию, Флориду, Иллинойс, Айову, Нью-Йорк и Техас. Во многих случаях эти требования для LCC перечислены в деталях конструкции для текучей заливки или CLSM. Предлагаемый набор спецификаций, который можно использовать для многих проектов заполнения LCC и при необходимости корректировать, включен в приложение к этому руководству.

### Требования к собственности

Общей проблемой для установщиков LCC является обеспечение того, чтобы соответствующие требования к свойствам материалов были включены в спецификации проекта. Крайне важно, чтобы профессионал-дизайнер подобрал желаемые свойства с правильной плотностью LCC. Например, маловероятно, что LCC с максимальной плотностью 30 фунтов / фут<sup>3</sup> (481 кг / м<sup>3</sup>) будет иметь высокую минимальную прочность в 1000 фунтов / дюйм<sup>2</sup> (6,89 МПа).

Рекомендуется, чтобы спецификации были написаны так, чтобы требовать определенный диапазон LCC, как показано ранее в таблице 2.1, которая предоставляет типичные свойства для стандартных диапазонов LCC и должна использоваться в качестве руководства. В противном случае разработчик должен работать с локальным установщиком LCC, чтобы определить сочетание плотности, прочности и, возможно, других свойств для достижения целей проекта.

### Подготовка земляного полотна и основания

Подготовка земляного полотна и основания зависит от прилагаемых нагрузок и глубины размещаемого LCC. Базовые материалы всегда должны быть подготовлены в соответствии с требованиями проекта (см. Рисунок 5.1).



Throop Lightweight Fill, используется с разрешения

Рисунок 5.1. Подготовленное земляное полотно в ожидании размещения LCC

Инженер-проектировщик должен рассматривать слой LCC как жесткий базовый материал, который позволяет распределять нагрузки по определенным областям. LCC не является гибким основным материалом, и его перегрузка может привести к выходу из строя. Иногда условия мягкого земляного полотна не позволяют произойти указанному уплотнению. В таких случаях инженер-геолог должен оценить нагрузки, предназначенные для приложения к слою LCC, и напряжения, приложенные к границе земляного полотна / основания в нижней части LCC.

В отличие от гибкого основного материала, нагрузки через LCC распределяются по большой площади, что снижает напряжения на границе земляного полотна и основания. Как минимум, инженер должен проверить сдвиг при продавливании при точечных нагрузках и распределение нагрузки от однородных нагрузок при ее прохождении через массу LCC.

Чрезмерные напряжения на границе земляного полотна и основания могут возникать, когда грунт на площадке выкапывается, а дно находится в торфе, грязи или аналогичных чрезвычайно мягких грунтах, где уплотнение дна невозможно. В этих ситуациях инженер-геотехник может позволить нижней части насыпи оставаться в ненарушенном естественном состоянии и разместить LCC непосредственно над естественным земляным полотном. Геотекстиль можно использовать для перекрытия более мягких участков, которые могут вызвать неравномерную осадку. Земляные работы следует проводить с особой осторожностью, чтобы не повредить оставшуюся почву.

## Полевые наблюдения

При наблюдении за размещением LCC на проекте следует учитывать множество факторов. Как подрядчик, так и персонал проекта, присутствующий на площадке, должны быть обучены и иметь возможность наблюдать следующие аспекты проекта, чтобы определить, производится ли и правильно ли размещается материал:

- Дозированное содержание цемента или расход
- Измеренное содержание воды или расход
- Плотность цементной и водной суспензии.
- Плотность предварительно сформованной пены
- Плотность конечного продукта
- Расстояние откачки
- Измеренное давление нагнетания
- Время, необходимое для заполнения площади
- Разделение материалов при размещении
- Глубина ежедневного размещения
- Дренаж, который может привести к плавучести
- Чрезмерно высокие или низкие температуры.
- Комки цемента в смеси
- Утечка в опалубке.
- Чрезмерно высокая температура отверждения.
- Расположение любой стекающей воды после отверждения.

Несмотря на то, что можно заметить многие другие элементы, этот список охватывает большинство потенциальных проблем, которые могут возникнуть в результате операции размещения LCC.

## Армирование

LCC - это бетонный продукт с низкой прочностью, который можно армировать так же, как и другие бетонные изделия. Армирование может состоять из стали или других изделий с низкой деформацией, при условии, что они не повреждены и не изменены во время размещения и отверждения LCC (см. Рисунок 5.2).

Армирование будет иметь незначительное сцепление с поверхностями. Крайне важно, чтобы арматура рассчитывалась на основе прочности на вырыв с соответствующими запасами прочности по расчетной прочности на неограниченное сжатие. Прочность на отрыв определяется протаскиванием установленной арматуры через закаленный LCC. Прочность на неограниченное сжатие LCC может быть



Цементная ассоциация Калифорнии Невада, используется с разрешения

**Рисунок 5.2. Сварная проволочная сетка в размещении LCC**

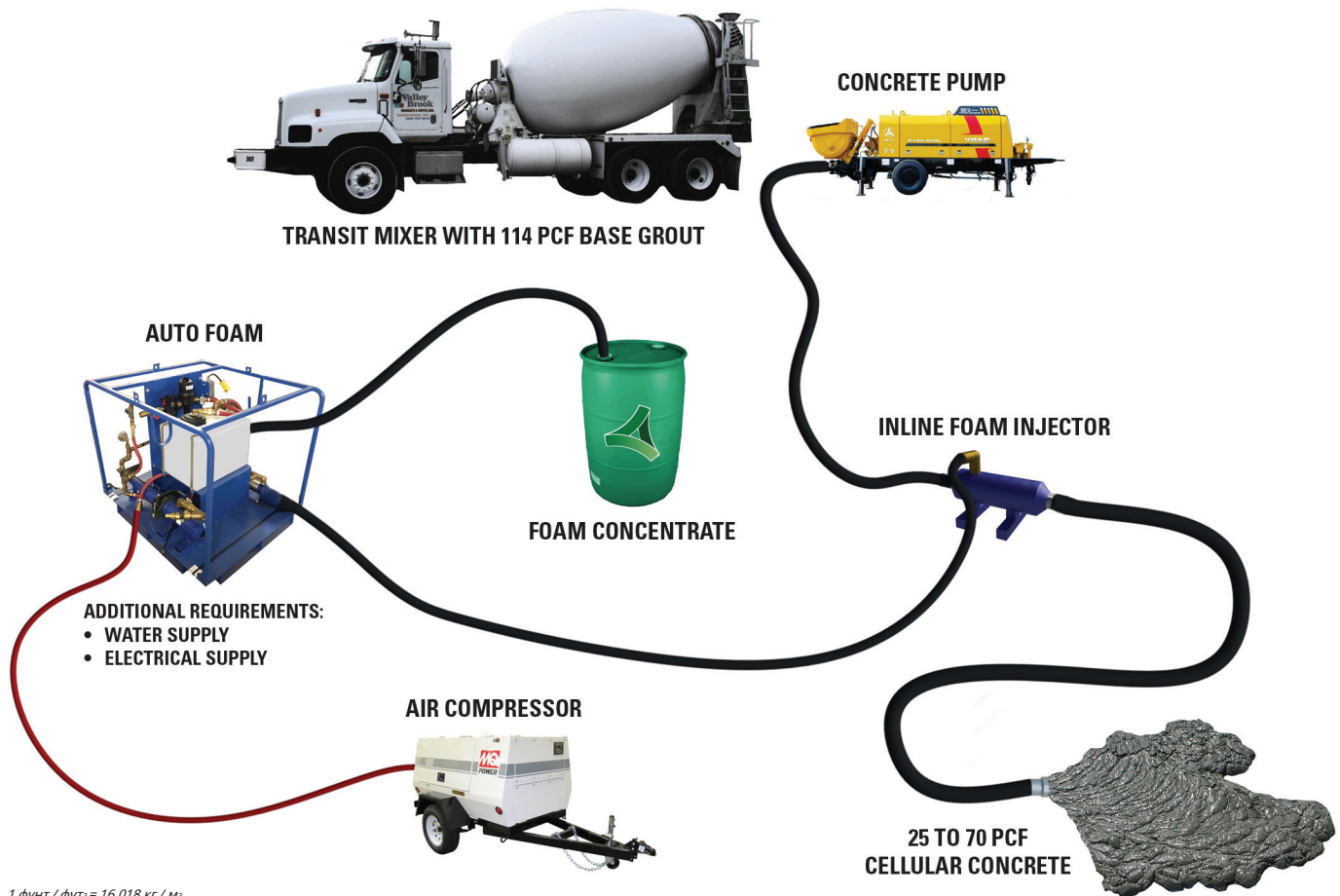
измеряется путем расчета силы, необходимой для вытягивания арматуры. В конечном итоге механизм разрушения будет заключаться в раздавливании LCC перед усиливающими элементами.

Сварная оцинкованная проволочная сетка легко доступна и рекомендуется для армирования материала, учитывая, что каждое прочно сваренное пересечение проволочной сетки необходимо протянуть через LCC, чтобы LCC не выдержала сопротивления сдвигу. Геосетки работают аналогичным образом, но должны быть подтверждены как приемлемые в среде LCC с чрезвычайно высоким pH.

Волокна часто используются в массах LCC для увеличения их прочности на сдвиг. Для этого подходит любое волокно, которое выдерживает высокую температуру отверждения и высокий pH. Перед применением следует проверить прирост силы. Следует проконсультироваться с производителями как волокна, так и пенопласта LCC относительно совместимости продуктов.

## Транспорт

В то время как доставка цемента и водной суспензии на стройплощадку осуществляется в обычном порядке, всегда следует избегать транспортировки предварительно смешанного LCC. Вибрации от движения могут вытеснить захваченный воздух и изменить плотность конечного продукта. Продолжительные периоды использования LCC в автобетоносмесителе также могут привести к изменению свойств, и LCC в таких ситуациях следует тщательно контролировать перед размещением.



1 фунт / фут<sup>3</sup> = 16,018 кг / м<sup>3</sup>

Aerix Industries, используется с разрешения

**Рисунок 5.3. Как пена вводится в насосную систему на базе автобетоносмесителя**

## Размещение и консолидация

LCC обычно помещается на свое окончательное место с помощью насоса и шланга (см. Рисунок 5.3).

LCC достаточно текуч, чтобы самоуплотняться без вибрации. LCC не следует допускать схватывания, а затем повторного смешивания, вместо этого следует хранить пластик, пока он не застынет в своем окончательном месте. LCC может отделяться и сдвигаться при перемещении после начала отверждения.

Отдельные области заливки должны быть ограничены, чтобы позволить установщику поддерживать хорошо перемешанную заливку, которая завершается примерно за два-четыре часа, прежде чем перейти в другое место. Установщики могут ограничить любое расслоение или расслоение, регулярно смешивая наполнитель с материалом, выходящим из шланга.

Также важно учитывать плавучесть слоев LCC, расположенных ниже уровня земли, учитывая, что LCC может всплыть после сильных дождей. Любые объекты, заключенные в насыпь, должны быть закреплены, чтобы предотвратить движение от потока или выталкивающих сил.

## Отделка

LCC - это, как правило, подземный продукт, и в отделке нет необходимости. Поверхность слоя LCC, помещенного в шланг, будет относительно плоской с небольшими брызгами (см. Рисунок 5.4).

Готовая поверхность может быть получена, но это требует практики. Если желательна гладкая и ровная поверхность, требуются дополнительные усилия для создания стяжек и трудозатраты на отделку. Создание гладкой и ровной поверхности на большой насыпи является сложной задачей, учитывая, что LCC продолжает немного двигаться во время процесса чистовой обработки. Когда желательна отделка под уклоном, возможен уклон до 3%. Каждый подъемник под последним подъемом не требует уклона для достижения конечной отметки.

### Поверхностная обработка

Поверхностная отделка поверх LCC может быть нанесена в любое время после того, как LCC достигнет большей части своей проектной прочности, обычно всего за три-семь дней.



Throop Lightweight Fill, используется с разрешения

Рисунок 5.4. Поверхность заливки LCC по месту

Обычные бетонные покрытия могут быть уложены раньше, если будут приняты меры, чтобы не повредить поверхность LCC. Укладка асфальтового основания и дорожных покрытий может занять немного больше времени из-за веса уплотняющих катков, необходимых для уплотнения. Кроме того, вибрационные катки следует использовать с осторожностью при уплотнении асфальта поверх LCC, поскольку ударное воздействие оборудования может повредить нижележащий слой LCC.

## Лечение и защита

Учитывая, что LCC не является поверхностным продуктом, отвердители не нужны. Хотя на поверхности LCC может возникнуть поверхностное растрескивание, это не повлияет отрицательно на характеристики LCC. Лучший способ защитить LCC - как можно скорее установить отделку поверхности. Пока не будет нанесен поверхностный слой, LCC может быть покрыт правильно установленным и обслуживаемым прочным полиэтиленовым пластиковым листом, чтобы удерживать влагу, необходимую для отверждения, и уменьшать усадку. Если гладкость поверхности или беспокойство по поводу повреждения поверхности LCC критичны, поверхность LCC может быть защищена от строительного движения с помощью облицовочных плит или заполнителя.

## Погодные условия

Перед началом размещения ЛКЦ необходимо следить за погодными условиями. Если надвигается сильный дождь, установку LCC следует отложить, в то время как легкий дождь не повредит этому изделию, потому что он уже состоит из значительного количества воды. Сильный дождь можно охарактеризовать как дождь, который достаточно силен, чтобы вызвать сегрегацию, если добавленная вода выталкивает цемент в смесь и оставляет пену на поверхности. Следует избегать укладки во время сильного дождя, это может стать причиной для более тщательной оценки и, возможно, замены слоя LCC. В случае повреждения от дождя поврежденная верхняя поверхность LCC может быть удалена до бескомпромиссной LCC (без необходимости полного удаления или замены), а следующая отливка помещена на недавно обнаженную LCC без необходимости чистки.

Немедленная защита может быть подходящей от экстремальных температурных условий (как высоких, так и низких). Согласно ACI 523 (2006), следует принимать особые меры предосторожности, если температура окружающей среды ниже 32 ° F (0 ° C) или выше 100 ° F (38 ° C). Сильный нагрев может привести к испарению воды из LCC и чрезмерной усадке. И наоборот, холодная погода может замедлить время отверждения и снизить качество размещенного LCC. В обоих случаях можно использовать покрытие LCC слоем пластиковой пленки или изолирующего одеяла, при условии, что эти действия не повредят поверхность LCC.

## Сроки

LCC, помещенный в умеренную температуру (от 60 ° F до 80 ° F [от 16 ° C до 27 ° C]), схватится и затвердеет в течение примерно 10-14 часов. Как правило, строительство может продолжаться со следующим слоем материала, как только можно будет ходить по слою LCC без чрезмерного проникновения в поверхность (допускается толщина до 1,0 дюйма [25 мм]). Среднее давление на грунт в результате пешеходного движения людей (Теггатас 2013) обеспечивает хороший полевой показатель примерно на уровне 16 фунтов / дюйм<sup>2</sup> (0,11 МПа), что более чем достаточно для продолжения проекта. В более холодную погоду временной диапазон может составлять до 20 часов.

## Полевое оборудование

Полевое оборудование для LCC варьируется, при этом большинство крупных установщиков разрабатывают собственные проприетарные машины с использованием стандартных компонентов. LCC представляет собой смесь на основе портландцемента, и известно, что энергия перемешивания (сдвиг), передаваемая смеси, влияет на конечные свойства и является основным фактором в производственном оборудовании. Два типа производственных систем, обычно используемых для смешивания цемента и воды в LCC, называются периодическим смешиванием и шнековым смешиванием.



Strong Manufacturing, используется с разрешения

Рисунок 5.5. Смеситель периодического действия

### Пакетное смешивание

Периодическое смешивание уже давно является отраслевой практикой приготовления бетонных смесей (см. Рис. 5.5).

Эта система смешивания обеспечивает все ингредиенты, необходимые для изготовления одной партии продукта. Это работает для всех типов бетона, включая LCC, и любой тип смесителя периодического действия может использоваться для LCC. Для любого типа смесителя, включая смесители периодического действия, важно, чтобы действие перемешивания было достаточно агрессивным, чтобы полностью диспергировать цемент, воду и пенообразователь в однородную смесь. Время замеса следует соблюдать, чтобы обеспечить достаточное перемешивание для получения однородного продукта без видимых комков цемента или предварительно сформированной пены.

Эта система позволяет установщику быстро и многократно готовить отдельные партии; поэтому следует тщательно контролировать точность измерения ингредиентов. В целом, это простейшая система, обеспечивающая отличное качество смешивания при относительно низкой производительности. Типичное смесительное оборудование периодического действия в LCC-индустрии производит от 22,9 до 38,2 м<sup>3</sup> (от 30 до 50 ярдов<sup>3</sup>) в час и устанавливается на прицеп для облегчения передвижения.

### Дозирование с высоким сдвигом

Среди различных смесителей периодического действия, представленных на рынке, доступно множество различных конструкций и систем. Смесители периодического действия, которые используются для передачи более высокой энергии смешивания, называются смесителями с большим усилием сдвига или коллоидными смесителями.

Этот тип смесителя периодического действия можно рассматривать как скорее высокоскоростной смеситель, чем медленный, продуманный смеситель. Жидкая часть партии быстро перемешивается в контейнере, и цемент вводится с высокой скоростью. Это действие приводит к более прочному LCC без каких-либо



Throop Lightweight Fill, используется с разрешения

Рисунок 5.6. Мобильный смеситель объемный

увеличение содержания цемента. Эти миксеры могут производить от 50 до 150 ярдов<sup>3</sup> (от 38,2 до 114,7 м<sup>3</sup>) в час в зависимости от размера миксера, конструкции смеси и скорости подачи материала.

### Шнековый смеситель / Мобильные объемные смесители

Шнековое перемешивание обычно выполняется в мобильных объемных автобетоносмесителях и включает использование вращающегося вала и фланца (шнека) для смешивания ингредиентов (см. Рисунок 5.6).

Шнек принимает сырые ингредиенты на одном конце, а затем вращается и смешивает ингредиенты вместе, когда они проталкиваются вниз по шнеку, обычно на расстояние примерно 10 футов (3,0 м). Большинство шнеков имеют диаметр от 8 до 12 дюймов (от 200 до 300 мм) и могут использоваться для производства LCC. Энергия смешивания в шнеке меньше, чем у смесителя периодического действия, и из-за характера непрерывной работы шнека не может быть обеспечено дополнительное время перемешивания. Система шнека может быть чрезвычайно точной, если оборудование правильно откалибровано.

Есть три ингредиента (цемент, вода и предварительно сформованная пена), которые необходимо добавить в смеситель с соответствующими дозами, чтобы приготовить указанную смесь LCC. Оператор смесителя и инспектор проекта должны следить за смесью, выходящей из шнека, на предмет соответствия свойствам и качественному смешиванию материалов. Уделяя особое внимание первому количеству материала, выходящего из машины, оператор может регулировать поток и скорость любого ингредиента.

Объемное смешивание - удобный и быстрый метод приготовления больших объемов LCC. Производительность этих встроенных миксеров может варьироваться от стандартных 30 ярдов<sup>3</sup> (22,9 м<sup>3</sup>) в час до 500 ярдов<sup>3</sup> (382,3 м<sup>3</sup>) в час для самого большого оборудования.



Richway Industries, Ltd., используется с разрешения

**Рисунок 5.7. Встроенная система добавок пены**

Индивидуальные установщики разрабатывают свои собственные версии смесительных и насосных систем, чтобы поставлять LCC на свои местные рынки. Эти системы зависят от типа и количества выполняемых работ LCC, а также от географического местоположения установщиков. При проектировании мобильного миксера LCC учитывается множество факторов, включая дизайн смеси, производительность, хранение цемента, пыль, подтекание, качество смеси, очистку, простоту использования, погодные условия и автоматизацию. Мобильные системы, изготовленные по индивидуальному заказу или изготовленные по индивидуальному заказу, обычно предназначены для использования одной из двух производственных систем, описанных в данном руководстве, - периодического или шнекового. Как в системах периодического смешивания, так и в системах шнекового смешивания, пена может добавляться в смесительную камеру или в шланг после насоса (см. Рисунок 5.7).

Мобильное смешивание любого типа обеспечивает преимущества, заключающиеся в том, что материал сразу же после первоначального смачивания попадает в конечное место сразу после производства. Это выгодно для LCC, поскольку свойства быстро меняются в течение первых нескольких минут и часов после смешивания.

### Доставка цемента

При смешивании на мобильной установке сухой порошкообразный портландцемент обычно доставляется от производителя цемента на мобильный завод периодического действия на пневматических грузовиках. Затем сухой цемент выгружается из автофургона в контейнер для хранения или силос, расположенный на строительной площадке. Однократная загрузка 27 тонн (24,5 метрических тонн) доставленного сухого цемента может быть использована для производства около 130 ярдов<sup>3</sup> (99,4 м<sup>3</sup>) 30 фунтов / фут<sup>3</sup> (481 кг / м<sup>3</sup>) LCC. Это можно проверить по расчетному количеству цемента в смеси на кубический ярд (кубический метр), которое зависит от плотности.

Еще одно преимущество мобильной смесительной установки заключается в том, что автоцистерна с цементом является единственным тягловозом, доставляющим продукт на объект. С экологической точки зрения, это сокращение грузовых перевозок снижает потребление энергии, выбросы, потребление ископаемого топлива и влияние движения на дорогах.



© 2018 Роберто Монтемайор, используется с разрешения

**Рисунок 5.8. Автобетоносмеситель**

### Комбинированные бетонные заводы

Заводы по производству товарного бетона и грузовики обычно не используются для полностью дозированного LCC, потому что их смешивающее действие не сочетает все ингредиенты с правильной скоростью и интенсивностью (ACI 2006). Тем не менее, грузовики для товарного бетона могут использоваться для перевозки только цементно-водного раствора на строительную площадку (см. Рисунок 5.8).

Эти самосвалы бывают самых разных типов и мощностей, а их смесительные барабаны рассчитаны на номинальную максимальную вместимость 63% от общего объема барабана при использовании в качестве смесителя (NRMCA 2020). Причина, по которой грузовик для товарного бетона не заполняется цементно-водной суспензией, заключается в том, что жидкость может вылиться во время транспортировки. Это особенно актуально на неровных дорогах или при движении по крутым склонам, чтобы добраться до рабочей площадки.

Предварительно сформованная пена затем добавляется к цементно-водной суспензии в грузовике на строительной площадке с помощью генератора пены, предоставленного установщиком LCC.

### Насосные устройства

После того, как LCC произведен в смесительных камерах, описанных ранее, его необходимо разместить в окончательном месте на рабочем месте. При использовании объемного смесителя шнекового типа подготовленный LCC может быть помещен непосредственно в конечное место. Для всех других типов производства LCC обычно перекачивается из смесителя прямо на стройплощадку.

Перекачка ЛСС может быть сложной задачей. Первоначально легко перемещать легкий материал, и его можно транспортировать с помощью большинства насосов любого типа. Проблема может возникнуть немного позже, когда цементное тесто начнет накапливаться на внутренних стенках насосных шлангов и насосного оборудования и начнет затвердевать. Контроль производительности наряду с регулярной очисткой поможет избежать повреждения насоса и преждевременной остановки производства. Запланированная уборка в конце дня должна быть немедленной и тщательной.

Давление перекачивания также следует тщательно контролировать с помощью ЛСС, учитывая, что предварительно сформованная пена является ингредиентом, для которого давление имеет значение. Было много дискуссий о том, достаточно ли устойчива система воздушных пустот внутри ЛСС, чтобы выдерживать давление накачки.

Предварительно сформованный пенопласт должен соответствовать свойствам, перечисленным в ASTM C869, при испытании в соответствии с процедурами ASTM C796. Полевой мониторинг также должен выполняться путем проверки плотности в соответствии с ASTM D6023, Стандартным методом испытаний на плотность (удельный вес), выход, содержание цемента и содержание воздуха (гравиметрический) контролируемого низкопрочного материала (CLSM) до и после прокачивая, наблюдая за любым увеличением. Увеличение указывает на то, что воздушные пустоты ЛСС появляются во время процесса откачки и что необходимо выполнить регулировку.

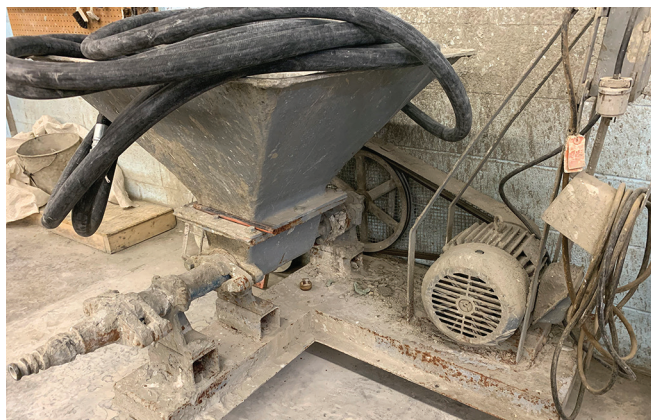
В следующих разделах описываются три насосные системы, наиболее часто используемые для ЛСС: кавитационные, перистальтические и поршневые насосы. Хотя доступны другие насосные системы, они, как правило, не подходят для надлежащей транспортировки ЛСС от смесителя к его месту на рабочем месте. Эти другие насосные системы включают насосы с шаровым краном, центробежные насосы и диафрагменные насосы.

Какой бы метод производства ЛСС и насосное оборудование ни были выбраны, основная цель установщика состоит в том, чтобы произвести и разместить конечный продукт, который соответствует указанным требованиям проекта. Эти требования включают правильное соотношение воды и цемента, пену, соответствующую требованиям производителя, и заданную конечную плотность на месте.

#### Винтовой насос прогрессивного типа

В большинстве оборудования, предназначенного для размещения ЛСС, используется винтовой насос винтового типа (см. Рисунок 5.9).

Этот тип насоса чрезвычайно устойчив, не имеет пульсаций и сохраняет внутреннюю чистоту во время работы. Однако следует проявлять осторожность при использовании этого типа насоса, чтобы не допустить попадания камней или других твердых частиц в бункер, поскольку они могут остановить или повредить насос. Винтовые насосы прогрессивного типа имеют относительно низкое давление, с выходным давлением примерно от 100 до 300 фунтов / дюйм<sup>2</sup> (от 0,69 до 2,07 МПа).



© 2020 Elastizell Corporation of America, используется с разрешения

Рисунок 5.9. Винтовой насос винтового типа

Это правильный диапазон давления для установки ЛСС в большинстве ситуаций.

#### Перистальтический насос

Перистальтические насосы, также называемые отжимными насосами, могут использоваться для простой транспортировки ЛСС. Этот тип насоса имеет преимущество отделения вязких материалов от насосного механизма. Это очень полезно при перекачивании липкой затвердевающей смеси и значительно снижает стоимость любого необходимого ремонта. Перистальтические насосы успешно использовались для ЛСС в течение многих лет и были первичной системой, используемой в первые годы. С помощью этого типа насоса можно получить высокое давление, поэтому за перистальтическими насосами следует внимательно следить.

#### Поршневой насос

Благодаря своей исключительной надежности и прочности поршневые насосы используются для перемещения многих различных типов жидкостей и шламов, включая бетон. В поршневых насосах используется обратный клапан и система втягивания поршня, которые втягивают материал, а затем выталкивают его. Поршневые насосы для бетона, которые устанавливаются на прицеп, обычно не используются в строительстве ЛСС из-за большого количества поверхностей, которые необходимо очистить, и опасения по поводу высокого давления, которое может быть получено.

В системе с поршневым насосом, если есть закупорка в линии, насос может достичь чрезвычайно высокого давления за доли секунды. Этот тип насоса следует использовать с большой осторожностью, потому что чрезмерное давление часто может привести к поломке шлангов, фитингов или даже наполняемой трубы в земле, что приведет к травмам или повреждению и созданию большого беспорядка. ЛСС также наблюдалась утечка из сломанных труб, которые заполнялись под давлением. Порты для нагнетания обычно изготавливаются из трубы из поливинилхлорида (ПВХ), ведущей в подземные трубы, и они могут разорваться из-за высокого давления.



## Глава 6. Осмотр, тестирование и обслуживание

LCC, как и любой конкретный продукт, следует тщательно наблюдать, проверять и контролировать с соблюдением высочайшего уровня контроля качества. Небольшие вариации в конструкции смеси могут вызвать значительные различия в конечном продукте, что приведет к неприемлемым материалам, сбоям и непредвиденным расходам. Следующие ниже рекомендации по контролю качества помогут инженеру, инспектору и установщику в проверке и наблюдении за размещением правильно перемешанного LCC.

Предварительная квалификация установщика, выполняющего работу, на основе утверждения производителями процессов и оборудования является важным первым шагом в процессе контроля качества. Требования, которым следует следовать при проведении любых испытаний на LCC, хорошо известны, включая ранее упомянутые руководящие принципы в ACI 523 (2006) и стандарты в ASTM C495, C796 и C869. Следующее является лишь руководством, дополняющим то, что предусмотрено в руководствах и стандартах.

### Полевые испытания контроля качества

Контроль качества выполняется установщиком и может быть очень сложным или относительно простым для LCC. Многие установщики разрабатывают автоматизированное оборудование для поставки больших объемов LCC. Хотя эти системы могут быть как эффективными, так и сложными, существует довольно простой метод тестирования продукта, который можно сделать с помощью недорогих инструментов и использовать с любой системой. Как ранее обсуждалось в этом руководстве, основные измерения, которые необходимо выполнить, - это плотность цементного раствора и окончательно уложенной смеси LCC (см. Рисунок 6.1).

Измерение плотности образцов на рабочем месте имеет решающее значение, потому что этот контроль качества гарантирует, что приготовленная смесь соответствует проектным спецификациям проекта. Конечная плотность продукта измеряется, чтобы убедиться, что LCC производится с заданной плотностью. К сожалению, это измерение не проверяет, используется ли правильное соотношение воды, цемента и пены. Следовательно, требуется единичное второе измерение для проверки плотности цементно-водной суспензии перед добавлением предварительно сформованной пены. Если эти измерения могут быть выполнены, смесь можно будет оценить, не обращая внимания на механическую функцию машины.

Цемент и вода являются веществами с высокой устойчивостью (отчеты цементных заводов доступны при необходимости), и ожидаемую плотность воды и цементного раствора можно измерить в полевых условиях с помощью уравнения 9 и сравнить с

Плотность суспензии (фунты) = (цемент (фунты) + вода (фунты)) ÷ (цемент (фут3) + вода (фут3))  
Плотность суспензии (кг) = (цемент (кг) + вода (кг)) ÷ (цемент (м3) + вода (м3))



© 2017 Elastizell Corporation of America, используется с разрешения

Рисунок 6.1. Отбор проб / тестирование LCC в полевых условиях (Мичиган)

данные о весе и объеме, включенные в схему смеси, обсуждаемую в главе 4.

Поскольку иногда бывает трудно отрегулировать цемент, воду и пенообразователь одновременно, рекомендуется сначала отрегулировать соотношение вода / цемент, измерив плотность цементного раствора, а затем, при необходимости, отрегулировать до нужного значения. Цементный раствор смешивается отдельно, чтобы упростить проверку плотности. Плотность цементной и водной суспензии определяется в соответствии с ASTM D4380, Стандартным методом испытания плотности бентонитовых суспензий.

Проверки плотности раствора следует проводить регулярно, чтобы гарантировать правильную работу расходомеров для цемента и воды. Затем добавляется пена и измеряется конечная плотность продукта, как указано. Плотность цементного раствора обычно составляет от 105 до 115 фунтов / фут3 (от 1682 до 1842 кг / м3), и обученный оператор может на ощупь и визуально определить, работает ли смесительная машина в соответствии со спецификациями проекта.

Помимо визуальных наблюдений, подрядчик должен регулярно проводить следующие два полевых измерения для обеспечения качества в течение всего периода размещения:

- Плотность жидкого навоза
- Конечная плотность

(9)

Плотность суспензии следует проверять не реже, чем каждые два часа. Окончательное испытание плотности следует проводить как минимум каждые 30 минут (а желательно чаще) или каждый раз, когда на машине наблюдается изменение материала.

Этот график испытаний гарантирует, что машина производит указанный продукт. Это понимание значительно упрощает работу инспектора проекта при работе с очень сложным оборудованием. Это также избавляет установщиков от необходимости тратить время и деньги на сертификацию своих бортовых счетчиков и доказательство того, что они работают безупречно каждый день. Количество используемого сырья, удельный вес, полевые пробы и исследования рабочей площадки - надежные методы измерения объема размещаемого LCC.

Сбор полевых образцов LCC для лабораторных испытаний должен осуществляться в соответствии с рекомендациями, содержащимися в ASTM C495, и спецификациями проекта.

#### Наблюдение за контролем качества в полевых условиях

LCC должен вытекать из машины в конечное место в виде густой суспензии, напоминающей серое тесто для блинов (см. Рисунок 6.2).

LCC должен лежать относительно ровно с определенной текстурой на поверхности, обычно выглядящей так, как будто на нее брызнули брызги. Заметные трещины или трещины не должны образовываться в текущем материале, так как это указывает на то, что область размещения слишком велика для скорости укладки, необходимая корректировка соотношения воды и газа, протекающие формы или другие проблемы. Хотя трещины или трещины обычно не приводят к серьезным сбоям, их причины следует идентифицировать и, если возможно, устранять. Этих проблем можно избежать, ограничив время укладки в зависимости от геометрии заливки, конструкции смеси, погодных условий и условий на площадке.

Вверху размещенной ЛКЦ не должно быть пенистых участков. Это может указывать на сегрегацию, которая приводит к образованию участков с серой пеной вверху и тяжелой жидкой жидкостью внизу, и может возникнуть, если LCC уйти слишком далеко. Этого можно избежать, постоянно перемешивая конечный продукт и ограничивая размер площадок для размещения.

В некоторых случаях LCC, помещенный в слишком много или слишком мало воды, неправильно вспененный или смешанный



Throop Lightweight Fill, используется с разрешения

Рисунок 6.2. Поверхность недавно размещенного ЖКУ

процедуры могут разрушиться после размещения. Затонувшая поверхность в размещенном LCC указывает на обрушение структуры воздушных пустот из-за неправильного перемешивания или размещения материала. Крайне важно следить за тем, чтобы пена была хорошего качества во время операций по укладке, измеряя ее плотность. Также важно тщательное наблюдение и понимание того, как должна и как не должна выглядеть пена. Важно понимать, что обвалы не указывают на наличие пустоты под поверхностью. Свертывание фактически указывает на то, что существует более высокая плотность и более сильное заполнение, чем хотелось бы, поскольку воздух вышел из суспензии.

LCC, размещенный в одиночных лифтах высотой более 4 футов (1,2 м), может создавать проблемы. В настоящее время максимальная глубина, соответствующая отраслевому стандарту, составляет 1,2 м (4 фута); однако установщики успешно разместили LCC в одиночных лифтах высотой до 10 футов (3,0 м) в контролируемых условиях.

#### Инспекция и испытания после строительства

LCC следует осмотреть на следующий день после размещения. Он должен быть достаточно устойчивым, чтобы по нему можно было ходить с ограниченными отпечатками (не более 25 мм [1,0 дюйма]), оставленными на поверхности, если только замедлители схватывания, дополнительные цементирующие материалы, температуры, близкие к замерзанию, или другие модификации не влияют на время схватывания смешивание. LCC может быть теплым, возможно, испаряющимся в результате химических реакций (гидратации) и иметь относительно плоскую поверхность на той же высоте, что и накануне. Короче говоря, если размещенный LCC пережил ночь (начальная настройка) и прошел ранее заявленные испытания плотности во время размещения, это приемлемо в ожидании более поздних результатов испытаний.



Throop Lightweight Fill, используется с разрешения

**Рисунок 6.3. Неограниченное испытание прочности на сжатие LCC**

### Испытание на прочность при сжатии

Испытания LCC после строительства в первую очередь включают испытания на прочность на неограниченное сжатие (см. Рисунок 6.3).

Лабораторные испытания прочности на неограниченное сжатие должны тщательно следовать процедурам, изложенным в ASTM C495. Многолетний опыт и результаты калифорнийского исследования (Siebold and Tootle 2016), упомянутые в главе 2, убедительно доказывают, что процедуры, предусмотренные в стандарте ASTM C495, обеспечивают наиболее точные лабораторные результаты и что такие вариации, как сушка в печи или неправильное отверждение, могут иметь драматическое влияние на результаты испытаний. Строгие стандарты не были разработаны для других свойств, и другие свойства следует тестировать с пониманием того, что сравнение результатов может означать сравнение существенно разных процедур.

### Обслуживание

Для самого материала LCC на месте нет рекомендованного технического обслуживания. Материал должен быть защищен после того, как он будет помещен в какой-либо поверхностный слой, такой как бетон, почва, материал основания, дренажный коврик и т. Д. Чрезмерная ходьба и движение непосредственно по поверхности LCC может привести к повреждению, и этого следует избегать.

Из-за изоляционных свойств LCC возможен относительно высокий температурный дифференциал, вызывающий растрескивание поверхности и ускоренный износ, если оставить его открытым. Не следует допускать, чтобы влага испарялась из размещенного LCC слишком быстро, потому что это вызовет чрезмерную усадку (хотя в большинстве случаев усадочные трещины являются только поверхностными и не повлияют пагубно на срок службы LCC). После захоронения и защиты дополнительное обслуживание невозможно или необходимо, кроме наблюдения за материалом покрытия и дренажной системой (если таковая имеется).



## использованная литература

Олдридж Д., Р. К. Дир, М. Д. Ньюлендс и А. Маккарти. 2005. Введение в пенобетон: что, почему и как? *Материалы Международной конференции по применению пенобетона в строительстве.*, 5 июля, Данди, Шотландия, стр. 1–14.

ACI. 2006 г. *Руководство по монолитному ячеистому бетону низкой плотности.* Отчет ACI 523.1R-06. Комитет 523 Американского института бетона, Фармингтон-Хиллз, Мичиган.

Байер против Райса. 1934. 75 F.2d 238, Апелляционный суд США по округу Колумбия.

Бажант, З.П. и М.Ф. Каплан. 1996 г. *Бетон при высоких температурах: свойства материалов и математические модели.* Аддисон-Уэсли, Лондон, Англия.

Брио, Дж. Л., Р. У. Джеймс и С. Б. Хоффман. 1997 г. *NCHRP Synthesis 234: Расчет на подходах к мосту (неровность в конце моста).* Национальная совместная программа исследований автомобильных дорог, Вашингтон, округ Колумбия.

FAA. 2012 г. *Спроектированные системы удержания материалов (EMAS) при перебегах самолетов.* Консультативный циркуляр 150 / 5220-22B. Федеральное управление гражданской авиации, Вашингтон, округ Колумбия. [https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory\\_Circular/AC\\_150\\_5220-22B.pdf](https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_150_5220-22B.pdf).

FHWA. 2017. Национальная инвентаризация мостов, Дефектные мосты по системе автомобильных дорог 2017. Федеральное управление автомобильных дорог, Вашингтон, округ Колумбия. <https://www.fhwa.dot.gov/bridge/nbi/no10/defbr17.cfm>.

Хофф, GC 1972. Соображения прочности и пористости для ячеистого бетона. *Цемент и бетонные исследования*, Vol. 2, № 1. С. 91–100.

Джонс, М.Р. и А. Маккарти. 2005а. Предварительные представления о возможностях пенобетона как конструкционного материала. *Журнал исследований бетона*, Vol. 57, № 1. С. 21–31.

Джонс, М.Р. и А. Маккарти. 2005б. Поведение и оценка пенобетона для засыпки и строительства дорог. *Материалы Международной конференции по применению пенобетона в строительстве.*, 5 июля, Данди, Шотландия, стр. 61–88.

Косматка, С.Х. и М.Л. Уилсон. 2016 г. *Проектирование и контроль бетонных смесей.* 16-е издание. Портлендская цементная ассоциация, Скоки, Иллинойс.

Мо, Р. и Р. Коул. 2015 г. *Программа лабораторных испытаний ячеистого бетона, наблюдения и результаты лабораторных испытаний, осень и зима 2014–2015 гг.* Технический меморандум. Gerhart Cole Inc., Дрейпер, Юта.

McCormick, FC 1967. Рациональное дозирование предварительно отформованного пенобетона. *Журнал материалов ACI*, Vol. 64, № 2, с. 104–110.

Мыдин, MAO, X. Аванг, А.Ф. Рослан. 2012. Определение тепловых свойств легкого пенобетона с применением различных добавок. *Эликсир Цемент и бетонные композиты*, Vol. 48. С. 9286–9291.

Намбияр, ЭКК и К. Рамамурти. 2007. Сорбционные характеристики пенобетона. *Цемент и бетонные исследования*, Vol. 37, № 9, с. 1341–1347.

Нараянан Н. и К. Рамамурти. 2000. Микроструктурные исследования ячеистого бетона. *Цемент и бетонные исследования*, Vol. 30, № 3, с. 457–464.

NRMCA. 2020. *О бетоне.* Национальная ассоциация готовых бетонных смесей, Силвер-Спринг, Мэриленд. <https://www.nrmca.org/about-nrmca/about-concrete/>.

Quanji, Z. 2010. Тиксотропное поведение материалов на основе цемента: влияние типов глины и цемента. Магистерская диссертация. Государственный университет Айовы, Эймс, Айова.

Рамамурти К., ЕКК Nambiar и GIS Ranjani. 2009. Классификация исследований свойств пенобетона. *Цементные и бетонные композиты*, Vol. 31, № 6, с. 388–396.

Зибольд Д. и Дж. Тутл. 2016 г. *CNCA Испытание ячеистого бетона: испытание на неограниченное сжатие (ASTM C495).* ENGEO Incorporated, Сан-Рамон, Калифорния, Калифорнийской цементной ассоциации Невады, Йорба Линда, Калифорния.

Тада, С. 1986. Материальный дизайн из пенобетона - оптимальная конструкция. *Материалы и конструкции*, Vol. 19. С. 21–6.

Тарасов А.С., Кирсли Е.П., Коломацкий А.С., HF Mostert. 2010. Тепловыделение из-за гидратации цемента в пенобетоне. *Журнал исследований бетона*, Vol. 62, № 12, с. 895–906.

Terramac. 2013. Что оказывает большее давление на грунт - человек или гусеничный транспортер? *НОВОСТИ ТЕРРАМАК*. <https://www.terramac.com/news/2013/what-exerts-moreground-pressure-a-human-or-a-crawler-carrier/>.

Б. Тивари, Б. Аймера, Р. Мо, Р. Коул, Д. Виллегас и П. Палмерсон. 2017. Механические свойства легкого ячеистого бетона для геотехнических применений. *Журнал материалов в гражданском строительстве*, Vol. 29, № 7, 06017007-1–06017007-7.

Тивари Б., Б. Аймера и Д. Виллегас. 2017. Динамические свойства легкого ячеистого бетона для геотехнических применений. *Журнал материалов в гражданском строительстве*, Vol. 30, No. 2, pp. 04017271-1–04017271-10.

# Приложение. Руководство по устройству легкого ячеистого бетонного наполнителя

Январь 2021 г.

## 1. Общие положения

### 1.1 Описание

Легкий ячеистый бетон (LCC) должен состоять из портландцемента, предварительно отформованной пены, возможно, летучей золы, шлака или химических добавок и воды для образования затвердевшего материала, имеющего плотность после высушивания в печи 50 фунтов / фут<sup>3</sup> (801 кг / м<sup>3</sup>) или ниже. LCC должны быть пропорциональны, смешаны и размещены в соответствии с этой спецификацией и должны соответствовать линиям, классам, толщине и типичным поперечным сечениям, указанным в планах проекта или иным образом установленным инженером.

#### 1.2 Предостережение

Эта спецификация предназначена для использования в качестве руководства по форме и содержанию типичной конструкции с заполнением LCC. У большинства проектов есть особенности или требования, которые должны быть включены в проектную документацию.

## 2. Справочные документы

### 2.1 ASTM International (ASTM)

**C150** Стандартные спецификации для портландцемента

**C494** Стандартные технические условия на химические добавки для бетона

**C495** Стандартный метод испытаний на прочность на сжатие легкого изоляционного бетона

**C595** Стандартные спецификации для смешанных гидравлических цементов

**C618** Стандартные технические условия на угольную золу-унос и необработанный или кальцинированный природный пуццолан для использования в бетоне

**C796** Стандартный метод испытаний пенообразователей для производства ячеистого бетона с использованием предварительно отформованной пены

**C869** Стандартные технические условия на пенообразователи, используемые при изготовлении предварительно отформованной пены для ячеистого бетона

**C989** Стандартные технические условия на шлаковый цемент для использования в бетоне и строительных растворах

**C1017** Стандартные технические условия на химические добавки для производства текучего бетона

**C1157** Стандартные технические условия для гидравлического цемента

**C1602** Стандартные технические условия на воду для замешивания, используемую при производстве гидравлического цементного бетона

## 3. Предложения

### 3.1 Требования к отправке

Подрядчик должен предоставить инженеру по крайней мере за 30 календарных дней до начала любого производства LCC:

**3.1.1 Сертификаты.** Сертификаты на портландцемент, пенообразователи, дополнительные вяжущие материалы и химические добавки по требованию инженера.

**3.1.2 Технические характеристики.** Данные производителей и спецификации для материалов, перечисленных в Разделе 4.1, и оборудования, включая емкости, перечисленные в Разделе 5, для использования при смешивании и размещении LCC.

**3.1.3 Предлагаемый дизайн смеси LCC.** Если предложенный проект смеси разрабатывается подрядчиком или предлагается изменение в проекте смеси, он должен быть представлен инженеру на утверждение. Этот проект смеси должен включать количества цементирующих материалов, воды и предварительно сформованной пены, а также ожидаемую прочность на сжатие и требуемые плотности.

**3.1.4 Предлагаемый план работы.** Описание предлагаемой процедуры установки должно касаться следующего:

1. Предлагаемая последовательность и график строительства
2. Расположение источников материалов, оборудования, а также участков хранения и дозирования.
3. Тип оборудования и инструментов, которые будут использоваться.

## 4. Продукция

### 4.1 Материалы

**4.1.1 Общие.** Все материалы, которые будут использоваться для строительства заливки LCC, должны быть одобрены инженером на основе лабораторных испытаний или сертификатов типичных материалов, которые будут использоваться в фактическом строительстве.

**4.1.2 Портлендский цемент.** Портландцемент должен соответствовать последним спецификациям портландцемента (ASTM C150) или смешанным гидравлическим цементам (ASTM C595 и ASTM C1157).

**4.1.3 Пенообразователь.** Пенообразователь должен соответствовать последним спецификациям (ASTM C869) при испытании в соответствии с ASTM C796.

**4.1.4 Летучая зола.** При использовании летучая зола должна соответствовать последним спецификациям (ASTM C618).

**4.1.5 Шлак.** Если используется, шлак должен соответствовать последним спецификациям (ASTM C989).

**4.1.6 Химические добавки.** Если используются, химические добавки должны соответствовать последним спецификациям (ASTM C494 и ASTM C1017), если это применимо.

**4.1.7 Вода.** Вода должна соответствовать последним спецификациям (ASTM C1602). Можно использовать непитьевую воду; тем не менее, рекомендуется, чтобы проект смеси был подготовлен в лаборатории с фактическими пробами воды на участке до начала проекта.

## 4.2 Свойства

**4.2.1 Общие.** Если иное не утверждено инженером в письменной форме, LCC должна соответствовать следующим свойствам для каждого класса, как показано в этой таблице:

LCC класс	Максимальная плотность отливки		28-дневный минимум прочность на сжатие	
	фунт / фут <sup>3</sup>	кг / м <sup>3</sup>	фунт / дюйм <sup>2</sup>	МПа
<b>I</b>	30	481	40	0,28
<b>II</b>	36	577	80	0,55
<b>III</b>	42	673	120	0,83
<b>IV</b>	50	801	160	1,10

## 5. Оборудование

### 5.1 Общие

Все необходимое оборудование должно быть под рукой и одобрено инженером до того, как работа будет разрешена. LCC должен быть сконструирован с любой комбинацией оборудования, которое будет производить конечный продукт, отвечающий требованиям по дозированию, смешиванию и размещению, как указано в данной спецификации.

### 5.2 Смеситель

Смесительное оборудование для производства LCC должно быть следующим:

**5.2.1 Емкость.** Смесительное оборудование должно обеспечивать производство LCC в пропорциях, определенных окончательной утвержденной конструкцией смеси, и в пределах указанных допусков. Вместимость оборудования должна быть достаточной для

производить однородную смесь со скоростью, совместимой с оборудованием для укладки.

**5.2.2 Серийный завод.** Если используется, смеситель периодического действия должен быть способен производить однородную смесь, которая имеет однородный цвет и способна выгружать ее содержимое непосредственно в автобетоносмесители, автобетоносмесители, работающие со скоростью перемешивания, или неактивные грузовики для транспортировки на рабочую площадку. Заводской смеситель должен быть оборудован дозирующим оборудованием, отвечающим следующим требованиям:

**5.2.2.1** Количество цемента, а также летучей золы, шлака и химических примесей, если они используются, поступающие в каждую партию LCC, должны измеряться с помощью оборудования для прямого взвешивания, легко настраиваемого для изменения пропорционального веса партии. Цемент, а также летучая зола, шлак и химические добавки, если они используются, могут взвешиваться отдельно или совокупно в одном бункере на одних и тех же весах при условии, что цемент взвешивается первым.

**5.2.2.2** Бункеры-весы для цемента, летучей золы и шлака, если они используются, должны быть оборудованы вибраторами для автоматической и непрерывной работы во время разгрузки бункеров-весов.

**5.2.2.3** Количество воды, поступающей в каждую партию, должно измеряться по весу или объему. Оборудование должно быть способно измерять воду с точностью до плюс или минус 1% и должно быть оснащено точным манометром или стрелочным измерительным прибором. Во время дозирования вода должна подаваться в смеситель только через водомер.

**5.2.3 Мобильный волюметрический смеситель.** Оборудование для дозирования и смешивания должно быть автономным, мобильным, непрерывного смешивания при соблюдении следующего:

**5.2.3.1** Смеситель должен быть самоходным и способен нести достаточное количество несмешанного сухого цемента, летучей золы, шлака и химических примесей, если они используются, и воды для получения однородного LCC на месте.

**5.2.3.2** Мешалка должна быть способна точно измерять и регулировать цемент, воду, предварительно сформированную пену и любые добавки, вводимые в смесь. Расход всех компонентов LCC должен регистрироваться счетчиком, который всегда виден.

**5.2.3.3** Смеситель должен быть откалиброван для дозирования и смешивания всех компонентов указанного состава на непрерывной или периодической основе в соответствии с требованиями операции размещения и для разгрузки смеси без разделения.



**5.2.4 Альтернативное смесительное оборудование.** Другие типы дозирующего и смесительного оборудования и конфигурации, включая заводы сухого замеса и автобетоносмесители, могут использоваться с разрешения инженера. Подрядчик должен продемонстрировать, что смесительное оборудование может производить однородную, хорошо перемешанную, несегрегированную смесь LCC, которая соответствует минимальным требованиям к производительности Раздела 5.2.1.

## 5.3 Генератор пены

**5.3.1** Генератор пены должен быть одобрен производителем пенообразователя и использоваться для производства заранее определенного количества или расхода предварительно сформированной пены, которая должна быть введена в смеситель и смешана с цементной и водной суспензией.

**5.3.2** Генератор пены должен иметь таймер для периодической разгрузки предварительно выбранного количества или для непрерывной разгрузки с постоянной фиксированной скоростью.

**5.3.3** Генератор пены должен проверяться и калиброваться ежедневно для определения процента разбавления, плотности и объемного выхода.

## 5.4 Насос

LCC должен перекачиваться поршневым насосом прямого вытеснения (с прогрессивной полостью, перистальтическим или поршневым), способным обрабатывать объем размещаемого LCC.

**5.4.1** Все насосы должны работать так, чтобы непрерывный поток LCC без разделения быстро передавался к месту окончательной укладки.

**5.4.2** Все насосы должны быть оборудованы мерами безопасности для предотвращения внезапного возникновения чрезмерного давления LCC.

**5.4.3** Если иное не согласовано инженером в письменной форме, использование насосов с шаровым краном, центробежных насосов, диафрагменных насосов и других насосных устройств, а также смесителей для транспортировки товарного бетона не допускается для транспортировки подготовленных LCC.

## 5.5 Оборудование для водоснабжения

Оборудование для подачи воды должно иметь такую мощность и такую конструкцию, чтобы обеспечивать достаточную подачу и соответствующее давление одновременно для всех требований оборудования, места смешивания, размещения и увлажнения, а также всех других особенностей работы.

## 5.6 Осмотр оборудования

Перед пуском оборудование подрядчика должно быть тщательно осмотрено. Если какое-либо оборудование не работает должным образом, работа не должна продолжаться до тех пор, пока недостатки не будут исправлены и одобрены инженером.

## 5.7 Доступ для проверки и калибровки

За исключением каких-либо проприетарных систем, инженер должен иметь доступ в любое время к любому заводу, оборудованию или машинам, которые будут использоваться в проекте, для проверки калибровки, весов, элементов управления и рабочих настроек.

## 6. Требования к конструкции

### 6.1 Подготовка площадки

Подготовка площадки для приема LCC часто является обязанностью подрядчика земляных работ / профилирования. Установка LCC не должна продолжаться до тех пор, пока удовлетворительные условия на площадке не будут созданы, как показано в планах и одобрены инженером.

**6.1.1** Любые элементы, которые должны быть полностью или частично заключены в LCC, должны быть надлежащим образом установлены и устойчивы на своем конечном месте до установки LCC. Если геотехническая ткань для стабилизации грунта или геомембрана указывается вместе с LCC, она должна быть на месте до установки LCC.

### 6.2 Пробная партия (необязательно)

**6.2.1** По крайней мере, за 30 календарных дней до начала работ по укладке и в присутствии инженера подрядчик должен изготовить пробную партию LCC с использованием утвержденной конструкции смеси. Эта пробная партия позволит инженеру оценить плотность и прочность материала LCC, методы строительства и состояние поверхности уложенного материала. Минимальная пробная партия 1,0 ярд<sup>3</sup> (0,76 м<sup>3</sup>) должна быть изготовлена и размещена за пределами площадки.

**6.2.2** Оборудование, материалы и методы, используемые для производства пробной партии, должны быть такими, которые будут использоваться для создания основного заполнителя LCC.

**6.2.3** Пробная партия должна быть оценена и испытана подрядчиком и инженером на разделенных образцах на плотность в литом состоянии и прочность на сжатие в соответствии с требованиями к отбору образцов и испытаниям, указанными в данном документе.

### 6.3 Процесс смешивания

**6.3.1 Общие.** Любые корректировки конструкции смеси, необходимые для создания LCC в соответствии с проектной документацией в связи с окружающими условиями на рабочей площадке, должны быть одобрены инженером. Если во время перемешивания изменяется тип или источник вяжущих материалов, воды, добавок или пенообразователя, перемешивание необходимо приостановить, а инженер должен разработать и утвердить новый дизайн смеси.

**6.3.2 Дозирование.** Цементный раствор следует дозировать механически таким образом, чтобы обеспечить однородность смеси. Смешивание. Перед введением предварительно сформированной пены все твердые частицы должны быть тщательно смочены. Следует избегать чрезмерного перемешивания после того, как предварительно отформованная пена была добавлена, чтобы уменьшить возможность изменения удельного веса.

**6.3.3 Смешивание.** Генератор пены, отвечающий требованиям Раздела 5.3, должен использоваться для производства заранее определенного количества или расхода предварительно сформированной пены, которая должна быть введена в смеситель и смешана с цементным раствором. Пенообразователь вводится в соответствии с рекомендациями производителя с использованием утвержденного пенообразователя. Все оборудование должно быть откалибровано для получения однородной предварительно сформированной пены со стабильной однородной ячеистой структурой.

**6.3.4 Ежедневные отчеты.** Подрядчик должен предоставлять инженеру ежедневные записи о производстве и количестве материалов, используемых каждый день.

## 6.4 Транспортировка

LCC не перевозятся. Цементный раствор для LCC должен быть незамедлительно доставлен к месту окончательной укладки, избегая чрезмерного обращения с ним. Подача цементного раствора должна быть запланирована таким образом, чтобы при смешивании с предварительно сформированной пеной материал LCC помещался в указанные временные рамки.

### 6.5 Размещение

**6.5.1 Состояние сайта.** Перед размещением LCC поверхность площадки должна быть чистой и свободной от посторонних материалов, луж и инея. Во время установки LCC участок должен быть равномерно влажным. Если для увлажнения определенных участков требуется орошение водой, метод орошения не должен быть таким, чтобы образовывалась грязь или лужи с отдельно стоящей водой. Перед размещением LCC, участок должен быть проверен на предмет надлежащей плотности и мягких или податливых участков, и эти участки должны быть исправлены.

**6.5.2 Опалубка.** Там, где это показано на планах, вся опалубка должна быть спроектирована и установлена таким образом, чтобы удерживать жидкий LCC. Для опалубки может потребоваться облицовка прочным полиэтиленовым пластиковым покрытием или аналогичной непроницаемой мембраной для предотвращения утечки.

**6.5.3** LCC следует размещать без чрезмерного обращения, чтобы предотвратить сегрегацию. Промежуточные подъемники должны быть размещены горизонтально, в то время как только верхний подъемник должен быть доведен до планового уровня. Конечная отметка поверхности насыпи LCC должна быть в пределах  $\pm 0,1$  фута ( $\pm 30$  мм) от отметки в плане.

**6.5.4** Площадь размещения LCC должна быть ограничена объемом, который может быть размещен в течение одного часа, до максимальной высоты подъема, указанной на планах. Размещение следует располагать в шахматном порядке так, чтобы вертикальные стыки находились на расстоянии не менее 10 футов (3 м) друг от друга.

**6.5.5** Все LCC должны быть размещены со шлангом, одобренным инженером. Сливной шланг необходимо периодически перемещать для равномерного перемешивания размещаемого LCC.

**6.5.6** LCC нельзя подвергать механической вибрации или иным нарушениям.

**6.5.7** Строительные работы на любом недавно установленном лифте LCC не разрешаются до тех пор, пока смесь LCC не достигнет минимальной прочности на сжатие для своего класса, как показано в Разделе 4.2.1, или 20 фунтов на кв. Дюйм (0,14 МПа), в зависимости от того, что меньше. Однако, если какие-либо работы на недавно размещенном LCC приводят к растрескиванию или вмятинам более 0,25 дюйма (6 мм), подрядчик должен прекратить строительство, пересмотреть время ожидания, прочность смеси или используемое оборудование и предоставить это инженеру для утверждения.

**6.5.8** Любые выемки грунта или распиловки, требуемые от LCC для установки инженерных сетей, водостоков или других конфликтов, должны выполняться методами, утвержденными инженером.

## 6.6 Погодные условия

### 6.6.1 Меры предосторожности в холодную погоду.

Материал LCC нельзя класть на любую поверхность, содержащую иней или замороженный материал, или когда температура воздуха ниже или ожидается ниже  $32^{\circ}\text{F}$  ( $0^{\circ}\text{C}$ ). Можно использовать защиту слоя LCC путем укрытия изолирующими одеялами при условии, что такое действие не повредит поверхность LCC. Любой LCC, поврежденный замораживанием, должен быть удален и заменен за счет подрядчика.

### 6.6.2 Меры предосторожности при жаркой погоде.

В жаркую погоду (выше  $100^{\circ}\text{F}$  [ $38^{\circ}\text{C}$ ]) или в ветреную погоду следует принимать специальные меры для сведения к минимуму потерь влаги из-за испарения. В условиях чрезмерного испарения с поверхности из-за комбинации температуры воздуха, относительной влажности, температуры LCC и ветровых условий подрядчик должен представить инженеру подробное предложение по минимизации потерь влаги и защите LCC. Меры предосторожности могут включать временные ветровые перерывы для уменьшения ветрового воздействия, охлаждение воды для суспензионной смеси, уменьшение допустимого времени между смешиванием и укладкой, уменьшение высоты подъема и / или наложение защитного покрытия.

**6.6.3 Ограничения дождя.** Запрещается установка LCC, пока идет дождь, достаточно сильный, чтобы нанести ущерб готовому продукту. Укладка может продолжаться во время небольшого дождя или тумана при условии, что поверхность LCC не вымыта и не повреждена.

#### 6.7 Техническое обслуживание

Подрядчик должен поддерживать размещенный LCC в хорошем состоянии до тех пор, пока все работы LCC не будут завершены и приняты. Такое обслуживание выполняется подрядчиком за свой счет.

## 6.8 Отбор, испытания и приемка

**6.8.1 Отбор проб и тестирование Подрядчиком для контроля качества.** Подрядчик должен отобрать и протестировать LCC следующим образом:

*6.8.1.1 Плотность после заливки.* Первая партия, размещаемая каждый день, а затем каждый час во время размещения, должна быть отобрана и испытана в соответствии с ASTM C495. Плотность после отливки должна быть средней по крайней мере по двум испытаниям.

*6.8.1.2* Если средняя плотность в литом состоянии выходит за пределы указанного допуска, указанного в Разделе 6.8.3, подрядчик должен отклонить партию или скорректировать смесь перед укладкой. Корректировка смеси должна выполняться либо увеличением, либо уменьшением только предварительно сформированной пены.

*6.8.1.3 Прочность на неограниченное сжатие.* Из первой партии, размещаемой каждый день и каждые два часа после этого, следует отбирать образцы в соответствии с ASTM C495, при этом следует отметить, что образцы не должны подвергаться сушке в печи перед испытанием. Минимальное количество партий, отбираемых в день, должно составлять две. Для каждого образца должны быть отформованы восемь цилиндрических образцов для испытаний размером 3 дюйма × 6 дюймов (75 мм × 150 мм).

*6.8.1.4* Испытание на безусловное сжатие определяется в ASTM C495 как среднее значение четырех правильно отвержденных разрушений цилиндров. Для каждого образца испытания должны проводиться через 28 дней.

**6.8.2 Отбор проб и тестирование для обеспечения качества инженером.** Инженер должен отобрать и протестировать LCC для обеспечения качества на независимых и разделенных образцах. Независимый образец - это полевой образец, полученный и испытанный только одной стороной. Разделенная проба - это одна из двух равных частей полевой пробы, каждая из которых получает по одной порции для тестирования. Инженер может попросить подрядчика получить разделенную пробу. Любой образец для испытаний на прочность должен храниться до тех пор, пока инженер не получит разрешение на утилизацию. Результаты всех

подрядчику должны быть доступны тесты по обеспечению качества, проводимые инженером; тем не менее, сначала инженеру должны быть предоставлены результаты испытаний разбитой выборки подрядчика. Независимый образец для обеспечения качества инженера и разделенный образец для испытаний для размещения или приемки должны быть следующими:

*6.8.2.1 Плотность после заливки.* Одно независимое или разделенное испытание образцов для первой партии проводится каждый день и определяется инженером в дальнейшем.

*6.8.2.2 Прочность на неограниченное сжатие.* Одно независимое или разделенное испытание образцов для первой партии проводится каждый день и определяется инженером в дальнейшем.

**6.8.3 Сравнение результатов тестирования.** Различия между результатами испытаний на разделенной выборке, полученными инженером и подрядчиком, считаются разумными, если они находятся в пределах, указанных в следующей таблице:

Тестовый параметр	Допустимые пределы точности
28 дней без ограничений прочность на сжатие	± 80 фунтов / дюйм <sup>2</sup> (0,55 МПа)
Плотность после литья	± 1 фунт / фут <sup>3</sup> (16 кг / м <sup>3</sup> )

*6.8.3.1* Действия должны быть предприняты, когда результаты испытаний инженера или подрядчика выходят за пределы допустимых пределов прочности или плотности. Действия могут включать в себя, но не ограничиваются, требованием подрядчика заменить или отремонтировать оборудование, как определено инженером.

*6.8.3.2* Уложенный материал, который не обладает прочностью на неограниченное сжатие, считается неприемлемым.

**6.8.4 Приемка Инженером.** Окончательная приемка должна основываться на этих спецификациях, а также на следующем:

*6.8.4.1* Подтверждение результатов испытаний подрядчика по контролю качества с использованием разделенных выборок. Любой тест контроля качества или проверки качества, признанный некорректным, может быть признан недействительным только после рассмотрения и утверждения инженером. Инженер должен объявить результат испытания недействительным только в том случае, если будет доказано, что произошел неправильный отбор проб или испытания. Результат теста должен быть записан, а причина признания теста недействительным должна быть указана инженером.

*6.8.4.2* Сравнение результатов инженерных испытаний по обеспечению качества с пределами спецификации с использованием образцов, независимо полученных инженером.

6.8.4.3 Инженер может приостановить производство смеси, отклонить материалы или предпринять другие соответствующие действия, если подрядчик не контролирует качество LCC. Решение принимается в соответствии с разделом 6.8.4.1 или 6.8.4.2.

## 7. Измерение и оплата

### 7.1 Измерение

Эта работа должна измеряться в кубических ярдах (кубических метрах) завершенной и принятой заливки LCC, как это определено Ежедневными отчетами, представленными в соответствии с Разделом 6.3.4.

### 7.2 Оплата

**7.2.1** Эти работы оплачиваются по договорной цене за 1 куб. Такой платеж представляет собой полное возмещение всех работ, необходимых для завершения заполнения LCC, включая дозирование, смешивание, размещение и все другие побочные операции.

**7.2.2 Пробная партия.** Если готовится пробная партия, она оплачивается одновременно. Такой платеж представляет собой полное возмещение всех материалов, рабочей силы, оборудования, мобилизации, демобилизации и всех других непредвиденных расходов, необходимых для производства Пробной партии в соответствии с Разделом 6.2.



National Concrete Pavement  
Technology Center

