

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Тамбовский государственный технический университет"

В.П. ЯРЦЕВ, К.А. АНДРИАНОВ, Д.В. ИВАНОВ

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ПРИМЕНЕНИЯ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА
ПРИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОМ УТЕПЛЕНИИ
ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Рекомендовано Государственным образовательным учреждением
высшего профессионального образования
"Московский государственный строительный университет"
в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений



Тамбов
Издательство ГОУ ВПО ТГТУ
2010

УДК 624(075.8)
ББК Н360.76я73
Я79

Ярцев, В.П.

Я79 Физико-механические и технологические основы применения пенополистирола при дополнительном утеплении зданий и сооружений : учебное пособие / В.П. Ярцев, К.А. Андрианов, Д.В. Иванов. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010. – 120 с. – 450 экз. – ISBN 978-5-8265-0958-6.

Рассмотрены методы и способы производства пенополистирола, физико-механические и теплофизические свойства. Приведены примеры современных видов и способов утепления инженерных сооружений, рассмотрены вопросы долговечности утепляющих конструкций с позиций термофлуктуационной концепции прочности твердых тел. Предложена методика определения долговечности пенополистирола в различных конструкциях.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям: 270102 "Промышленное и гражданское строительство", 270105 "Городское строительство и хозяйство", 270205 "Автомобильные дороги и аэродромы"; магистрантов по направлениям: 70100.06 "Техническая эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений", 270100.07 "Архитектурно-строительное материаловедение", 270100.09 "Ресурсосбережение и экология строительных материалов, изделий и конструкций", 270100.19 "Проектирование, строительство и эксплуатация автомобильных дорог".

УДК 624(075.8)
ББК Н360.76я73

ISBN 978-5-8265-0958-6

© Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ГОУ ВПО ТГТУ), 2010

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для зданий и сооружений предъявляются все более жёсткие требования к теплозащите ограждающих конструкций. Это вызывает необходимость применения наиболее эффективных утеплителей. Начиная с середины XX столетия в качестве утеплителя активно используется пенополистирол, который и сегодня удерживает лидирующие позиции на рынке теплоизоляционных материалов, обладая рядом положительных характеристик, например: сохранением теплоизоляционных свойств в условиях несовершенной паро- и гидроизоляции, при циклических температурно-влажностных воздействиях; высокой химической стойкостью и экологичностью. Благодаря приемлемой цене пенопласта по сравнению с другими теплоизоляционными материалами снижается стоимость общей изоляции инженерных сооружений. Кроме того, при производстве теплоизоляционного материала большое внимание уделяют требованиям его горючести, добавляя на стадии производства специальные добавки, подавляющие самостоятельное горение, возможное только при непосредственном контакте с огнём.

Активное развитие строительной индустрии требует новых, более прочных и экономичных материалов, поэтому на смену пенополистиролу, изготовленному по беспрессовой и прессовой технологии, приходит материал, изготовленный методом экструзии. Такой материал обладает более высокими прочностными и теплофизическими характеристиками за счёт упорядоченной структуры, обеспечивающей по-

вышенную прочность межмолекулярных связей. Применение экструзионного пенополистирола не ограничивается только утеплением зданий и сооружений. Повышенные прочностные характеристики позволяют с успехом использовать его в качестве теплоизолирующей прослойки в дорожном и мостовом строительстве, строительстве аэродромов и обогреваемых площадок. В некоторых случаях его используют как несущий элемент при возведении высоких насыпей и подходов к мостам на слабом основании, а также при строительстве сооружений в стеснённых условиях).

В процессе эксплуатации пенополистирольные плиты подвергаются комплексу внешних воздействий – нагрузке, температуре, действию жидких и газообразных агрессивных сред и ультрафиолетового облучения, что может привести к снижению первоначальных эксплуатационных характеристик или даже разрушению материала. Поэтому, с практической точки зрения, важным вопросом при проектировании строительных конструкций с применением пенопластов и определении допустимой области их применения является возможность надёжного прогнозирования работоспособности (долговечности) пенополистирольных плит в строительных изделиях и конструкциях.

В представленном пособии подробно изложены основные направления использования пенополистирола в различных сооружениях, рассмотрены общие положения теории об их строении, теплофизических и деформационных свойствах. Рассмотрено влияние условий эксплуатации на свойства пенополистирольных плит, приведена методика прогнозирования долговечности (работоспособности) пенополистирола с позиций термофлуктуационной концепции разрушения и деформирования твердых тел. В приложении приведены кратковременные характеристики наиболее распространённых марок и типов пенополистирола, а также примеры расчёта их долговечности в строительных конструкциях различного назначения.

Данное пособие предназначено для студентов, обучающихся по специальностям "Промышленное и гражданское строительство", "Городское строительство и хозяйство", "Автомобильные дороги и аэродромы", магистрантов по направлениям "Техническая эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений", "Архитектурно-строительное материаловедение", "Ресурсосбережение и экология строительных материалов, изделий и конструкций", "Проектирование, строительство и эксплуатация автомобильных дорог". Представленный материал также полезен инженерам и другим лицам, специализирующимся в строительной области.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕНОПЛАСТОВ

Пенопласт (*foam plastic* – англ.) – газонаполненная пластмасса, представляющая ячеистую структуру [78]. Пенопласт идентичен по строению с отвердевшими пенами. К пенопластам относится любой газонаполненный полимер, образованный вспениванием и последующим твердением жидкой или пластично-вязкой массы. Материал состоит из замкнутых, не сообщающихся между собой полостей, которые разделены прослойками полимера. Пенопласты выделены в отдельную группу среди пеноматериалов по степени изолированности ячеек, так как во многих газонаполненных пенах большая их часть соединена.

В общем случае газонаполненный полимер представляет собой двухфазную систему, состоящую из полимерной матрицы и относительно равномерно диспергированной газовой фазы. Объемное соотношение газовой и полимерной фаз составляет 30:1÷1:10. Такие пластмассы имеют чрезвычайно малую массу и высокие теплозвукоизоляционные характеристики [50, 79]. В зависимости от физической структуры газонаполненные пластмассы делят на 3 группы:

Пенопласты – представляют собой материалы с ячеистой структурой, в которой газообразные наполнители изолированы друг от друга и окружающей среды тонкими слоями полимерного связующего. Замкнутая ячеистая структура обеспечивает хорошую плавучесть и высокие теплоизоляционные свойства. Прочность таких материалов зависит от их плотности. Примером такого материала являются пенополистирол (рис. 1), пенополивинилхлорид, пенополиуретан, и т.д. Кажущаяся плотность таких пенополимеров колеблется от 15 до 500 кг/м³ [36, 50, 79].



Рис. 1. Гранулы пенополистирола

Поропласты – газонаполненные пластмассы с открытой пористой структурой, вследствие чего присутствующие в них газообразные включения свободно сообщаются друг с другом и окружающей атмосферой. Их кажущаяся плотность изменяется от 5 до 800 кг/м³.

Примером поропласта является пенополиэтилен (рис. 2) [79, 87, 90].

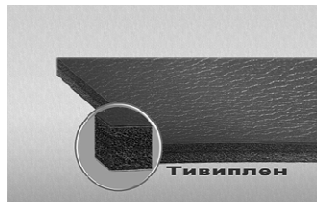


Рис. 2. Поропласт Тивиплон на основе пенополиэтилена

Сотопласты – состоят из тонких листовых материалов, которым придают вначале вид гофра или волокна, а затем соединяют в виде сот (рис. 3). Материалом служат различные ткани, которые пропитываются различными связующими. Для сотопластов характерны достаточно высокие теплоизоляционные, электроизоляционные свойства и радиопрозрачность. Сотопласты имеют плотность 30 ... 150 кг/м³ и обладают примерно такими же физико-химическими свойствами, как и пенопласты, но отличаются от них более высокой теплостойкостью и прочностью. Сотопласты применяются в основном для теплоизоляции конструкций промышленных и гражданских зданий. Примером может служить материал компании DuPont с торговой маркой Tyvek Housewrap [42, 79, 90].

Пенопласты подразделяются на следующие классы:

– *по химической основе полимера*: пенополиуретаны, пенополистиролы, пенополикарбониды, пенополиизоцианураты и т.д. [36, 50, 79];

– *по виду полимера*: термопластичные, изготовленные из полимеров с линейной структурой (полистирол, поливинилхлорид, полиэтилен, полипропилен и др.) и термореактивные, изготовленные из полимеров с пространственной структурой (полиуретан, полимерные композиции из фенолоформальдегидных, эпоксидных и других смол) [42, 50];

– *по твёрдости*: эластичные, полужёсткие, жёсткие, (в зависимости от прочности и модуля упругости). К жёстким материалам, наиболее широко используемым в строительной теплоизоляции, относятся изделия, имеющие предел прочности при сжатии при 50%-ной деформации более 0,15 МПа, эластичные – менее 0,01 МПа (полужёсткие занимают промежуточное положение) [36, 50];

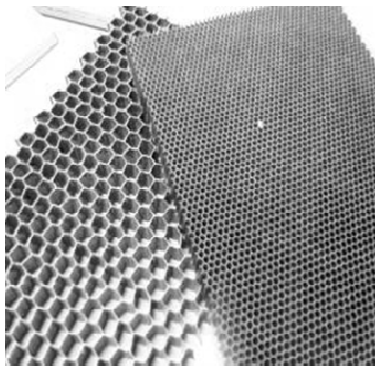


Рис. 3. Сотопласт Tyvek Housewrap

– *по степени замкнутости ячеек*: закрытоячеистые (ячейки в макроструктуре являются изолированными) и открытоячеистые (газовая фаза соседних ячеек сообщается между собой). Однако подобное разграничение оказывается весьма условным, что связано с особенностями технологического процесса получения пенопластов [47, 53];

– *по размерам ячеек*: мелко- и крупноячеистые;

– *по соотношению газовой и твёрдой фаз*: исходя из номинальных значений показателя кажущейся плотности ρ пенопласты подразделяют на сверхлёгкие ($\rho < 10 \text{ кг/м}^3$), лёгкие ($\rho = 10 \dots 500 \text{ кг/м}^3$), облегчённые (кажущаяся плотность превышает 0,5 значения плотности исходного полимера) и интегральные (структурные), у которых чётко выраженный градиент плотности, возрастающий от середины к поверхности образца, синтактные (наполненные) пеноматериалы, представляющие собой газонаполненные облегчённые компаунды, средняя плотность которых складывается из плотностей полимерного связующего и материала оболочки полого микро- или макросферического наполнителя, а также из плотности газа, заключённого внутри этой оболочки [44, 62]. В качестве наполнителей чаще всего используют стекловолокно, тальк, оксиды и соли металлов и т.д. [14]

– *по способу получения*: блочные и формованные, заливочные и получаемые методом напыления. В зависимости от метода изготовления пенопласты производят по прессовой и беспрессовой технологии. Кроме того, пенопласты можно получать вспениванием непосредственно в самих конструкциях (композиции заливочного типа). По прессовой технологии изделия получают различными методами – методом масштабного прессования, самоформования и др.; по беспрессовой технологии – с использованием токов высокой частоты, методом теплового удара, литьём под давлением, экструзией. Более подробно данные методы рассмотрены в [20, 25, 29, 34, 36, 37, 44, 50, 55, 60, 61].

– *в зависимости от области применения*: по величине кажущейся плотности на: конструкционные $\rho \geq 400 \text{ кг/м}^3$; полуконструкционные $100 \text{ кг/м}^3 \leq \rho \leq 400 \text{ кг/м}^3$; неконструкционные $\rho \leq 100 \text{ кг/м}^3$ [12, 81].

2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА

В общем случае в исходный олигомер или полимер вводят обычно несколько добавок, способствующих получению пенопласта заданного качества. Это может быть: жидкий, твёрдый и (или) газообразный порообразователь (вспенивающий агент), ПАВ, катализатор, ускоритель или ингибитор протекающих химических реакций, сшивающий агент, антиоксидант, светостабилизатор, антистатик, наполнитель (усиливающий, токопроводящий или др.), пластификатор, разбавитель, краситель или пигмент, мономерный или полимерный модификатор и др. Создаются комбинированные пенопласты из смесей полимеров, в том числе с керамическим порошком, цементом, растворимым стеклом, измельчёнными отходами древесины.

Основные принципы переработки пластмасс в изделия (формование изделий) достаточно просты. В подавляющем большинстве случаев это подача расплава в форму, где расплав затвердевает либо в результате охлаждения (термопласты), либо в результате химического сшивания (реактопласты). Подача расплава в форму может быть периодической (литьё, прессование и т.п.) либо непрерывной (экструзия, каландрование и т.п.). В первом случае материал формуется, находясь в форме, а во втором – проходя через форму.

При производстве вспенивающегося полистирола (ВПС) основными являются способы суспензионной полимеризации и полимеризации в массе. Наиболее современным и эффективным является второй способ получения ВПС. Помимо того, что полимеризация в массе является более экономичным способом производства, качество конечной продукции очень сильно отличается. Вспенивающий полистирол, произведенный методом полимеризации в массе, позволяет изготавливать более качественную и сложную продукцию [25, 55, 62].

Полимеризация в массе. Метод производства полистиролов полимеризацией в массе с неполной конверсией мономеров является в настоящее время одним из наиболее распространённых в силу высоких технико-экономических показателей. В отечественной промышленности метод полимеризации в массе был выбран в качестве преимущественного в 1970-х гг., и в настоящее время по этому методу выпускается около 50% продукции. Этот метод имеет оптимальную схему технологического процесса. Процесс осуществляется по непрерывной схеме в системе последовательно соединённых 2–3 аппаратов с мешалками; заключительную стадию процесса часто проводят в аппарате колонного типа. Начальная температура реакции 80 ... 100 °С, конечная 200 ... 220 °С. Полимеризацию прерывают при степени превраще-

ния стирола 80 ... 90%. Непрореагировавший мономер удаляют из расплава полистирола под вакуумом, а затем водяным паром до содержания стирола в полимере 0,01 ... 0,05%. В полистирол вводят стабилизаторы, красители, антипирены и другие добавки и гранулируют. Блочный полистирол отличается высокой чистотой. Эта технология наиболее экономична (в ней отсутствуют операции промывки, обезвоживания и сушки мелкодисперсных продуктов) и практически безотходна (непрореагировавший стирол возвращается на полимеризацию). Проведение процесса до неполной конверсии мономера (80 ... 90%) позволяет использовать высокие скорости полимеризации, контролировать температурные параметры, обеспечивать допустимые вязкости полимеризуемой среды. При проведении процесса до более глубоких степеней превращения мономера затрудняется отвод тепла от высоковязкой реакционной массы, становится невозможным вести полимеризацию в изотермическом режиме. Эта особенность процесса полимеризации в массе привела к тому, что все большее внимание уделяется другим способам производства, и, в первую очередь, суспензионному методу [25, 29, 34, 36, 55, 79, 88].

Суспензионная полимеризация. Полимеризация в суспензии – конкурирующий технологический процесс, который развивается параллельно с полимеризацией в массе, основан на малой растворимости виниловых мономеров в воде и на нейтральности последней в реакциях радикальной полимеризации. Процесс используется для получения продукта специальных марок пенополистирола. Суспензионный метод производства – полунепрерывный процесс – характеризуется наличием дополнительных технологических стадий (создание реакционной системы, выделение полученного полимера) и периодическим использованием оборудования на стадии полимеризации. Процесс проводится в реакторах объёмом 10 ... 50 м³, снабжённых мешалкой и рубашкой. Стирол суспендируют в деминерализованной воде, используя стабилизаторы эмульсии; инициатор полимеризации (органические пероксиды) растворяют в каплях мономера, где и происходит полимеризация. В результате образуются крупные гранулы в суспензии полимера в воде. Полимеризацию ведут при постепенном повышении температуры от 40 до 130°C под давлением в течение 8 ... 14 часов. Из полученной суспензии полимер выделяют центрифугированием, после чего его промывают и сушат. Закономерности суспензионной полимеризации близки к закономерностям полимеризации в массе мономера, но существенно облегчены теплоотвод и перемешивание компонентов системы [55, 79, 88, 89].

Среди многообразия способов переработки полистирола в пенопласты можно выделить следующие основные [20, 25, 29, 34, 36, 37, 44, 50, 55, 60, 61].

Прессование – это пластическая деформация материала при действии на него давления и последующей фиксации формы изделия.

Прессовым методом пенополистирол изготавливают на основе эмульсионного полистирола. В качестве порообразователя применяют порофор. На 100 частей полистирола берут 2 – 5 частей (по массе) порофора. Производство пенополистирола прессовым методом начинают смешивая полимер с газообразователем в шаровой мельнице, снабжённой рубашкой охлаждения, в течение 12 ... 24 ч до получения однородной смеси. Приготовленную композицию прессуют на гидравлических прессах в закрытых пресс-формах при температуре 120 ... 180 °С и давлении 12 ... 20 МПа. При этом частицы полимера сплавляются в монолитную массу, а газообразователь разлагается.

Выделяющиеся газы частично растворяются в полимере, образуя насыщенный раствор, а избыток газа распределяется равномерно в нём в виде мельчайших ячеек. После выдержки заготовку охлаждают и извлекают из пресс-формы. Опрессованные заготовки вспенивают при температуре 100 ... 105 °С в среде насыщенного водяного пара. Состав композиции для производства прессового пенополистирола приведён в табл. 1 [36].

Пенопласт можно получать с различной плотностью в зависимости от количества вводимого в смесь газообразователя.

Различают следующие виды прессования:

- холодное прессование (процесс идёт без нагревания);
- компрессионное (прямое) прессование осуществляется в пресс-формах, конфигурация полости которых соответствует форме изделия. Для снижения вязкости материала перед подачей давления или осуществления фиксации формы изделия за счёт реакции отверждения необходим нагрев;

1. Состав композиций прессовых пенополистиролов

Компоненты	Количество компонентов в композициях пенопластов, мас. ч.	
	ПС-1	ПС-4
Полистирол эмульсионный	100	100
Порофор ЧХЗ-57	3 ... 5	1 ... 1,5
Углекислый аммоний	–	3 ... 4
Бикарбонат натрия	–	2 ... 3
Этиловый спирт	–	2 ... 3

– литьё под давлением заключается в нагревании материала до вязкотекучего состояния и передавливании его в закрытую литьевую форму, где материал приобретает конфигурацию внутренней полости формы и затвердевает.

Прессовым методом получают пенополистирол на основе эмульсионного полистирола и различных органических газообразователей (порофора). На их основе разработаны следующие типы пенопластов: ПС-1, ПС-2, ПС-4, ПС-5, ПС-18, ПС-254 и ПС-БСГ [12, 25, 34, 36, 55].

Беспрессовый метод получения пенополистирола заключается в вспенивании не отдельного блока (заготовки), а небольших гранул с последующим их спеканием (склеиванием). Технологический процесс производства осуществляется в следующем порядке. Пенистый полистирол, полученный полимеризацией стирола суспензионным способом в присутствии инициатора и легколетучего порообразователя, подвергают предварительному вспениванию путём нагрева гранул до 100°С в кипящей воде, паром или смесью пара с воздухом. Следующим этапом получения пенополистирола является подсушивание вспененных гранул на открытом воздухе и выдерживание их в течение 24 ч. Окончательное вспенивание производят несколькими способами: в формах при действии пара; в автоклавах; в формах, которые проходят через посты загрузки, прогрева, остывания и извлечения изделий; между движущимися непрерывными лентами, образующими прямоугольный канал для вспенивания; методом совмещённого формования в массивной форме, в которую подают острый пар. Рецепт получения беспрессового пенополистирола приведена в табл. 2 [36].

2. Состав реакционной смеси гранул для получения беспрессового пенополистирола ПСБ-С

Компоненты	Количество компонентов в композиции
Умягчённая вода, м ³	1,5 ... 2,4
Эмульгатор – 10%-ный раствор поливинилового спирта в воде, кг	70 ... 120
Жидкий стирол, кг	700 ... 800
Инициатор – 5%-ный раствор порофора ЧХЗ-57 в стироле, кг	5 ... 10
Изопентановые фракции, кг	25 ... 500
Жидкий азот, кг	20
Два-тридибромфосфат	3 ... 5

Экструзия (от позднелат. *extrusio* – выталкивание) – это технологический процесс получения изделий неограниченной длины продавливанием расплава полимера через формующую головку с каналами необходимого профиля с последующим охлаждением, калиброванием и т.д. Основным технологическим оборудованием для переработки полимеров в изделия методом экструзии являются одночервячные, многочервячные, поршневые и дисковые экструдеры [6, 22, 31, 55, 86, 95].

Виды экструзии:

– *холодная экструзия* – возможны только механические изменения в материале вследствие медленного его перемещения под давлением и формованием этого продукта с образованием заданных форм;

– *тёплая экструзия* – сухие компоненты сырья смешивают с определённым количеством воды и подают в экструдер, где, наряду с механическим, его подвергают ещё и тепловому воздействию (продукт нагревается извне), получаемый экструдат отличается небольшой плотностью, незначительным увеличением в объёме, пластичностью, а также ячеистым строением. Иногда экструдат необходимо подсушивать;

– *горячая экструзия* – процесс протекает при высоких скоростях и давлениях, значительном переходе механической энергии в тепловую, что приводит к различным по глубине изменениям в качественных показателях материала. Кроме того, может иметь место регулируемый подвод тепла как непосредственно к продукту, так и через наружные стенки экструдера. Массовая доля влаги в сырье при горячей экструзии составляет 10 ... 20%, а температура превышает 120 °С. В таблице 3 приведён состав композиции для производства пенополистирола методом экструзии [85, 88].

3. Состав композиций экструзионного пенополистирола

Компоненты	Количество компонентов в композициях пенопластов, мас. ч.
Полистирол вспенивающийся, содержащий 3,5 ... 7% пентана или изопентана или их смеси	100,0
Перлит молотый	1
Бикарбонат натрия	1
Лимонная кислота	0,8
Стеарат цинка или бария	0,2
Тетрабромпарахсиллол	1,2

Композицию экструдуют со скоростью 60 кг/ч, температура вспенивания 130 ... 140°C.

Применение экструзии позволяет нагревать, пластифицировать, гомогенизировать и придавать необходимую форму исходному сырью, химический состав конечного продукта при этом идентичен химическому составу исходного сырья, что позволяет добиваться стабильного качества продукта, прибегая при этом к минимальному количеству настроек экструдера. Этим объясняется относительная простота машин, работающих в химической промышленности. При этом, имея определённые фильеры, можно выпускать различной формы изделия неограниченной длины.

Пример такого пенополистирола: экструзионный пенополистирол Styrodur фирмы "BASF AG"; "ПЕНОПЛЕКС" – фирма "КИНЭКС СПб" (г. Санкт-Петербург); а также "ТЕХНОПЛЕКС", "ЭКСТРОЛ", "XPS URSA" и др., которые производят различные корпорации в нашей стране [79, 80, 86, 87, 93, 96].

Литьё без давления – это объединение в одном технологическом процессе синтеза полимера и его переработки при приложении незначительного давления, создаваемого насосами.

Пенопласты также можно получать вспениванием непосредственно в самих конструкциях (например, в конструкции несъёмной опалубки из пенополистирола). Для вспенивания материала используются различные технологические методы перемешивания: механическое перемешивание, барботирование с введением пенообразователей, наполнение исходной смеси материала газом под давлением, с дальнейшим понижением давления [25, 36, 50, 62].

Ещё одним методом получения пористых материалов является вымывание из монолитного полимерного образца растворимого полимера. По своим свойствам похожи на пенопласт газонаполненные пластмассы, которые получают при применении полых наполнителей, таких, как заполненные газом сферические микрокапсы.

В качестве добавок к пенопластам используют многочисленную группу специальных веществ, существенно влияющих на свойства. Различают светостабилизирующие добавки, антиоксиданты, огнезащитные добавки или антипирены, антистатики, антислипы, скользящие добавки, антиблоки, нуклеаты, модификаторы и др.

Антиоксиданты вводят в полимер во время экструзии или литья под давлением для предотвращения термоокисления в процессе переработки и для замедления деструкции во время хранения и эксплуатации изделия. Также данные добавки применяют и для защиты полиме-

ра при работе в агрессивных средах. Действующее вещество – смесь соединений фенолов и фосфидов.

Антипирены делают полимеры негорючими. Специальные антипирены используют для производства негорючих плёнок, листов и литевых изделий.

Скользкие добавки служат, своего рода, внутренней смазкой в полимере. Они уменьшают вязкость расплава, ощутимо повышают производительность экструзии. И в то же время делают поверхность плёнок и других полимерных изделий более гладкой, блестящей и глянцевой. Они уменьшают коэффициент трения готовых изделий. Действующие вещества – производные высших жирных кислот [25, 36, 50, 62].

При введении в пенополистирол различных наполнителей получают следующие материалы: *пенополистиролцемент* – материал, разработанный фирмой "BASF" в 1952 г., который на 70% состоит из гранул полистирола и на 30% из поризованного цемента; *пенополистиролбетон* – в состав входят пенополистирольные гранулы плотностью 25 ... 35 кг/м³ и пенобетон, включающий неорганическое вяжущее, мелкий заполнитель и пенообразующий компонент; композиционный пенопласт на основе битума и пенополистирола, который относится к вспенивающимся заливочным пенопластам, в его состав входят вспенивающийся полистирол марки ПСБ и нефтяные битумы БН-IV, БН-V [11, 12, 22, 62].

3. СТРУКТУРА ПЕНОПОЛИСТИРОЛА

Пенопласты представляют собой дисперсные полимерные системы. Это означает, что в структуре пенопласта взаимно распределены в пространстве полимер и газовая среда. Газообразная фаза при этом составляет не менее 50% (по объёму), а минимальный диаметр ячеек не превышает 0,02 мм. Типичная структура экструзионного пенополистирола приведена на рис. 4 [79, 86, 95].

Из рисунка видно, что ячейки воздуха разделены тонкими плёнками полимерного материала. Сочетание твёрдой и газообразной фаз определяют специфичность свойств пенопластов. Свойства полимерных пен сильно зависят от строения и формы ячеек.

Содержание полимера-основы характеризуется кажущейся плотностью. В пеноматериале с низкой кажущейся плотностью объёмное содержание полимера составляет менее 5%. Полимер распределяется в виде тяжей (стержней), вершин (узлов) и тонких оболочек (плёнок), образуя ячейки, заполненные газом. Отдельные стенки ячеек изогнуты, тяжи же обычно не искривлены и имеют переменное сечение (утолщение вблизи узлов). Ячеистая структура большинства лёгких пенопластов имеет полиэдрическую форму преимущественно с 12 – 14-гранными ячейками. С увеличением объёмной доли полимера-основы структура лёгкого пенопласта несколько видоизменяется. Хотя форма ячеек и сохраняется полиэдрической, однако доля полимера в узлах ячеек и увеличивается, а отношение длины тяжей к их ширине уменьшается. Иной вид имеет структура пенопластов повышенной кажущейся плотности, а именно, при увеличении содержания полимера более 30% ячейки представляют собой сферические полости, более или менее равномерно распределённые по всему объёму пеноматериала. Увеличение объёмной доли полимера приводит к уменьшению числа полостей в пенопласте. Пеноматериалы, содержащие 10 ... 30% полимера-основы, состоят в основном из ячеек полиэдрической формы, хотя поперечные и продольные размеры тяжей близки. Значительная часть полимера сосредоточена в узлах ячеек [2 – 4, 16, 17].

Пенополистирол представляет собой особый вид материала, отличающийся явно выраженной физической неоднородностью, своеобразием микроструктуры, напоминающей структуру

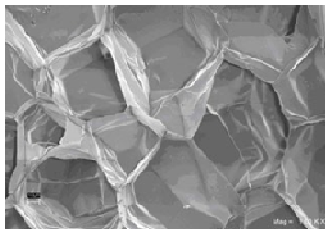


Рис. 4. Структура пенополистирола

застывшей пены. Он состоит из более или менее правильно чередующихся слоёв полимерной основы, образующей стенки ячеек, заполненных газом. Образующиеся в полимерной основе газовые ячейки вначале представляют собой сферы. Когда их объём приближается к 74% объёма всей массы, сферы, сдвигая одну другую, деформируются в многогранники, в идеальном случае каждая ячейка представляет собой додекаэдр – правильный двенадцатигранник, гранями которого являются пятиугольники (рис. 5) [2, 42].

Однако реальные пенистые пластмассы редко имеют однотипную макроструктуру. В процессе вспенивания сферические ячейки деформируются раньше, чем пузырьки газа займут оптимальный объём. В результате структура пенополистирола получается псевдополиэдрической. Форма, размеры ячеек, толщина полимерных плёнок, образующих стенки ячеек, неодинаковы по объёму материала. Эти колебания обусловлены составом композиции и технологией изготовления.

Пенопласты, изготовленные по прессовой технологии, имеют равномерную, мелкоячеистую структуру [12, 16, 18, 39]. Содержание закрытых ячеек составляет 88 ... 96%. Например, для пенопласта ПС-1 диаметр элементарных ячеек в среднем составляет 0,1 ... 0,2 мм, а толщина полимерных плёнок, образующих стенки ячеек, колеблется в пределах 5 ... 10 мкм. Пенопласт ПС-4 (рис. 6) имеет значительно более неоднородную структуру вследствие использования смеси органических и неорганических газообразователей, обладающих различной температурой разложения.

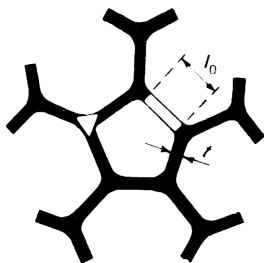


Рис. 5. Модель ячейки структуры пенопласта

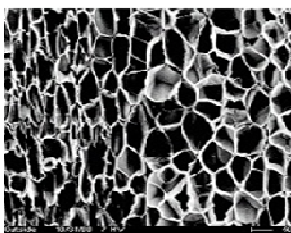


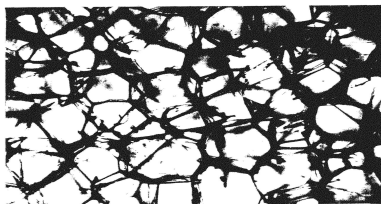
Рис. 6. Структура пенопласта ПС-4

Основными элементами структуры беспрессовых пенопластов являются деформированные гранульные образования. Совокупность этих образований представляет собой надъязычеистую структуру материала, которая играет важную роль в сопротивляемости и характере разрушения этих пенопластов [2, 12, 16, 20]. Каждое гранульное образование является пористым телом, содержащим замкнутые ячейки. Форма этих образований зависит от принятого технологического режима формования плит и блоков пенопласта. Между гранульными образованиями в структуре материала встречаются газовые полости, раковины

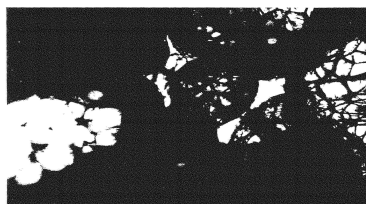
и другие структурные дефекты. Таким образом, структура беспрессовых полистирольных пенопластов состоит из надъячеистой и ячеистой структур. У пенопласта ПСБ-С в отличие от ПСБ (рис. 7) структура более мелкодисперсная, масса распределена неравномерно по объёму гранульных образований, периферийные области уплотнены. Между гранульными образованиями больше дефектов. Она состоит из мелкочаеистых сферических частиц (гранул) диаметром 3 ... 10 мм, спёкшихся между собой. Внутри каждой гранулы имеются микроячейки диаметром 10 ... 200 мкм, а между гранулами – пустоты объёмом 2 ... 4%. Толщина полимерных стенок микроячеек колеблется в пределах 1 ... 2 мкм. Введение антипиреновой добавки ухудшает спекаемость гранул в процессе формирования материала, обуславливая тем самым повышенное содержание межгранульных пустот и полостей.

Кажущаяся плотность пенополистирола зависит от количества газообразователя или вспенивающего агента. После того, как она достигнет предельного минимального значения, увеличение количества газообразователя в исходной композиции сверх оптимального не приводит к дальнейшему её понижению. Маркировка пенопластов при этом производится в зависимости от плотности согласно [65]. Значение кажущейся плотности может колебаться, особенно эти колебания заметны по высоте плит и блоков. Это объясняется главным образом технологическими причинами. Например, пенополистирол ПСБ-С М35:

- тип – ПСБ-С (пенополистирол, изготовленный по беспрессовой технологии);
- С – самозатухающий, имеет в своём составе антипиреновые добавки (см. гл. 2);
- марки М35(имеет кажущуюся плотность – 35,0 кг/м³).



a)



б)

Рис. 7. Структура пенопласта ПСБ кажущейся плотности 35 кг/м³ (а); макроструктура пенопласта ПСБ-С (б)

4. ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПЕНОПОЛИСТИРОЛА

Характер деформации и разрушения пенопластов определяется как строением и физическим состоянием полимера-основы, так и спецификой работы элементов макроструктуры при нагружении, влиянием свойств сырья и технологии изготовления.

У пенопластов в условиях напряжённого состояния наблюдаются резко выраженные отклонения как от свойств идеально упругих тел, так и от свойств идеально вязких жидкостей, т.е. напряжение одновременно зависит и от деформации, и от её скорости.

Сжатие. У лёгких пенопластов (с объёмным содержанием полимера-основы менее 30%) наблюдается разрушение ячеистой структуры за счёт потери устойчивости тяжей при достижении разрушающего напряжения при сжатии. У крупнопористых жёстких пенопластов сначала происходит разрушение тяжей наиболее ослабленного слоя приблизительно на высоту одной ячейки с одновременным снижением напряжения. Далее последовательно и необратимо разрушаются тяжи каждого соседнего прилегающего слоя. У мелкопористых лёгких пенопластов также происходит смятие наиболее ослабленного поперечного слоя, но на высоту не одной, а нескольких ячеек. Поперечные размеры образцов практически не меняются даже при деформациях сжатия до 50%. У пенопластов же повышенной плотности при испытании на сжатие происходит хрупкое разрушение образцов с образованием трещин по наклонным или продольным плоскостям [18, 20, 23, 33].

При испытании пенопластов на сжатие хрупкое разрушение в большинстве случаев отсутствует и чётко выраженного предела прочности не наблюдается. Происходит значительная деформация пенополистирола без потери несущей способности, поэтому эта характеристика определяется условно как напряжение, отвечающее заданной деформации материала (2, 5 и 10% относительной деформации).

В общем случае диаграмма "напряжение – деформация" состоит из двух участков (рис. 8) [3, 52, 53]. Первая область ("докритическая"), соответствующая участку ОА, характеризуется сжатием стенок ячеек. Для второй области ("закритической"), соответствующей участку АВС, характерна потеря устойчивости ячеек и их уплотнение ("сплющивание"). Соотношение этих областей на диаграмме определяется свойствами полимерной основы и параметрами ячеистой структуры пенопластов.

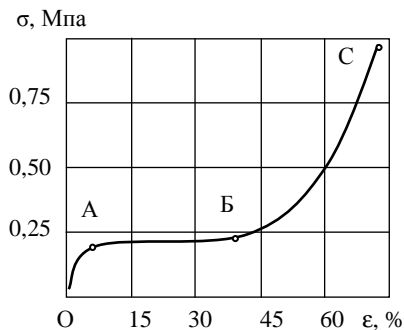


Рис. 8. Условная диаграмма "нагрузка – деформация" пенополистирола ПС-4 ($\rho = 30 \text{ кг/м}^3$)

За предел прочности при сжатии принимается напряжение ($\sigma_{вр}$), соответствующее площадке текучести. Оно зависит от скорости испытаний. Несущую же способность пенопластов при сжатии рекомендуют оценивать по критическим напряжениям ($\sigma_{кр}$) из диаграммы $\sigma - \epsilon$. Для оценки прочности при кратковременных испытаниях рекомендуют применять критическое напряжение, соответствующее 5%-ному деформированию образцов (напряжение, при котором резко меняется характер деформирования пенопластов, и развиваются значительные вязкие деформации) [3, 12, 36].

Растяжение. При растяжении в нагруженном пенопласте возникает концентрация напряжений на одиночных тяжках или стенках ячеек. В зоне таких перенапряжённых участков формируются дискретные поверхности разрушения по этим элементам макроструктуры, поэтому при растяжении для пенопластов характерна нелинейная зависимость деформации от напряжения. Отклонения от линейности проявляются уже в области малых деформаций, причём кривизна постоянно увеличивается с ростом напряжений. Наклон кривой на начальном участке, где напряжение более или менее пропорционально деформации, определяется жёсткостью полимерной композиции, составляющей основу пенопласта [36, 49, 50].

Диаграмма "напряжение – деформация" состоит из характерных точек (пример показан на рис. 10): точка А – соответствует участку упругих деформаций; точка В – пластического течения. Чтобы установить допустимые значения деформаций пенопластов для их эксплуатации в ограждающих конструкциях зданий без разрушения структуры необходимо определить эти точки. Точка А определяется из построе-

ния графиков разностей деформаций, т.е. отрезок ОА соответствует участку, где деформация постоянна при увеличении нагрузки.

При приложении напряжений, соответствующих точке А, происходит резкое увеличение разности деформаций. Эта точка соответствует упругой зоне деформации (ϵ_y). При определении точки В изучают раздельно упругие и остаточные деформации при ступенчато возрастающих нагрузках с разгрузкой до нуля на каждой ступени нагружения (точка соответствует пересечению упругих и остаточных деформаций, когда остаточные деформации равняются упругим) – предельно допустимая деформация (ϵ_n). Точка В находится между точками А и В и соответствует критическим величинам напряжения и деформации упруго-эластических пенопластов ($\epsilon_{кр}$) типа ПСБ [49].

Сдвиг. Пенополистирол типов ПС-1 и ПСБ при сдвиге разрушаются по винтовой поверхности. Разрушение образцов ПС-4 характеризуется образованием в средней части шейки, в зоне которой материал является настолько пластичным, что величина воспринимаемого крутящего момента резко падает [39].

Изгиб. Характер диаграммы "напряжение – деформация" при изгибе сходен с диаграммами при других напряжённых состояниях. Прочность образцов в значительной степени определяется работой материала в растянутой зоне и в большинстве случаев предел прочности при изгибе близок к пределу прочности при растяжении [12, 39].

Для пенопласта, обладающего значительными по величине неупругими (пластическими) деформациями, в момент разрушения предел прочности при изгибе больше, чем при растяжении. Например, у пенопласта ПС-1 ($\rho = 195 \text{ кг/м}^3$) предел прочности при изгибе выше в 1,7 раза, чем при растяжении, а у ПС-4 ($\rho = 30 \text{ кг/м}^3$) предел прочности при растяжении выше в 1,5 раза, чем при изгибе, так как не наблюдается хрупкого разрушения при изгибе.

Остаточные деформации. Остаточные деформации зависят от величины нагрузки. Зависимость остаточных деформаций $\epsilon_{ост}$ от полных показана на рис. 9. Остаточные деформации заметно растут с увеличением количества циклов загрузки. Их нарастание определяет рост полных деформаций, так как величина упругих деформаций остаётся почти постоянной, убывая незначительно. При ступенчато возрастающей нагрузке с выдержкой на каждой ступени 5 ... 10 мин наблюдается деформация последствия. Характер развития деформаций последствия пенопластов при сжатии при $\sigma < \sigma_{кр}$ имеет несущественное

отклонение от закона Гука. В этой области напряжений имеются незначительные остаточные деформации после разгрузки и малые скорости развития деформации последействия. При $\sigma > \sigma_{кр}$ происходит заметное нарастание полных деформаций, резко возрастают остаточные деформации и деформации последействия при выдержке под постоянной нагрузкой [14]. В [43] установлено соотношение прочностных и упругих характеристик полистирольных пенопластов (табл. 4).

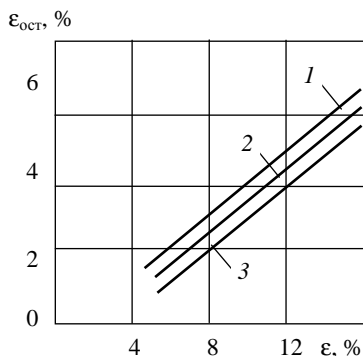


Рис. 9. Зависимости остаточных деформаций от полных пенополистирола различной кажущейся плотности: 1 – 29; 2 – 38; 3 – 67 кг/м³ [2]

4. Соотношение прочностных и упругих характеристик полистирольных пенопластов

Тип пенопласта	Кажущаяся плотность, кг/м ³	Соотношение прочностных и упругих характеристик при растяжении, сжатии и сдвиге	
		Прочностные: $\sigma_p, \sigma_c, \tau^*$	Упругие: E_p, E_c, G^*
ПСБ, ПСБ-С	20	$\sigma_p > \sigma_c > \tau$	$E_p > E_c > G$
ПСБ, ПСБ-С	40 ... 60	$\sigma_p < \sigma_c > \tau$	$E_p > E_c > G$
ПС-1, ПС-4	40 ... 100	$\sigma_p > \sigma_c > \tau$	$E_p > E_c > G$

* σ_p – напряжение растяжения; σ_c – напряжение сжатия; τ – напряжение сдвига; E_p – модуль упругости при растяжении; E_c – модуль упругости при сжатии; G – модуль упругости при сдвиге.

Влияние структуры пенополистирола на механические свойства. Из полистирольных пенопластов наиболее высокими механическими характеристиками обладает пенопласт ПС-1. Из-за пониженной плотности пенопласт ПС-4 имеет более низкие прочностные и упругие показатели [16, 33, 46].

По механическим свойствам беспрессовый пенополистирол уступает прессовому из-за низкой прочности суспензионного полистирола, из которого его получают. Кроме того, прессовые пенополистиролы (ПС-1, ПС-4) изготавливают на основе эмульсионного полистирола, имеющего более высокий молекулярный вес, а прочность полимера, как правило, с повышением молекулярного веса возрастает. Беспрессовый же пенополистирол, полученный спеканием отдельных гранул между собой, при растяжении может разрушаться по межгранульным поверхностям вследствие их недостаточного спекания. Наличие антипиренов в составе этих пенопластов также снижает механические характеристики пенопластов [12].

Характерной особенностью пенистых пластмасс является зависимость кратковременных механических показателей от кажущейся плотности. С её повышением прочность и жёсткость возрастают по параболическому закону. Диаграммы "напряжение – деформация" при растяжении и сжатии пенопласта ПСБ-С в зависимости от плотности показаны на рис. 10 [17, 44].

На прочность пенопласта ПСБ в зависимости от вида напряжённого состояния материала влияет размер гранул. При действии растягивающих и сдвигающих напряжений с увеличением диаметра происходит снижение прочности, при действии сжимающих напряжений влияние размера гранул на прочность пенопласта не наблюдается.

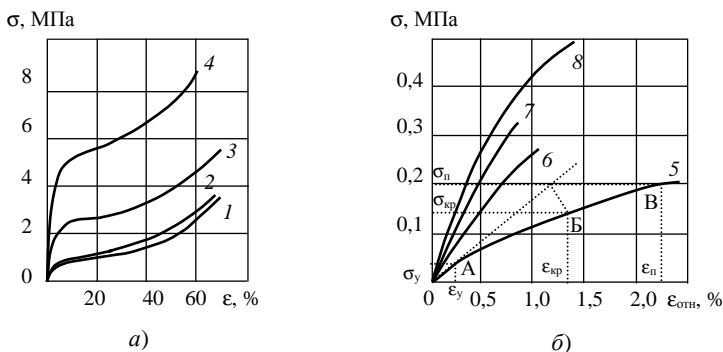


Рис. 10. Диаграммы " $\sigma - \epsilon$ " пенопласта ПСБ-С при сжатии (а) и растяжении (б) различной кажущейся плотности:

1 – 19,3; 2 – 22,6; 3 – 37,2; 4 – 59,1; 5 – 25,4; 6 – 37,8; 7 – 42,6; 8 – 54,2 кг/м³

Деформационные характеристики (E_p , E_c , G) практически не зависят от размера гранул. Отмечено, что размер гранул пенопласта оказывает влияние на разброс механических характеристик [50].

Анизотропия. У пенопластов анизотропия механических характеристик зависит от вида напряжённого состояния и в большей степени проявляется при растяжении. Пенопласт ПС-1 является изотропным – механические характеристики практически одинаковы во всех направлениях плиты, у пенопластов ПС-4 и ПСБ наблюдается анизотропия прочностных показателей. При этом прочностные показатели в направлении, перпендикулярном поверхности плиты, на 20 ... 40% выше по сравнению с показателями, полученными на образцах, вырезанных в продольном направлении. С уменьшением кажущейся плотности анизотропия возрастает [17, 20]. Отмечается, что у пенопласта ПСБ при $\rho = 15 \dots 20 \text{ кг/м}^3$ – изотропная структура, $\rho = 35 \text{ кг/м}^3$ – наблюдается наибольшая анизотропия (максимальное значение отношения продольного размера гранул к поперечному – 1,5 ... 1,7), далее вытянутость гранул уменьшается и при $\rho = 90 \dots 100 \text{ кг/м}^3$ равна единице.

Коэффициент Пуассона. Коэффициент Пуассона (μ_n) для пенопластов зависит не только от кажущейся плотности, а в большей степени от вытянутости ячеек. При растяжении и сжатии лёгких анизотропных пенопластов в различных направлениях коэффициент Пуассона может быть представлен в виде [16, 18]:

$$\mu_{n \rightarrow \uparrow}^{\uparrow \uparrow} \geq \mu_{n \rightarrow \uparrow}^{\rightarrow \uparrow} \geq \mu_{n \uparrow \uparrow}^{\rightarrow \uparrow}, \quad (1)$$

где $\uparrow \uparrow$ – направление вспенивания; $\rightarrow \uparrow$ – направление, перпендикулярное вспениванию; μ_n – коэффициент Пуассона (верхний индекс – направление растяжения-сжатия, нижний – направление измерения поперечной деформации).

В [49, 50] вместо коэффициента Пуассона рекомендуется использовать коэффициент поперечной деформации (μ), так как поперечное деформирование пенопластов обуславливается не столько особенностями полимерной основы, сколько спецификой их ячеистой структуры. Для полистирольных пенопластов его значение равняется 0,1 ... 0,35 и зависит от кажущейся плотности и анизотропии их ячеистого строения. Установлено, что μ для пенополистирола при растяжении больше, чем при сжатии.

Влияние температуры на механические характеристики пенополистирола. Характер влияния температурных факторов на механические свойства пенопластов определяется свойствами полимерной

основы, состоянием ячеистой структуры, наличием начальных внутренних напряжений, развитием релаксационных и ориентационных процессов в её структурных элементах, величиной давления газов в ячейках.

При повышенных температурах под действием механических напряжений возрастает роль эластических и пластических деформаций, проявляющихся в увеличении отклонения диаграммы "напряжение – деформация" от линейности. Так как полистирол является термопластичным полимером, то механические характеристики интенсивно снижаются вблизи температуры стеклования полимерной основы. При температурах более 60 ... 75°C пенополистирол ведёт себя как нелинейное вязкоупругое тело, способное к необратимому течению, наблюдается квазихрупкое разрушение, сопровождающееся вынужденно эластическими деформациями элементов ячеистой структуры [36, 49, 50]. Несколько большую стабильность механических показателей имеет самозатухающий пенополистирол ПСБ-С. Можно отметить, что изменение деформационных показателей при повышенных температурах происходит несколько в большей степени.

При понижении температуры диаграмма приближается к линейной, при этом повышаются все механические характеристики. При отрицательных температурах имеет место хрупкое разрушение пенополистирола, прочность и упругость увеличиваются.

Пример изменения прочностных и деформационных характеристик при различных температурах показан на рис. 11.

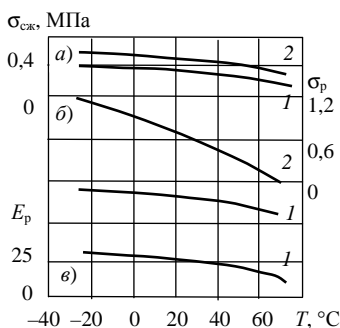


Рис. 11. Зависимости прочности при сжатии (а), прочности при растяжении (б) и модуля упругости при растяжении (в) пенопластов от температуры:
 1 – ПСБ ($\rho = 50 \text{ кг/м}^3$); 2 – ПС-4 ($\rho = 60 \text{ кг/м}^3$) [44]

5. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕНОПОЛИСТИРОЛА

Водопоглощение. Пенополистирол является достаточно стойким к действию влаги. Его поведение зависит от водостойкости полимерной основы и главным образом от структуры. Наилучшими свойствами обладает пенополистирол с замкнутыми порами и ячейками. Не менее важным фактором является кажущаяся плотность пенопласта и наличие на поверхности плит и блоков уплотнённой плёнки (корки). Большое значение имеет и соблюдение параметров технологических операций.

С уменьшением кажущейся плотности и повышением температуры влаго- и водопоглощение пенопластов возрастают (рис. 12, а). При продолжительном увлажнении эти характеристики интенсивно изменяются в первые 5 ... 18 суток, а затем постепенно стабилизируются (рис. 12, б). Отмечается, что водопоглощение пенополистирола продолжает медленно увеличиваться и после 30 суток испытаний [12].

Установлено [37, 38], что для беспрессового пенополистирола фирмы "Тиги – Кнауф" водопоглощение за 24 часа в зависимости от плотности составляет 0,8 ... 1,2%. Вода в него может проникать за счёт капиллярного эффекта через микроскопические щели в местах сплавления гранул.

Испытания образцов плит из экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЕКС при полном погружении в воду показывают, что водопоглощение происходит в течение первых десяти суток, затем прекращается и за 30 суток составляет не более 0,4% от объёма [76].

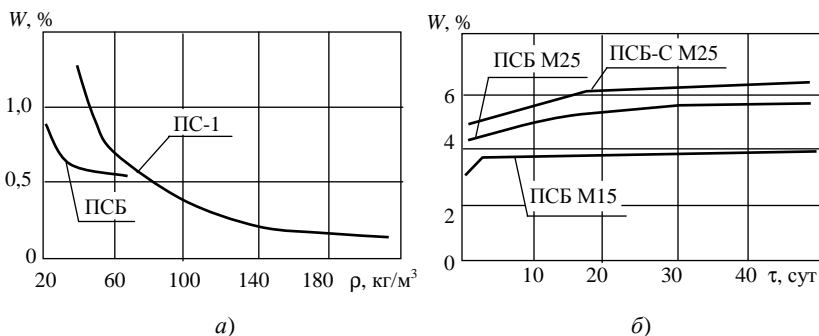


Рис. 12. Зависимости водопоглощения пенополистирола от кажущейся плотности (а) и продолжительности увлажнения (б)

Это связано с тем, что вначале идёт достаточно медленное заполнение разрушенных при изготовлении образцов ячеек, находящихся на поверхности, а после их заполнения внутрь материала вода не проникает.

Экструзионный пенополистирол также характеризуется высокой стойкостью к давлению водяных паров. Сопротивление паропрооницанию плит толщиной 20 мм равноценно одному слою рубероида [87, 95]. Однако увлажнение и периодическое (циклическое) замораживание пенопластов отражается негативно на их прочностных показателях.

Стойкость к циклическим воздействиям. Пенополистирол состоит из множества гранул, между которыми находится влага (по [65] – до 15%), оказавшаяся там вследствие особенностей технологического процесса переработки исходного сырья в пенопласт. Наличие влаги в пенопласте существенно увеличивает коэффициент теплопроводности, следовательно, эксплуатационный коэффициент теплопроводности беспрессового пенопласта, содержащего влагу в межгранульном пространстве, сильно возрастает. При циклических знакопеременных температурных нагрузках (периоды замораживания и оттаивания) влага, находящаяся в межгранульном пространстве, постепенно разрушает связи между гранулами, в результате чего качество утеплителя со временем резко ухудшаются, причём, чем ниже плотность такого материала, тем быстрее протекает процесс его разрушения. При этом разрушение такого многогранульного утеплителя сопровождается значительным увеличением его поверхности и, как следствие, возрастанием количества мономера, выделяющегося в окружающую среду [19, 36, 49, 50].

В [81] в лабораторных условиях изучалось влияние систематически действующих физических факторов, т.е. отрицательных температур и влажности на изменение водопоглощающей способности, сорбционных свойств и теплопроводности пенополистирольных плит. Исследования проводились на образцах пенополистирола, изготовленных беспрессовым, прессовым способами и методом экструзии по стандартным методикам.

Образцы беспрессового пенополистирола ПСБ плотностью 17 кг/м^3 после 110 циклов замораживания и оттаивания в воде имеют водопоглощение 350% по массе, а прессового типа ПС $\gamma = 72 \text{ кг/м}^3$ и экструзионного ПЕНОПЛЕКС $\gamma = 35 \text{ кг/м}^3$ соответственно 20 и 25%.

В результате исследований установлено, что образцы беспрессового пенополистирола после выдерживания в воде в течение двух суток увлажнились до 18,2%, через 40 дней влажность повысилась до 257,6%, а спустя 2 года составила 353,3% [81]. У пенополистирола,

изготовленного прессовым и экструзионным методами, через двое суток водопоглощение составило соответственно 3 и 5,9%. За 2 года нахождения в воде водопоглощение по массе у них увеличилось до 21,4 и 23%. Важно отметить, что водопоглощающая способность образцов пенополистирольных плит, подвергавшихся замораживанию и выдерживаемых в воде без замораживания, отличается незначительно. Аналогичная закономерность (т.е. увеличение водопоглощающей способности образцов пенополистирола) установлена и при проведении повторных испытаний водопоглощения (табл. 5).

Так, если пенополистирол, изготовленный беспрессовым методом, за двое суток набрал влажность по массе 18,2%, то при повторном испытании после высушивания его водопоглощение увеличилось до 100,9%, а аналогичный образец после 110 циклов замораживания и оттаивания в воде изменил свою влажность при повторном увлажнении с 23 до 111,5%. Подобная закономерность при меньших значениях влажности наблюдается и у пенополистирола, изготовленного прессовым и экструзионным методами. Близкая сходимость результатов наблюдается и при исследовании гигроскопичности пенополистирола (табл. 5).

5. Гигроскопическая влажность образцов пенополистирольных плит

Метод изготовления образцов пенополистирольных плит	Гигроскопическая влажность образцов по массе, %		
	До проведения испытаний на водопоглощение и морозостойкость	После испытаний на водопоглощение (2 года)	После испытаний на морозостойкость (110 циклов)
Беспрессовой метод ПСБ, $\gamma_0 = 17 \text{ кг/м}^3$	0,9	1,5	1,6
Прессовой метод, ПС-4 $\gamma_0 = 72 \text{ кг/м}^3$	0,7	0,90	0,97
Метод экструзии ПЕНОПЛЕКС, $\gamma_0 = 35 \text{ кг/м}^3$	0,6	1,07	1,15

**6. Изменение теплопроводности пенополистирольных плит,
проедших испытания на морозостойкость (110 циклов)
и максимальное водопоглощение (2 года)**

Метод изготовления образцов пенополистирольных плит	Теплопроводность образцов λ , Вт/(м·°С)			
	До испытаний		После испытаний	
	В сухом состоянии	При нормативной влажности (по массе) 10%	В сухом состоянии	При нормативной влажности (по массе) 10%
Беспрессовой метод, $\gamma_0 = 17 \text{ кг/м}^3$	0,039	0,040	0,040	0,042
Прессовой метод, $\gamma_0 = 72 \text{ кг/м}^3$	0,035	0,036	0,036	0,037
Метод экструзии, $\gamma_0 = 35 \text{ кг/м}^3$	0,030	0,031	0,030	0,031

Теплопроводность пенополистирольных плит, изготовленных беспрессовым методом, в результате температурно-влажностных воздействий увеличилась на 5%, прессовым – на 2,8%. Образцы экструзионного пенополистирола теплозащитные качества практически не изменили (табл. 6).

Морозостойкость. Заполняющая поры пенопластов вода при замерзании увеличивается в объёме и оказывает давление на стенки пор. Способность последних не разрушаясь противостоять давлению характеризует морозостойкость. Исследования [78] показали, что прочность пенополистирола ПСБ после испытания почти не уменьшается, а прочность ПС-4 и ПС-1 снижается примерно на 13 ... 15%. С увеличением числа циклов замораживания и оттаивания водопоглощение всех пенопластов увеличивалось (см. табл. 7). Как видно из таблицы, для пенополистирола ПСБ-С кажущейся плотности $32,5 \text{ кг/м}^3$ произошло незначительное повышение прочностных характеристик, что связано с демпфирующим действием воды, содержащейся в порах материала после испытаний на водопоглощение [12].

7. Морозостойкость пенополистирола

Тип пенополистирола	Кажущаяся плотность, кг/м ³	Водопоглощение после замораживания и оттаивания, %							Прочность при 10%-ном сжатии, МПа		Коэффициент морозостойкости
		Через 84 ч пребывания в воде	Количество циклов						До испытания	После испытания	
			1	5	10	15	20	25			
ПСБ	25,6	191	190,4	171	230	207	275	302	0,04	0,04	1,02
	32,5	30,5	27	26,7	37,4	88	195	132	0,061	0,065	0,97
ПС-4	42,1	51,53	40,49	49,27	51,13	52,69	53,16	56,85	0,51	0,44	0,87
	81	23,26	22,24	23,58	24,87	30,43	31,37	32,51	1,56	1,36	0,87
	159	4,58	3,76	4,42	6,7	8,75	9,08	9,48	2,19	1,88	0,86

Химическая стойкость пенопластов зависит от природы полимера и характера макроструктуры. При оценке химической стойкости необходимо учитывать развитую удельную поверхность пенопластов, которая способствует более интенсивному воздействию на них агрессивных сред. Наличие же на поверхности плит и блоков уплотнённой плёнки (корки) снижает поглощение агрессивных сред, повышая устойчивость пенопластов. Пенополистирол, как и полистирол, обладает высокой химической стойкостью.

Полистирольные пенопласты характеризуются высокой стойкостью к действию минеральных агрессивных сред. Так, пенополистирол устойчив к действию сильных и слабых минеральных кислот, кроме концентрированных азотной и соляной, а также к сильным и слабым щелочам, но он разрушается под действием эфиров, кетонов, хлорированных и ароматических углеводородов, набухает в бензине и маслах. Имеются противоречивые сведения по стойкости в некоторых средах: так в [36] отмечается, что пенополистирол к уксусной кислоте и маслам нестойк, к спиртам стоек, а в [49], отмечается, что к уксусной кислоте и маслам стоек, к спиртам слабо стоек. Гипс, известь, цемент, силиконовые масла и, не содержащий растворители, битум не нарушают структуру пенополистирола. Наиболее высокой химической стойкостью отличается беспрессовый пенополистирол. В таблице 8 приведены данные о стойкости пенополистирола к различным реагентам, согласно [36].

8. Химическая стойкость пенополистирола

Реагенты	Концентрация, %	Стойкость*
Вода водопроводная	–	С
Морская вода	–	С
Соляная кислота	36	С
Серная кислота	45	С
Фосфорная кислота	40	С
Едкий натр	40	С
Аммиачная вода	25	С
Муравьиная кислота	–	С

Реагенты	Концентрация, %	Стойкость*
Азотная кислота	68	Н
Ацетон	–	Н
Уксусная кислота	–	Н
Бензол	–	Н
Бензин, нефтепродукты	–	Н
Фтористоводородная кислота	–	С
Метиловый спирт	96	С
Этиловый спирт	96	С
Циклогексанол	–	Н
Этилбутилацетат	–	Н
Минеральные масла	–	Н
Растительное масло	–	Н
Дихлорэтан	–	Н

* С – стоек; Н – нестойк.

Экструзионный пенополистирол обладает достаточно высокой химической стойкостью к большинству используемых в строительстве материалов. Однако некоторые органические вещества могут привести к размягчению, усадке и даже растворению плит [84, 93].

Низкая химическая стойкость проявляется по отношению к следующим веществам:

- Ароматические углеводороды (бензол, толуол, ксилол).
- Альдегиды (формальдегид, формалин).
- Кетоны (ацетон, метилэтилкетон).
- Простые и сложные эфиры (диэтиловый эфир, растворители на основе этилацетата, метилацетата).
- Бензин, керосин, дизельное топливо.

- Каменноугольная смола.
- Полиэфирные смолы (отвердители эпоксидных смол).
- Масляные краски.

Высокая химическая стойкость по отношению к следующим веществам:

- Кислоты (органические и неорганические).
- Растворы солей.
- Едкие щёлочи.
- Хлорная известь.
- Спирт и спиртовые красители.
- Вода и краски на водной основе.
- Аммиак, углекислый газ, кислород, ацетилен, пропан, бутан.
- Фторированные углеводороды (фреоны).
- Цементы (строительные растворы и бетоны).
- Животное и растительное масло, парафин.

Особое внимание следует уделять совместимости его с другими материалами. Необходимо избегать контакта пенополистирольных плит с незатвердевшей битумной гидроизоляцией, клеями и красками на основе агрессивных растворителей.

Адгезионная стойкость. Повышение температуры примерно до 70 °С мало отражается на адгезии пенополистирола, при более высоких температурах наблюдается резкое падение его когезионной прочности из-за размягчения [36].

В конструкциях, в которых пенопласт участвует в совместной работе слоёв под нагрузкой лучше применять термопластичные клеи, воспринимающие температурные деформации без концентрации напряжений. Поскольку пенополистирол имеет замкнутые ячейки, то растворители из него испаряются плохо. Кроме того, некоторые органические растворители, задерживаясь в ячейках, разрушают пенополистирол. Поэтому, если клей содержит растворитель, то после нанесения его на склеиваемую поверхность даётся открытая выдержка для удаления растворителя из клеевого слоя.

Строительные конструкции с применением пенополистирола можно склеивать при помощи цементных, асбестоцементных и гипсовых растворов, холодной или горячей битумных мастик, поливинилацетатных эмульсий и т.д. В построечных условиях приклеивание утеплителя и защиту его от атмосферных воздействий обычно устраивают одним и тем же материалом. К таким материалам относятся полимерцементные композиции [11, 36, 49, 54].

Пенополистирол, соединяясь с другими материалами с помощью различных клеевых составов, образует клеевые швы, прочность которых значительно превышает прочность пенопласта в диапазоне температур от -40 до $+60^{\circ}\text{C}$.

Паро- и воздухопроницаемость незначительна по сравнению с другими теплоизоляционными материалами. С увеличением кажущейся плотности и при повышенных температурах проницаемость водяных паров в полистироле снижается [50].

Биологическая стойкость. Пенопласты не поддаются гниению, обладают высокой стойкостью к действию грибков и бактерий. Однако отмечается, что пенополистирол подвержен воздействию термитов, разрушается крысами и мелкими грызунами [49, 80, 81, 94, 96].

Экологичность. При применении пенополистирольных плит в качестве утеплителя не выделяется вредных веществ. Материал оценён как биологически нейтральный продукт [36, 50].

Коррозионная активность. Пенополистиролы марок ПС-1, ПСБ и ПСБ-С не корродируют другие материалы, а ПС-4 корродирует оцинкованные стали. Корродирующее действие усиливается при увлажнении пенополистирола, а также при повышенных температурах [35, 50].

6. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕНОПОЛИСТИРОЛА

Теплофизические свойства пенопластов определяются природой полимера-основы и ячеистой структурой [1, 2, 16 – 20, 36, 49, 50].

Теплостойкость. Деформативность пенопластов складывается из деформаций теплового расширения и усадки. В начальный период прогревания, вплоть до достижения температуры изотермического нагревания, в пенопластах развиваются температурные деформации, характеризующиеся коэффициентом температурного линейного расширения. При её достижении проявляются усадочные (необратимые) деформации. Интенсивность развития усадочных деформаций определяет формостабильность пенопластов. Она зависит от температуры стеклования полимерной основы, характера ячеистой структуры и вида вспенивающего агента. Интенсивное нагревание может привести к дополнительному расширению образцов, развивающемуся за счёт расширения вспенивающего агента или разложения газообразователя [49, 50].

Развитие во времени усадочных деформаций пенополистирола носит затухающий характер. При кратковременном (в течение 30 мин) нагревании пенополистирола до 100 °С почти не происходит объёмной усадки, но при дальнейшем повышении температуры объёмная усадка резко возрастает. На усадку заметно влияет влажность окружающей среды и температура. При повышении температуры испытаний усадка возрастает по параболическому закону. Результаты кратковременного и продолжительного экспонирования образцов пенопластов при отрицательных температурах свидетельствуют об их высокой стабильности. Периодическое нагревание образцов пенопласта при температуре ниже 60 °С слабо отражается на их формостабильности, развивающиеся деформации невелики и носят затухающий характер. Периодическое нагревание-охлаждение от +50 до –50 °С после 50 циклов выявили высокую стабильность температурной усадки: 0,31 ... 0,35% – ПСБ-С; 0,30 ... 0,33% – ПСБ; 0,06 – ПС-1; 0,28 – ПС-4 [12].

Максимально возможная усадка образцов пенополистирола ПС-4 любой плотности составляет $60 \pm 5\%$ и мало зависит от длины образца. Полученные данные исследования усадки "тонких образцов" (в этом случае влияние газового наполнения сводилось к минимуму) пенополистирола объясняют конформационным перераспределением макромолекул. Поскольку при изготовлении пенопластов после вспенивания при повышенных температурах происходит замораживание ячеистой структуры, то распределение конформаций макромолекул не отвечает

термодинамическому равновесию. В результате этого перераспределения материал стремится со скоростью, определяемой временем релаксации, принять форму, отвечающую наименьшей энергии. Время релаксации уменьшается с увеличением температуры. С увеличением толщины образцов описанный механизм сокращения усложняется присутствием газовых включений в замкнутых ячейках. Установлено, что время релаксации с увеличением толщины образца и его кажущейся плотности растут. Можно сделать вывод о невозможности длительного использования пенополистирола в теплоизоляции при температуре выше температуры стеклования [12, 36, 49].

Температура размягчения зависит от величины механического напряжения, степени замкнутости ячеек, типа вспенивающего агента и порядка величины давления газа внутри и снаружи закрытых ячеек, и может быть сравнима с пределом прочности при сжатии пенопластов. Однако по термомеханическим кривым нельзя определить температуру размягчения и температуру стеклования лёгких пенопластов ($\rho \leq 50 \text{ кг/м}^3$) ни дилатометрическим, ни термомеханическим методом [17, 20, 36, 50].

Критерием теплостойкости пенополистирола служит формоустойчивость, характеризующая поведение материала при повышенных температурах. Условно за характеристику теплостойкости пенополистирола принимают температуру, при которой линейная усадка материала не превышает 1% [35, 41, 49, 54]. Технической характеристикой теплостойкости является показатель рабочей температуры, при которой материал продолжает ещё сохранять свои эксплуатационные свойства, и усадочные деформации не превышают заданных значений. Диапазон рабочих температур пенопласта несколько ниже, чем у соответствующего полимера [3, 49].

На теплостойкость пенополистирола и его рабочую температуру влияет природа газообразователя. Пенополистирол ПС-1, изготавливаемый с помощью органических газообразователей, оказывающих пластифицирующее действие на полимер, имеет рабочую температуру +65 °С, а рабочая температура пенополистирола ПС-4, изготавливаемого с использованием минеральных газообразователей, +70 °С. Применение для получения пенопластов хлорпроизводных стирола позволяет повысить их теплостойкость на 20 ... 30 °С. Введение в рецептуру пенопластов фосфорсодержащих соединений с целью придания материалу свойства самозатухаемости, наоборот, снижает её [36, 50].

Результаты циклических испытаний пенополистирола ПСБ (охлаждение до -30 °С и нагревание до +50 °С) показали, что в этом слу-

чае происходит линейная усадка пенополистирола. Изменение линейных размеров образцов характеризуется коэффициентом линейного термического расширения (α). Отмечается, что значения α носят приближённый характер, так как снижение формоустойчивости пенополистирола при повышенных температурах в ряде случаев затрудняет его определение. Согласно [54] с увеличением температуры коэффициент (α) уменьшается (табл. 9). С увеличением числа циклов испытаний (нагревание – охлаждение) в интервале температур 0 ... 50 °С линейная усадка увеличивается, α уменьшается [после 1 цикла – $68,7 \times 10^6$; 2 – $65,2 \times 10^6$; 24 – $55,7 \times 10^6$, °С⁻¹].

Беспросовый пенополистирол имеет маленький коэффициент теплового расширения. В диапазоне температур от 20 до 80 °С он составляет $0,6 \times 10^{-4}$, °С⁻¹. Удлинение не является остаточным, и при охлаждении до первоначальной температуры длина плиты восстанавливается. Пенополистирол выдерживает кратковременное воздействие температуры 110 °С и несколько минут температуру 95 °С. При 70 ... 90 °С применение пенополистирола ограничено его высокой линейной усадкой.

Значения коэффициента линейного термического расширения пенопластов близки к исходным значениям монолитного полимера.

Коэффициент термического расширения вычисляется по формуле [12]:

$$\alpha_t = \alpha_n + \alpha_p, \quad (2)$$

где α_n , α_p – коэффициент термического расширения полимера-основы и поправка на влияние давления газа в ячейках соответственно.

Теплостойкость и удельная теплоёмкость пенопластов не зависят от кажущейся плотности.

9. Значения коэффициента линейного термического расширения пенополистирола при различных температурах

Тип пенополистирола	$\alpha \times 10^6$, °С ⁻¹			
	30 °С	40 °С	50 °С	60 °С
ПС-1	50,5	48,8	45,3	46,5
ПС-4	61,8	61,5	61,0	59,5
ПСБ	55,2	55,0	49,2	41,4

Теплопроводность. Ячеистая структура определяющим образом влияет на теплопроводность пенопластов. В связи с наличием ячеистой структуры передача тепла в пенопласте обуславливается теплопроводностью полимерных плёнок, конвекцией газообразной фазы и излучением между стенками ячеек, т.е. теплопроводность пенопластов характеризуется эффективным коэффициентом теплопроводности. Основной вклад в коэффициент теплопроводности (λ) вносит газовая фаза, так как объёмное содержание её, например, у лёгких пенопластов достигает 97%. Теплопроводность пенопластов в направлении вспенивания плиты несколько больше, чем в перпендикулярном направлении [18, 19].

Определение коэффициента теплопроводности пенопластов может быть сделано теоретически в предположении аддитивности различных механизмов переноса тепла [1, 18, 19]:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4, \quad (3)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – вклад теплопроводности полимера-основы; газа, заполняющего ячейки; конвективной составляющей и излучения соответственно.

Значения составляющих можно вычислить с помощью моделей пористых систем [1, 18].

Теплопроводность пенополистирола снижается с уменьшением кажущейся плотности (рис. 13, а). Однако существует оптимальное значение плотности ($\rho = 20 \dots 40 \text{ кг/м}^3$), выше и ниже которого коэффициент теплопроводности увеличивается.

Увеличение влажности пенополистирола приводит к возрастанию теплопроводности (рис. 13, б). Увлажнение на 1% повышает коэффициент теплопроводности на 4%. При увлажнении до 4% пенопласта ПСБ коэффициент теплопроводности резко возрастает, а затем изменяется незначительно. В строительных расчётах рекомендуется на коэффициент теплопроводности, полученный для сухого пенополистирола, вводить поправку (обычно 10%) на его увлажнённость.

Коэффициент теплопроводности возрастает с повышением температуры (рис. 13, в). У пенопласта ПСБ до 30 °С он практически не изменяется, при 30 ... 40 °С плавно увеличивается на 8%, а после 40 °С резко возрастает. Уплотнённая корка, имеющаяся на поверхности плиты пенопласта, увеличивает стабильность коэффициента λ [36, 48].

Теплофизические характеристики пенополистирола различных марок приведены в табл. 10.

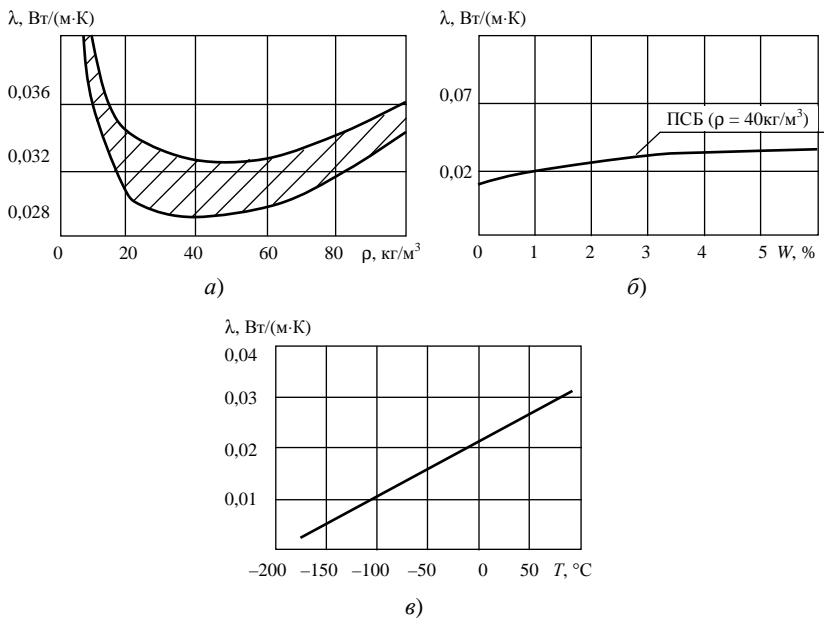


Рис. 13. Зависимости коэффициента теплопроводности пенополистирола от кажущейся плотности (а); влажности (б) и температуры (в)

10. Теплофизические характеристики пенополистирола

Тип пенополистирола	Кажущаяся плотность, кг/м ³	Рабочая температура, °С	Коэффициент теплопроводности при 20°С, Вт/(м·град)	Коэффициент линейного термического расширения $\times 10^6$, °С ⁻¹	Удельная теплоёмкость при 20°С, 10 ³ ·Дж/(кг·°С)
ПС-1	60 ... 220	65	0,032 ... 0,052	52 ... 71	—
ПС-4	30 ... 60	70	0,029 ... 0,044	62 ... 84	—
ПСБ	20 ... 60	70	0,028 ... 0,038	56 ... 68	1,47 ... 1,63
ПСБ-С	20 ... 60	70	0,028 ... 0,038	55 ... 65	—

7. ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕНОПОЛИСТИРОЛА. СТАРЕНИЕ

Климатические испытания пенопластов показали, что их атмосферостойкость близка к атмосферостойкости исходных пластмасс. При действии погодных факторов (солнечная радиация, дождь, ветер и др.) на незащищённый пеноматериал наблюдается изменение окраски и поверхностная эрозия. В случае защиты от непосредственного воздействия погодных факторов пенополистирол устойчив к климатическим воздействиям. Изменение физико-механических характеристик пенопластов в процессе атмосферного старения происходит быстрее в первые 3 – 5 лет и достигает 10 ... 30%, но затем резко замедляется [16, 18].

Длительное пребывание беспрессового пенополистирола в условиях умеренного климата (в средней полосе) существенно не изменяет его механических характеристик; при выдержке в условиях тропического климата прочностные показатели пеноматериала ухудшаются [36, 50].

Результаты испытания пенопластов в районах с умеренно холодным климатом в течение десяти лет в условиях неотапливаемого помещения показали [18]: что внешний вид образцов заметно не изменяется, изменение линейных размеров и массы не превышают 1 ... 2%, физико-механические характеристики, водопоглощение и коэффициент теплопроводности изменяются сравнительно мало. Отмечается, что определяющее влияние на стабильность пеноматериалов повышенной кажущейся плотности оказывают свойства полимера-основы, у лёгких же закрытопористых пенопластов ($\rho < 40 \text{ кг/м}^3$) – ячеистая структура.

Большое влияние на стойкость к тепловому старению (длительное воздействие повышенных температур) оказывает природа полимера-основы. В процессе длительного старения степень замкнутости ячеек и кажущаяся плотность у образцов снижаются. Разрушение стенок ячеек обусловлено как действием механического напряжения за счёт перепада давления газа внутри и снаружи ячеек, так и деструкцией полимеров. Коэффициент теплопроводности пенопластов интенсивно увеличивается на начальном этапе старения, но в дальнейшем изменяется

довольно мало. Существенное влияние на поведение пенополистиролов оказывает воздействие низких температур при продолжительном увлажнении [18].

При эксплуатации ограждающих панелей в районах с суровыми природно-климатическими условиями они подвергаются воздействию больших естественных перепадов температур. В связи с различием коэффициентов линейного расширения материалов, составляющих металлические панели с утеплителем из пенопласта, в них возникают значительные температурные напряжения, происходит разрушение пенопласта вблизи зоны склейки слоёв, что является одной из причин отслоения обшивок от заполнителя [12].

Пенополистиролы являются достаточно стойкими к воздействию атмосферных факторов. Прочностные характеристики после 5 лет экспонирования несколько понизились: предел прочности при сжатии на 5 ... 11%, при растяжении – на 17 ... 25%, изменения структуры, потери веса, эрозии не обнаружено. Отмечается некоторое повышение предела прочности при сжатии пенопласта ПСБ-С, связанное с процессами структурирования, которые наблюдаются в первые три года экспонирования, а в последующие два года преобладающими являются процессы деструкции. Для пенопластов в незащищённом виде наблюдается изменение цвета поверхностного слоя и внутригранульная эрозия. Установлено, что они нестойки к непосредственному атмосферному воздействию, но защищённые от дождя, ветра и ультрафиолета (условия, близкие к эксплуатации) – сохраняют стабильность [41].

8. ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА

В настоящее время отсутствуют унифицированные методы длительных испытаний нагруженных пенопластов. Физико-механические характеристики, определённые при кратковременных испытаниях, не могут служить критерием оценки их длительной работоспособности.

При действии длительно приложенных статических напряжений образцы пенопластов зачастую не имеют явного характера разрушения, в этих условиях развиваются деформации ползучести. Оценка влияния длительных статических напряжений на пеноматериалы зависит от вида напряжённого состояния. Если происходит квазиупругое разрушение пенопласта, то долговечность определяется по агрегативной устойчивости, при появлении повышенной деформативности – по величине предельно допустимой деформации [49, 50].

Ползучесть. В зависимости от величины действующей нагрузки деформации носят различный характер. По особенностям развития их можно условно разделить на четыре вида [49, 50]:

1. Затухание деформаций происходит сравнительно быстро (через 30 ... 60 суток). Величина деформаций не превышает 1%. Верхняя граница нагрузок составляет при различных видах напряжённого состояния 0,2 ... 0,35 от предела прочности при кратковременных испытаниях ($\sigma_{вр}$).

2. Затухающие деформации. Величина деформаций может достигать 2%, нагрузки – $(0,3 \dots 0,5) \sigma_{вр}$.

3. Установившаяся ползучесть. Не обнаруживается тенденция перехода к затухающим деформациям, при нагрузках – $(0,5 \dots 0,7) \sigma_{вр}$.

4. Нагрузки $(0,7 \dots 0,9) \sigma_{вр}$ – деформации такого вида быстро разрушают материал.

Однако такая классификация носит условный характер и в некоторых случаях деформации одного и того же образца могут быть отнесены к различным видам [49]. В [7, 10] при повышенной деформативности пенопласта определение коэффициента долговременного сопротивления и длительной прочности проводится исходя из величины затухающих деформаций, не превышающих заданной величины. Допустимая деформация определяется из значений характерных точек на диаграммах деформирования пенопластов, если $\varepsilon > [\varepsilon_{кр}]$ – то эта величина принимается за величину длительной прочности ($\sigma_{дл}$), если же

$\varepsilon < [\varepsilon_{кр}]$, то коэффициент долговременного сопротивления оценивается по уровню соответствующей асимптоты кривой длительного деформирования. Рекомендовано определять упругие характеристики при различных видах напряжённого состояния пенопластов в диапазоне нагрузок $(0,2 \dots 0,5) \sigma_{вр}$.

Деформации ползучести в большей мере проявляются под действием сжимающих и сдвигающих напряжений. При действии таких статических напряжений пенопласты не имеют явного характера разрушения, ведущего к потере агрегативной устойчивости материала. Наблюдается постепенное нарастание деформаций ползучести, отсутствует период резкого увеличения деформативности, который мог бы быть принят за начало явного разрушения материала. Кроме того, деформируемость пенопластов во времени существенно зависит от величины приложенных напряжений. В области малых сжимающих напряжений ячеистые структуры пенопластов деформируются незначительно. Обусловлена эта деформация сжатием ячеек структуры. При действии напряжений близких к критическим, в пенопластах имеют место значительные деформации, вызванные изгибными деформациями полимерных плёнок, образующих стенки ячеек структуры [49, 50].

Действие повторных (с периодическим "отдыхом") нагрузок на развитие деформации ползучести пенополистирола является более невыгодным по сравнению с режимом постоянной нагрузки. По мере увеличения циклов периодического нагружения наблюдается увеличение доли остаточных деформаций и уменьшение упругих [36].

В [7, 10] установлено, что модули упругости и сдвига при длительных испытаниях составляют $(0,3 \dots 0,5)$ от E и G , определённых при кратковременных испытаниях.

По результатам длительных испытаний в [10] определены коэффициенты долговременного сопротивления при растяжении K_p , сжатии K_c и сдвиге $K_{сд}$ пенопластов. Соотношение этих коэффициентов приведено в табл. 11. При растяжении коэффициенты долговременной прочности определены из условия длительной прочности, а при сжатии и сдвиге – из условия деформативности.

Характер кривых ползучести при длительном изгибе такой же, как и при других напряжённых состояниях.

Пример кривых ползучести для пенополистирола ПСБ-С при различных видах нагрузки приведён на рис. 14 [33, 44, 45].

С повышением температуры скорость развития деформаций ползучести пенопластов возрастает [49, 50].

11. Соотношение коэффициентов долговременного сопротивления пенополистиролов

Тип пенопласта	Кажущаяся плотность, кг/м ³	Соотношение коэффициентов долговременного сопротивления
ПСБ-С	20 ... 60	$K_p > K_c \sim K_{сд}$
ПСБ	20 ... 60	$K_p > K_c \sim K_{сд}$
ПС-1	100	$K_p > K_c > K_{сд}$
ПС-4	40	$K_p \sim K_c \sim K_{сд}$

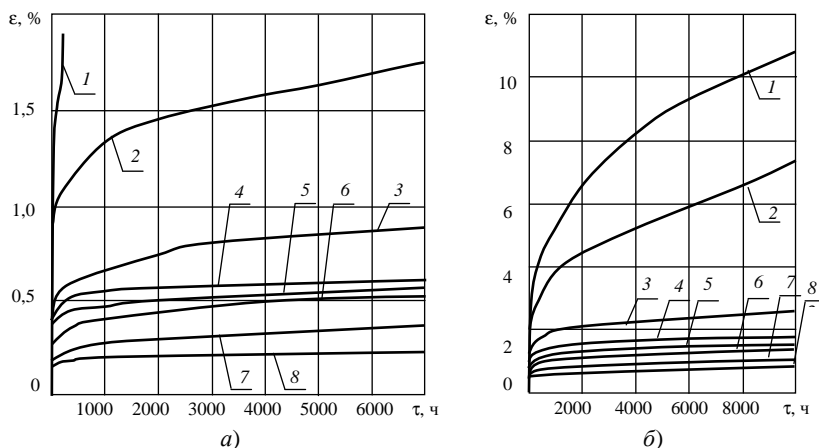


Рис. 14. Деформации ползучести образцов пенополистирола ПСБ с кажущейся плотностью 35 ... 40 кг/м³:

a – при растяжении (от $\sigma_{вр}$);

l – 0,8; 2 – 0,7; 3 – 0,6; 4 – 0,5; 5 – 0,4; 6 – 0,35; 7 – 0,25; 8 – 0,1

b – при сжатии (от $\sigma_{вр}$);

l – 0,5; 2 – 0,45; 3 – 0,35; 4 – 0,3; 5 – 0,25; 6 – 0,2; 7 – 0,15; 8 – 0,1

При испытаниях длительно действующими сжимающими нагрузками величины кратковременной прочности $\sigma_{вр}$ и критического напряжения $\sigma_{кр}$ имеют условный характер. В связи с отсутствием хрупкого разрушения образцов под длительной нагрузкой в качестве основной характеристики кратковременной прочности рекомендуют принимать $\sigma_{кр}$, а не $\sigma_{вр}$ [12]. Образцы, напряжения в которых превосходят $\sigma_{кр}$, деформируются сразу после приложения нагрузки до недопустимо больших величин. По результатам длительных испытаний построены зависимости различных деформаций от напряжения и продолжительности его действия (линии равных деформаций) (рис. 15).

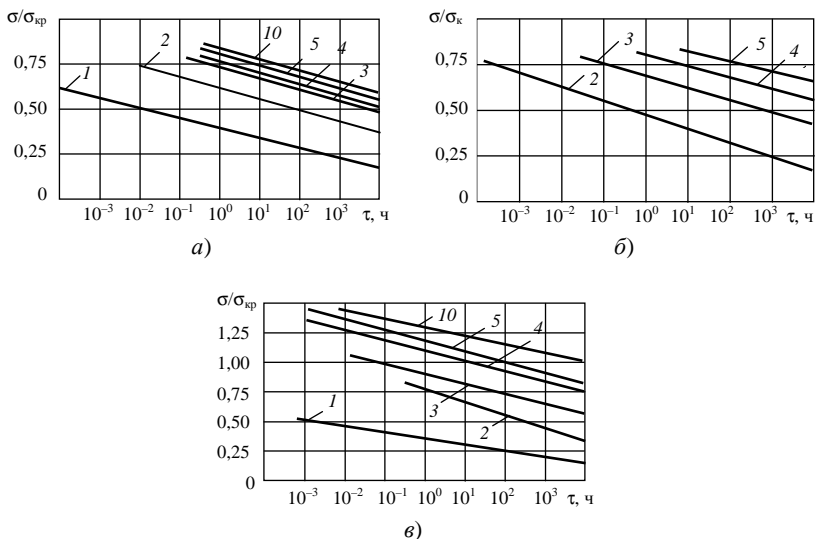


Рис. 15. Зависимости деформации пенополистирола от напряжения и продолжительности действия нагрузки:

a – ПС-1; *б* – ПС-4; *в* – ПСБ.

Цифры на кривых указывают относительную деформацию в %

В координатах $\sigma/\sigma_{кр} - \lg \tau$ зависимости близки к прямым. Принимая за начало отсчёта время, равное 1 ч испытаний, уравнение прямых равных деформаций можно записать следующим образом [56]:

$$\sigma_{\tau i} = \sigma_{1i} - A_i \lg \tau, \quad (4)$$

где $\sigma_{\tau i}$ – напряжение, при котором в образце за время τ создаётся деформация, равная i ; σ_{1i} – напряжение, при котором деформация в 1% достигается через 1 ч; A_i – угловой коэффициент соответствующего графика (рис. 16).

При постоянном напряжении полная деформация складывается из мгновенной упругой, которая не зависит от времени и определяется при одноосном напряжённом состоянии, и пластической. В основу определения расчётных характеристик положены величины предельно-допустимых деформаций, определённые с учётом их развития в течение заданного срока эксплуатации. Прочностные характеристики определяются как:

кратковременные = пределу прочности;
длительные = кратковременные × коэффициенты
длительного сопротивления.

Для ускоренного определения ползучести пенопластов возможно использовать экспресс-методы: температурно-временной; напряжённно-временной и плотностно-временной аналогий [16, 18]. Недостатком методов является то, что они действуют в определённых пределах прочности, температуры и плотности. Принимается, что макроструктура в процессе срока службы не изменяется.

Долговечность. На рисунке 16 приведены диаграммы, характеризующие долговременную прочность пенополистиролов в условиях растяжения. Графики построены в координатах $\lg t - \sigma$, где t – время до разрушения образца (долговечность). Экстраполяция зависимости $\lg t(\sigma)$ для пенополистиролов различных плотностей при постоянной температуре на ось $\lg t$ дала сходимость в одной точке, что соответствует представлениям о зависимости долговечности от напряжения при изменении структуры материала. Отмечается отклонение от линейности зависимости $\lg t(\sigma)$ с повышением температуры. Явление хрупкого разрушения становится менее вероятным, так как увеличивается вынужденно-эластическая деформация [12].

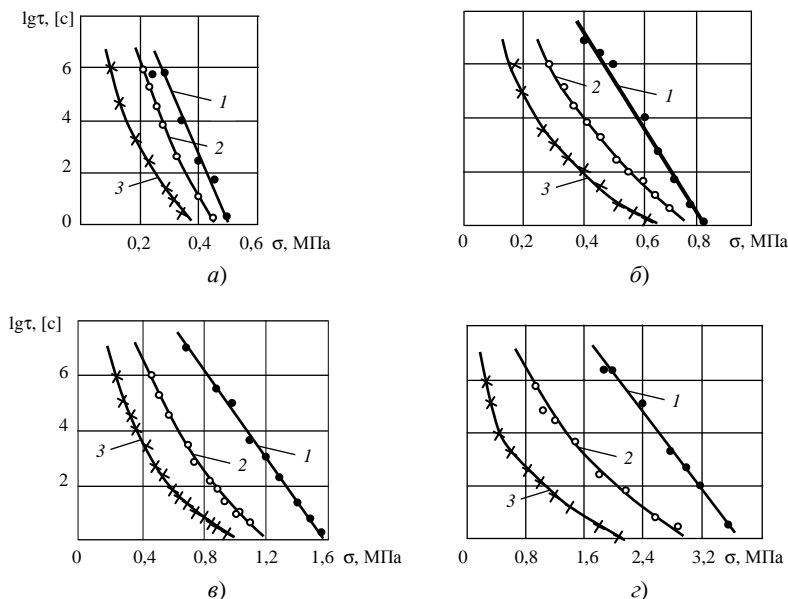


Рис. 16. Долговечность пенополистиролов различной кажущейся плотности при растяжении:

$a - 31 \dots 34 \text{ кг/м}^3$; $б - 42 \dots 46 \text{ кг/м}^3$; $в - 62 \dots 66 \text{ кг/м}^3$; $г - 157 \dots 164 \text{ кг/м}^3$;
 $1 - 23^\circ\text{C}$; $2 - 60^\circ\text{C}$; $3 - 80^\circ\text{C}$

В [36, 39, 49] отмечается, что исследование долговечности пенополистирола возможно с точки зрения термофлуктуационной концепции прочности, основанной на том, что процесс разрушения материала носит кинетический характер и осуществляется путём преодоления взаимодействующими частицами энергетического барьера в результате тепловых флуктуаций. При постоянной температуре и напряжении зависимость выражается уравнением [56]:

$$\tau = A \exp(-\beta \sigma), \quad (5)$$

где τ – долговечность образца; $A = \tau_0 \exp(U/kT)$; $U = U_0 - \gamma\sigma$ – энергия активации (разрыва) связей между кинетическими единицами; σ – постоянное напряжение; k – постоянная Больцмана; γ – структурный коэффициент, определяющий эффективность механического поля; τ_0 – период колебания кинетических единиц.

Величины коэффициентов уравнения 4 приведены в табл. 12 [39].

С учётом температуры формула имеет вид [43]:

$$\tau = \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma)/RT]. \quad (6)$$

Необходимо отметить, что при применении кинетической концепции разрушения твёрдых тел в рассмотренных работах [49, 56] не учитывается смещение полюса (τ_0 определяют не из графиков, а принимают равным 10^{-13} с). Значения физических констант уравнения Журкова (5) не соответствуют графикам, показанным на рис. 17.

Авторами были перестроены эти зависимости в координаты $\lg\tau - 10^3/T$ (см. рис. 18).

12. Параметры временной зависимости прочности пенопластов

Тип пенопласта	Кажущаяся плотность, кг/м ³	Условные значения параметров временной зависимости прочности при растяжении пенопластов			
		τ_0 , с	σ , кгс/см ²	U_0 , кг·см	γ , см ³
ПСБ-С	60	10^{-12}	2,68	$9,2 \cdot 10^{-19}$	$3,4 \cdot 10^{-19}$
ПСБ	40	10^{-12}	2,56	$4,9 \cdot 10^{-19}$	$1,9 \cdot 10^{-19}$
ПС-1	100	10^{-12}	2,38	$5,7 \cdot 10^{-19}$	$2,4 \cdot 10^{-19}$
ПС-4	60	10^{-12}	2,60	$3,6 \cdot 10^{-19}$	$1,4 \cdot 10^{-19}$

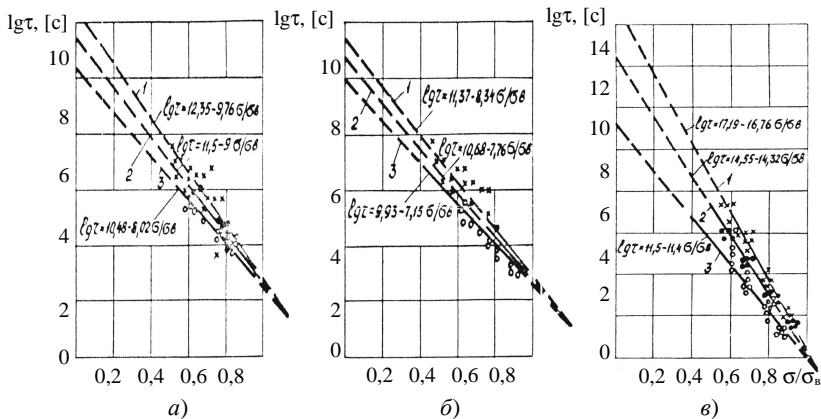


Рис. 17. Корреляционные зависимости долговечности при повышенных температурах для пенопластов ПСБ (а); ПСБ-С (б); ПС-4 (в):
 1 – 18°C; 2 – 40°C; 3 – 60°C

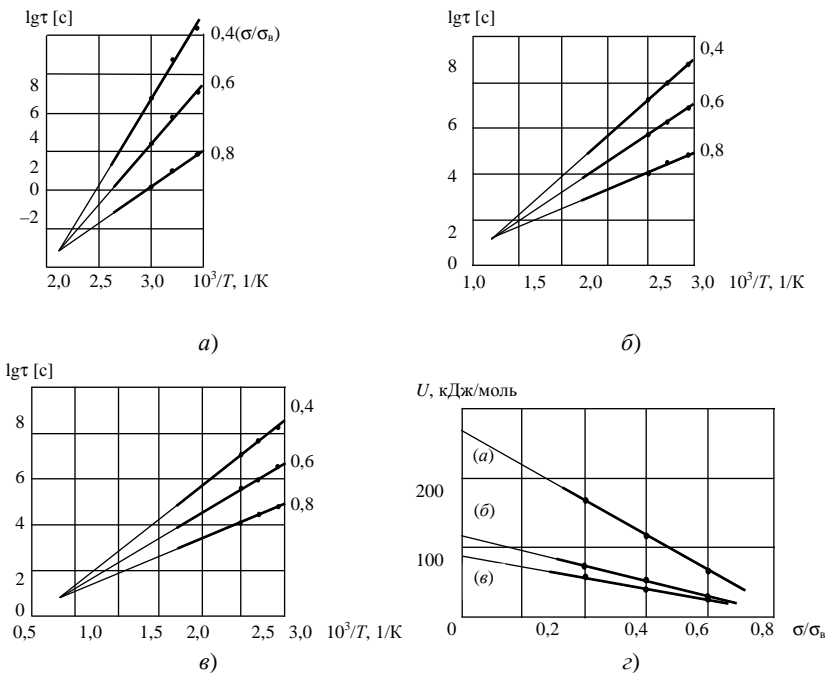


Рис. 18. Зависимости времени до разрушения от обратной температуры [42] и эффективной энергии активации от напряжения [63] (z):
 а – ПС-4 ($\rho = 60 \text{ кг/м}^3$); б – ПСБ ($\rho = 40 \text{ кг/м}^3$); в – ПСБ ($\rho = 60 \text{ кг/м}^3$)

13. Значения констант уравнения (6), определённые из зависимостей, показанных на рисунках 17 и 18

Тип пенополистирола	Физические константы			
	$\tau_T, \text{с}$	$10^3/T_T, 1/\text{K}$	$U_0, \text{кДж/моль}$	$\gamma, \text{кДж/(моль}\cdot\text{МПа)}$
ПС-4, $\rho = 60 \text{ кг/м}^3$	$10^{-1,2}$	2,12	282	251,1
ПСБ, $\rho = 40 \text{ кг/м}^3$	$10^{+1,2}$	1,2	116	96,6
ПСБ-С, $\rho = 60 \text{ кг/м}^3$	$10^{+1,0}$	0,8	86	77,3

На рисунке 18 наблюдается смещение полюса. В этом случае, согласно [47, 63], уравнение (5) не работает. Появляется четвёртая константа в уравнении Журкова – величина смещения температуры полюса (6), которая показывает, что энергия активации снижается линейно не только с напряжением, но и с температурой, т.е. существует предельная температура для данного материала. Из зависимостей $U - \sigma$ были вычислены значения максимальной энергии активации U_0 для пенопластов (табл. 13 и рис. 18). Из таблицы видно, что величины констант не соответствуют значениям табл. 12. Кроме того, размерность параметров в табл. 12 не соответствует физическому смыслу констант уравнения (2).

Формула (5) с учётом смещения полюса:

$$\tau = \tau_T \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_T} \right) \right],$$

где $1/T_T$ – величина смещения температуры полюса (подробнее см. в гл. 10).

В ряде работ указывается, что кинетическая концепция для пенопластов имеет условный характер, однако проведённые исследования [12] показывают, что эти высказывания не соответствуют действительности.

В работе [15, 26] была сделана попытка установить соответствие характерных точек для кривых ползучести и диаграммы сжатия на примере пенополиуретанов. Отмечается, что на диаграмме сжатия для

полимеров и в некоторых случаях для пенопластов имеется отрезок, где наблюдается резкий спад напряжения. В этом месте находится величина критической деформации (переход через предел вынужденной эластичности). Однако выше отмечалось, что такого спада напряжения не наблюдается для пенополистиролов низкой кажущейся плотности, так как не происходит хрупкого разрушения материала, и величина критической деформации носит условный характер. Это подтверждается построением кривых ползучести пенополистирола при разных напряжениях и времени его действия [15, 26]. Поэтому при описании процессов деформирования формулой Журкова константы, входящие в него, приобретают иной физический смысл, нежели при разрушении.

Применение кривых ползучести для определения долговременных характеристик пенопластов не позволяет учитывать изменение структуры материала в процессе испытаний. Значения нагрузок принимают равными значению от 0,5 до 0,95 величины $\sigma_{вр}$, которая является условной и находится из диаграммы "напряжение – деформация" при кратковременных испытаниях. Но, как говорилось выше, её величина зависит от скорости приложения нагрузки. Кинетическая концепция же рассматривает процесс свершения критического события как процесс накопления повреждений в теле под действием теплового движения атомов, являющегося решающим фактором свершения критического события, а нагрузка лишь ускоряет этот процесс. Кроме того, при действии нагрузок низкой интенсивности ($0,1 \dots 0,4 \sigma_{вр}$) не может быть линейной зависимости, так как связи успевают рекомбинировать, согласно кинетической концепции, происходит загиб на зависимости логарифма времени от напряжения.

Поскольку долговечность строительных конструкций зависит в первую очередь от срока службы (долговечности) теплоизоляционного материала, то в следующей главе нами предложено определить эту характеристику с помощью кинетической концепции прочности твердых тел, предложенной в [56] и развитой [47, 63].

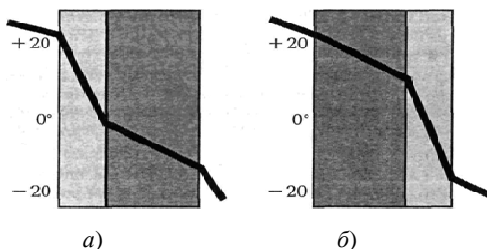
9. ПРИМЕНЕНИЕ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА В ОГРАЖДАЮЩИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ И ДОРОЖНЫХ ОДЕЖДАХ

Для обеспечения требований норм СНиП [71] и снижения расхода тепловой энергии необходимо осуществлять дополнительную теплоизоляцию наружных стен реконструируемых зданий и применение многослойных ограждающих конструкций с использованием эффективных утеплителей для вновь строящихся.

В странах Европы очень много делают для энергосбережения в жилищно-коммунальном хозяйстве. Там эта проблема является одной из приоритетных, и решение её возведено в ранг государственной политики. Возникла даже специальная подотрасль, занимающаяся утеплением зданий. За последние 20 лет расходы на отопление за рубежом сократились на 40 ... 50% и составляют около 45 ... 50 кВт ч/м² в год. В России этот показатель равен 80 ... 120 кВт ч/м² в год. Из них теплотери через стены составляют 42 ... 49%, через окна – 32 ... 35%, через подвальные и чердачные перекрытия – 11 ... 18%, через двери – 5 ... 8% [81, 89].

Крепление утеплителя возможно как с внутренней стороны стены, так и с наружной. Тепловые свойства стены в обоих случаях будут очень разными. При установке теплоизоляционного слоя с внутренней стороны наружная стена находится в зоне холодного воздуха, не прогревается и подвергается переменным циклам замораживания и оттаивания.

Утеплитель значительно легче камня и свободно пропускает пар, что приводит к скапливанию влаги в толще стены на границе с утеплителем, т.е. выпадает конденсат, который неблагоприятно воздействует на стену и на утеплитель. Это приводит к сокращению срока службы всей конструкции. Резко снижаются теплосберегающие свойства утеплителя [84] (рис 19, а).



**Рис. 19. Распределение температуры
при различном расположении утеплителя:**
а – изнутри; б – снаружи

При расположении теплоизоляционного слоя снаружи стена имеет лучшие характеристики. Паропроницаемый утеплитель не даёт скапливаться влаге и обеспечивает естественную просушку стены, так как конденсат образуется внутри него. Несущая стена остаётся сухой и тёплой – утеплитель надёжно защищает её от переменных температурных циклов. Сам утеплитель не увлажняется (если защищён снаружи). Тёплая стена плюс естественная диффузия водяных паров существенно сказываются на долговечности всей конструкции.

Достоинства и недостатки обоих способов указаны в табл. 14 [82, 84, 88, 97]. В целом в строительной практике широко применяется наружный способ утепления стен.

14. Характеристики способов утепления

Способ утепления	Достоинства	Недостатки
Утепление изнутри	Поэтапный и круглогодичный циклы работ; возможность применения большого количества утеплителя; теплоизоляцию не нужно защищать от атмосферного воздействия	Образование конденсата (увлажнение) – на внутренней поверхности стены; необходимость борьбы с увлажнением конструкции; снижение тепловых характеристик стены; необходимость выселения жильцов во время ремонтных работ; сокращение жилой площади
Утепление снаружи	Улучшенный влажностно-температурный режим стены; более интенсивная просушка материала стены и соответственно высокие теплозащитные свойства; утеплитель лучше защищён от возгорания; возможность проведения работ без выселения; повышение прочности и несущей способности стены; возможность обновления фасада здания; повышение теплозащиты без уменьшения жилой площади Исключение мостиков холода	Сезонность выполнения работ; изменение внешнего вида фасада; необходимость защиты теплоизоляции от атмосферных воздействий; сложность устройства примыкания утеплителя к окнам и дверям; возможно разрушение порывами ветра

При соблюдении технологии производства работ и обеспечении необходимого качества система утепленного фасада будет служить в течение 25 – 30 лет.

При выборе утеплителя важно учесть показатель водопоглощения. К сожалению, не все утеплители (особенно отечественные) имеют достаточную стойкость по этому важнейшему показателю. При увеличении влажности утеплителя на 3 ... 4% теплотехнические свойства всей стены уменьшаются до 50%, и они плохо удерживают тепло.

Система наружной теплоизоляции позволяет экономить расход энергоносителей на 25 ... 50%, обеспечивает защиту фасада и дополнительную звукоизоляцию. В России ежегодно утепляется 200 тыс. м² поверхности. Для сравнения: в Германии эта цифра превышает 30 млн. м² в год [93].

В целом технические решения теплозащиты можно классифицировать по трём основным признакам: по месту расположения теплоизоляции (снаружи, внутри или комбинированный метод), по виду материала утеплителя и по виду материала защитного слоя (мокрая отделка – штукатурные растворы или сухая – облицовочные плиты и панели).

Расчёт толщины утеплителя в таких конструкциях производится согласно [69, 72]. При расчёте учитываются в первую очередь теплофизические свойства утеплителя (его теплопроводность и термическое сопротивление), а уже затем его прочностные и деформационные свойства. Согласно [91] по теплофизическим качествам лидирующую позицию занимает пенополистирол: при одинаковом термическом сопротивлении он имеет наименьшую толщину (рис. 20).

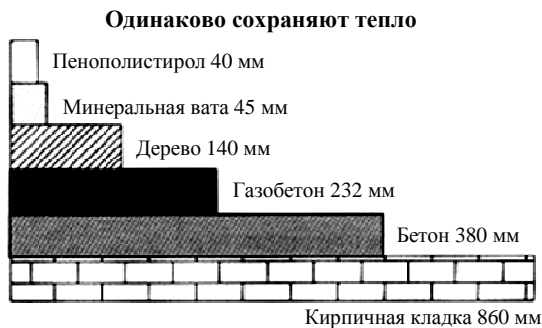


Рис. 20. Соотношение толщин различных материалов при одинаковом термическом сопротивлении

Утепление наружных конструкций. Наиболее перспективным способом повышения теплозащиты как вновь строящихся, так и реконструируемых зданий является наружная теплоизоляция стен. Как было отмечено выше, этот вариант обладает существенными достоинствами: отсутствие "мостиков холода"; возможность защитить стыки крупнопанельных зданий от протечек; не требуется устройство пароизоляционного слоя; не уменьшается площадь помещений; отсутствует необходимость вскрытия полов; возможность создания нового архитектурно-художественного облика здания; защищает стену от переменного замерзания и оттаивания и других атмосферных воздействий.

Существуют два основных способа утепления стен с наружной стороны: "вентилируемый фасад" и "мокрая технология". Пример технологии производства работ и требования к материалам "мокрого" способа изложены в [73]. "Мокрый" способ означает облицовку фасада плитами утеплителя с последующим оштукатуриванием. Вначале стену подготавливают специальными очищающими и грунтовочными составами, потом приклеивают плиты утеплителя, укрывают армирующей сеткой и оштукатуривают в несколько слоёв. Стены одеваются в своеобразную "шубу". У такого типа утепления стен несколько названий (вариантов устройства): "HECK", "TexColor" (Германия), "Dryvit", "Senergy" (США), "Ceresit" (Польша), "Шубаплюс" (Россия) и т.д. В каждом из этих методов выполняется крепление на поверхности стены эффективного утеплителя и его защита от внешних воздействий. Применение "вентилируемого фасада" означает устройство особой конструкции, состоящей из материалов облицовки (панелей, плит или листовых материалов), утеплителя и несущей конструкции, которая, в свою очередь, крепится к стене таким образом, чтобы между защитно-декоративным покрытием и стеной оставался воздушный промежуток. В ряде случаев для дополнительного утепления наружных конструкций между стеной и облицовкой фасадной системы предусматривают установку теплоизоляционного слоя – в этом случае зазор оставляется между облицовкой и теплоизоляцией. Сама воздушная прослойка оказывается настолько эффективной в защите от скопления конденсата, приводящего к ухудшению теплоизоляции и грибковым заболеваниям стен, что долговечность ограждающей стены существенно возрастает. Кроме того, нет необходимости в периодическом обновлении и ремонте её поверхности. А частоту обслуживания фасада определяют фасадные панели, долговечность которых служит основой сроков эксплуатации всей конструкции, причём возможность замены облицовки делает вентфасад ещё более долговечным.

Закрепление утеплителя на стенах при устройстве дополнительной теплозащиты может осуществляться следующими способами: навешиванием (на установленные заранее анкеры или с креплением его

дубелями по месту); закреплением на направляющих (установка теплоизоляционного материала между направляющими, прижатие к направляющим, постановкой на направляющие); клеевым креплением (полимерными клеями или растворами); клеевым креплением с навешиванием. При наклеивании плитного утеплителя клеевой состав должен обладать хорошей адгезионной способностью, как для поверхности утепляемой стены, так и для плитного утеплителя.

При устройстве дополнительной теплоизоляции с наружной стороны стены возможно применение в качестве защитного слоя по утеплителю облицовочных плит (рис. 21, а). В таких системах в качестве защитно-декоративного слоя используют различные листы и панели на основе гипса, дерева (ДВП, ДСП), пластика, магнетитовые плиты, керамогранитные плиты и т.д.

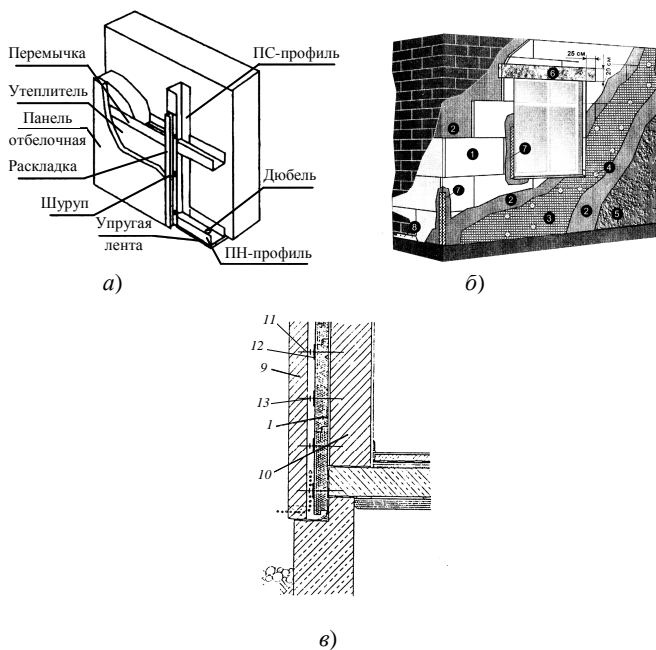


Рис. 21. Примеры теплозащиты стены

комплексными системами фирмы "Тиги – Клауф" [61]:

- а – с помощью облицовочных плит; б – с помощью штукатурных растворов;
- в – промежуточная теплоизоляция наружных стен: 1 – утеплитель;
- 2 – клеей состав; 3 – армирующая стеклосетка; 4 – дюбель винтовой;
- 5 – декоративная штукатурка; 6 – рассечка из минеральной ваты;
- 7 – профиль для защиты углов; 8 – опорный профиль; 9 – облицовочная кладка из кирпича; 10 – конструктивная наружная стена; 11 – проволочный анкер; 12 – прижимная шайба; 13 – влагозадерживающая прокладка

Крепление этого слоя осуществляется к кронштейнам или направляющим, между которыми укладывается теплоизоляция. Устройство системы утепления осуществляется с воздушным вентилируемым зазором между утеплителем и облицовочным слоем.

Наиболее дешёвым является вариант наружного утепления с оштукатуриванием фасадных поверхностей. Система дополнительного утепления в зависимости от толщины фасадных штукатурных слоёв бывает с жёсткими и гибкими крепёжными элементами, с помощью которых закрепляют плиты утеплителя к существующей стене. Системе утепления с жёсткими крепёжными элементами используют при малых толщинах штукатурных слоёв (8 ... 12 мм). Такая система предусматривает следующую технологию устройства: наклеивание плит утеплителя; механическое закрепление плит крепёжными элементами; нанесение базового слоя штукатурки, с втапливаемой в него армирующей полимерной сеткой или стеклосеткой из щёлочестойкого стекла; устройство промежуточного грунтовочного и отделочного слоёв. При значительных толщинах штукатурных слоёв (20 ... 30 мм – для обеспечения необходимой пожаробезопасности) применяют гибкие крепёжные элементы. Такая система включает следующую технологию устройства: плиты утеплителя с горизонтальным смещением швов закрепляются насухо к утепляемой стене, путём накалывания на гибкие кронштейны; фиксация с помощью армирующей металлической сетки с размером ячеек 20×20 мм (из стали с гальваническим оцинкованием поверхности) и шпилек (из коррозионностойкой стали); нанесение штукатурных слоёв за три раза. Пример показан на рис. 21, б. Как вариант может использоваться промежуточная изоляция наружных стен (рис. 21, в). При этом полистирольные плиты крепятся к внешней поверхности несущей стены с помощью металлических дюбелей. Облицовочным слоем служит кладка из пустотелого кирпича [9, 21, 35, 38, 60, 61, 83].

Фирма "Сармат" Республики Беларусь разработала технологию теплоизоляции наружных стен зданий – "Термошуба" (утеплитель наклеивается на наружную стену и закрепляется дюбелями) [9, 22, 23, 59]. В [13] проводилось комплексное натурное обследование шести жилых зданий, эксплуатировавшихся 1 – 4 года после теплоизоляции фасадов по данной системе. По результатам обследования делается вывод, что вопрос о долговечности данной системы остаётся открытым, и можно будет делать окончательные выводы после 10 – 15 лет эксплуатации [13].

Особый интерес представляет система навесных фасадов "Haacke IsolierKlinker" (рис. 22) разработанная специалистами фирмы "НААСКЕ+НААСКЕ GmbH+Co KG" (Германия) как материал высоких энергосберегающих технологий, который по своим конструктивным и технологическим особенностям не имеет себе равных среди изоляционно-облицовочных материалов. Основу элементов системы "Haacke IsolierKlinker" составляет гранулированный пенополистирол (стиропор) и керамический клинкер, а также специальные буксы для крепления, заформованные в пенополистирол. Пенополистирол, составляющий основу элемента "Haacke IsolierKlinker", является трудновозгораемым теплоизоляционным материалом (коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,032 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, фирмы "BASF" высокой плотности более 45 кг/м^3), который в процессе производства формируется в специальных технологических формах одновременно с керамическими плитками (клинкером) и крепёжными буксами. Полученный материал составляет единое целое и после двухнедельной технологической выдержки готов для применения в строительстве. Отсутствие при производстве клеевых процессов обеспечивает высокую морозостойкость элементов. Особая зубчатая форма материала, а также высокая точность сопрягаемых панелей, специальные угловые и оконные элементы обеспечивают идеальную тепло-, шумо- и влагоизоляцию.

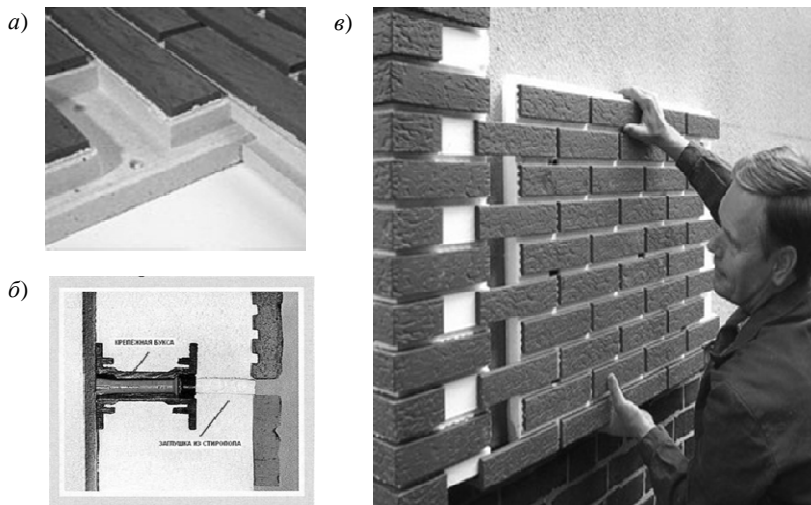


Рис. 22. Система "Haacke IsolierKlinker":

- а* – керамическое покрытие на основе из пенополистирола;
- б* – устройство крепёжного букса; *в* – монтаж панели

Известно, что слабым местом практически всех навесных теплоизоляционных панелей является их крепление к несущей конструкции, будь то стена или каркас, по причине возникновения механических напряжений внутри изоляционного материала. В системе "Haacke IsolierKlinker" используются специальные крепёжные буксы, которые заформованы в элементы ещё при производстве и позволяют не только надёжно крепить материал к стене, не создавая механических напряжений, но и устранить "мостик холода", так как после крепления панели, головки шурупов закрываются специальными пробками из пенополистирола (рис. 22, б).

После окончания монтажа стыки между клинкерными плитками затираются специальным минеральным раствором на цементной основе, что дополнительно усиливает наружную поверхность панели и придаёт вид высококачественной кирпичной кладки [92, 97].

Внутреннее утепление стен. Расположение теплоизоляционного материала на внутренней поверхности наружной стены существующих здания часто является единственно возможным, так как теплоизоляция может быть произведена не во всех, а лишь в некоторых помещениях здания; производство работ по устройству теплозащиты может производиться в любое время года; не меняется облик зданий. Данный способ утепления часто применяют в зданиях со сложными в архитектурном плане фасадами, представляющими художественную или историческую ценность.

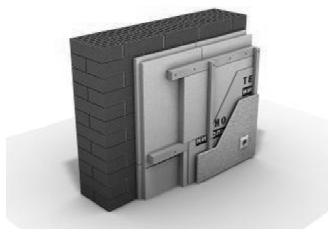
К сожалению, утепление стен с внутренней стороны имеет два весьма существенных недостатка. Один из них – это уменьшение площади помещения за счёт увеличения толщины стены. Другой недостаток связан с тем, что массивная, хорошо аккумулирующая тепло часть стены (например, из кирпича) в результате оказывается в зоне низких температур. Это резко снижает тепловую инерцию ограждающей конструкции, что в значительной степени ухудшает климат в помещении. Как уже говорилось выше, температура ограждающей конструкции за слоем утеплителя значительно снижается. Поэтому в зимнее время водяной пар, образующийся в помещении, и благодаря разности парциальных давлений диффундирующий наружу, неизбежно конденсируется за слоем утепления на внутренней поверхности массивной стены (рис. 20, а).

Сконденсировавшаяся и накопившаяся за зимний период влага не может быть выведена наружу даже летом, что приводит к прогрессирующему отсыреванию стен и развитию микроорганизмов (ухудшению санитарно-гигиенических показателей помещения). При этом "точка росы" блуждает на внутренней границе стены и теплоизоляции.

Если между ними есть хоть малейший зазор, то туда будет поступать влага из помещения и, замерзая, будет разрушать клеевой слой, увеличивая зазор. Применение в этом случае водонепроницаемых утеплителей недопустимо. В этом плане примечателен опыт Финляндии. Всем известны легкие финские домики, в которых тонкая несущая стена из дерева утепляется изнутри плитами из минерального волокна. В процессе эксплуатации это приводит к переувлажнению дерева, заражению его грибками, плесенью, а также повышению влажности в жилых помещениях даже в летний период [92].

У жителей этих домиков резко возрастает количество астматических заболеваний. Эти проблемы привели к тому, что в Финляндии были снесены миллионы квадратных метров подобного жилья. Другой недостаток связан с тем, что перегородки и перекрытия, жёстко связанные с несущей стеной и обычно не имеющие отсекающих теплоизолирующих вкладышей, образуют по каркасу здания многочисленные тепловые мостики. Поэтому, чтобы теплотери с единицы площади при утеплении изнутри были равны теплотериям при утеплении снаружи, толщина плиты должна быть не менее 50 мм. Очевидно, что при этом теряется часть полезной площади внутренних помещений. Таким образом, на утепление изнутри можно идти только тогда, когда невозможно это сделать снаружи (исторические памятники со сложным архитектурным рельефом), или когда это экономически целесообразно.

В [71, п. 7.2.2] записано: "Внутреннее утепление наружных стен допускается выполнять в отдельных квартирах многоэтажных зданий, к сохранности фасадов которых предъявляются особые требования органов государственного управления архитектуры и градостроительной деятельности. При этом должны быть разработаны конструктивные мероприятия, исключающие выпадение конденсата на стыке утепляющих слоёв и материала стены, в местах пересечения утепляющего слоя с плитами перекрытий и внутренними поперечными стенами, а также на гранях проёмов, что должно подтверждаться расчётом температурных полей".



**Рис. 23. Система
утепления фасада здания
изнутри помещения
TN-CLINKER inside**

В этом случае возможно применить эффективную конструкцию утепления с использованием экструзионного пенополистирола. Примером такой конструкции является TN-CLINKER inside – система утепления фасада здания изнутри помещения (рис. 23) [94].

При устройстве данной системы теплоизоляционные плиты экструзионного пенополистирола прижимаются к стене деревянными брусками, пространство между брусками тоже заполняется экструзионным пенополистиролом. Затем крепится пароизоляционная плёнка. Очень важно проклеить все нахлёсты плёнок между собой и примыкание плёнки к ограждающим конструкциям. Плёнка дополнительно прижимается рейками, по которым выполняется внутренняя отделка помещения.

Достоинства системы:

- возможность работы в любых погодных условиях;
- высокая скорость монтажа;
- удобная технология проведения работ;
- низкая стоимость строительства.

Слоистые ограждающие конструкции. Помимо дополнительного утепления стен разрабатываются также эффективные слоистые (двух-, трёх- и четырёхслойные) ограждающие конструкции с утеплителями из пенополистирольных плит для вновь строящихся зданий. Создание таких конструкций может осуществляться следующими технологическими приёмами: изготовлением изделий в заводских условиях; возведением стен в условиях строительной площадки в монолитном варианте с несъёмной опалубкой; кладкой стен из мелкоштучных элементов.

Примером такой конструкции служат дома, построенные по технологии "СтройТермо" (рис. 24) [9, 30, 90]. Стена дома по строительной технологии "СтройТермо" состоит из четырёх слоёв: 1 – свехпрочный бетон – служит облицовкой дома; 2 – пенополистирол – выполняет функцию утеплителя и несъёмной опалубки; 3 – железобетон – создаёт монолитную конструкцию дома; 4 – цементно-стружечная плита (ЦСП) – является второй стороной несъёмной опалубки и внутренней стеной дома.

В заводских условиях изготавливают трёхслойные железобетонные панели со средним слоем из пенополистирола различной кажущейся плотности с жёсткими (в виде сплошных армированных рёбер или в виде дискретных связей – армированных бетонных шпонок) или гибкими связями (в виде арматурной стали с антикоррозионным покрытием). Трёхслойные бетонные панели применяются в жилищном строительстве приблизительно с конца 1970-х гг. вплоть до настоящего времени.

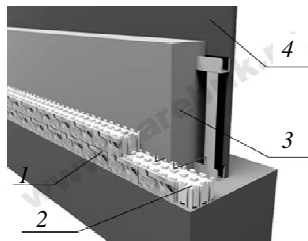


Рис. 24. Утепление стены по технологии "СтройТермо"

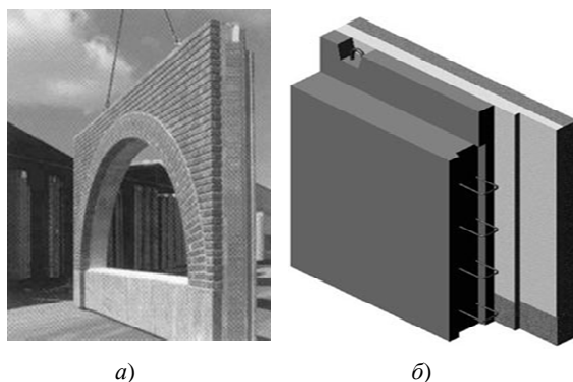


Рис. 25. Трёхслойные железобетонные панели:
a – фасадная панель; *б* – самонесущая панель

Трёхслойные панели имеют: внутренний несущий слой из железобетона толщиной 80 ... 100 мм; наружный слой из тяжёлого или лёгкого бетона толщиной 70 ... 100 мм; утепляющий внутренний слой из эффективного жёсткого утеплителя (как правило – жёсткого пенополистирола).

Лицевая сторона таких панелей может включать в себя фактурную фасадную отделку (например, мелкой керамической плиткой), формуемую вместе с панелью в заводских условиях. Толщина утепляющего слоя принимается в соответствии с теплотехническим расчётом, согласно [71, 73]. Пример такой панели приведён на рис. 25 [87].

Изготовление конструкций в несъёмной опалубке из пенополистирола осуществляется на строительной площадке. Возведение монолитных трёхслойных стен в вертикальной опалубке состоит из следующих технологических операций: монтаж опалубки; установка и закрепление блоков утеплителя в ней; бетонирование одновременно внутреннего и наружного слоёв лёгким или тяжёлым бетоном. Слои между собой скрепляют гибкими (устраивают в виде стержней, проходящих сквозь утеплитель) или жёсткими (сплошные – вертикальные и горизонтальные или дискретные – в уровне перекрытий из монолитного железобетона) связями [33, 57, 58].

Возможно изготовление двухслойных стен, которые состоят из несущего монолитного бетонного слоя и слоя утеплителя, который навешивается на наружные опалубочные щиты до укладки бетона и после формирования бетонного слоя оказывается связанным с ним за счёт адгезии к бетону.

В качестве наружной оставляемой опалубки возможно использовать сборные железобетонные плиты высотой на этаж (скорлупы) с декоративной отделкой, которые после набора необходимой прочности перевозят на стройплощадку и монтируют в проектное положение. Затем с внутренней стороны наклеивают утеплитель, устанавливают арматуру стен и инвентарную опалубку, которую соединяют со скорлупой болтами и скобами и бетонируют стену. После набора прочности бетона внутреннюю опалубку вынимают. Примеры таких конструкций приведены ниже.

Технология бетонирования в несъемной опалубке "Velox" пришла к нам из Австрии [57]. Она используется для реконструкции и нового строительства жилых домов и зданий различного назначения. Опалубка состоит из двух цементно-стружечных панелей, размером 2000×500 мм, толщиной 25, 35 или 50 мм, скрепленных между собой проволочными хомутами (рис. 26). Опалубка вручную выставляется на высоту этажа. Затем на временные стойки и балки из обрезной доски укладываются пустые короба и устанавливается арматура. Вся конструкция заполняется бетоном. В качестве наружного элемента опалубки используется плита из ЦСП, с приклеенным на цементном растворе утеплителем – пенополистиролом, который остаётся между наружной плитой опалубки и бетоном [33, 57, 59].



Рис. 26. Технология бетонирования в несъемной опалубке фирмы "Velox"

"Thermodom" – в Германии, в России – "Изодом–2000" – это система строительства из монолитного бетона с применением стационарной (несъёмной) опалубки из полых пенополистирольных блоков плотностью 25 ... 35 кг/м³ (термоблоков), в которые заливается бетон (рис. 27, а) [33, 53, 59]. Первый ряд пенополистирольных блоков укладывают непосредственно на слой гидроизоляции по всему периметру будущего здания, пропуская через полости блоков скреплённую с фундаментом вертикальную и горизонтальную арматуру. Второй слой блоков кладётся со смещением вертикальных швов. Заполнение пустот блоков бетоном производится обычно сразу на 2–3 ряда по высоте. Блоки выпускают различных размеров, но обычно 250×250 мм и длиной 1000 ... 2000 мм. Кроме того, поперечные вставки могут изготавливаться из ударопрочного полистирола, металлическими и т.д. (рис. 27, б). Стена снаружи облицовывается плиткой или кирпичом, либо штукатурится. При этом по теплосбережению стена "Thermodom" толщиной 0,25 м эквивалентна стене из железобетона толщиной 2 м, кирпича – 1,5 м, сосны 0,6 м [90].

В России фирма "Зеленоградстрой" разработала систему "Пластбау-3". Это технология производства несъёмной опалубки из пенополистирола [35, 59]. Она состоит из изготовленных на заводе опалубочных элементов стен, объединяющих в себе функции опалубки и утеплителя, а также основания для нанесения отделочных (фактурных) слоёв. Размеры стеновых панелей шириной 1200 мм и высотой на этаж (рис. 28, а, б).

В пенополистирол запрессованы стальные оцинкованные профили, которые расположены вертикально, и воспринимают нагрузку от бетонной смеси, а также позволяют увеличить длину пролётов опалубки. В качестве утеплителя используется пенополистирол ПСБ-С, плотностью не менее 15 кг/м³. Наружная поверхность утеплителя может иметь заводскую отделку в виде декоративного покрытия.



а)

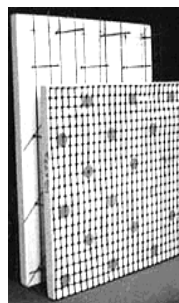


б)

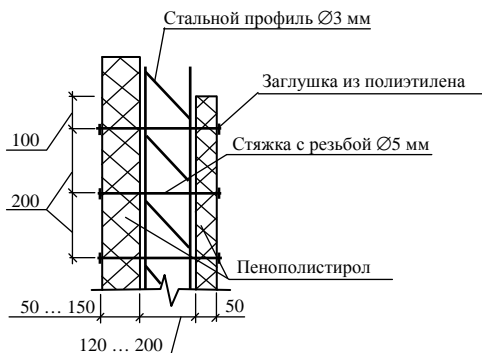
Рис. 27. Технология устройства несъёмной опалубки из пенополистирола по системе "Thermodom" (а); общий вид термоблока (б)



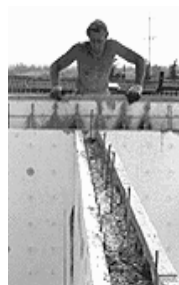
а)



в)



б)



г)

Рис. 28. Элемент опалубочный наружной стены из пенополистирола:

- а – поперечный разрез; б – продольный разрез;
 в – общий вид опалубки из пенополистирола;
 г – технология устройства несъемной опалубки по системе "Пластбау-3"

Между листами опалубки на строительной площадке устанавливаются арматурные каркасы, и заливается бетонная смесь (рис. 28, в, г) [59, 61].

Инверсионные кровли и чердачные перекрытия. В современной архитектуре плоские или инверсионные кровли занимают значительное место, так как позволяют рационально использовать пространство в условиях современного города: здесь можно расположить автостоянки, пешеходные зоны, зелёные площадки.

Как правило, в дополнение к обычной плоской кровле многие проекты зданий содержат зимний сад, кафе на террасе, многоуровневую автостоянку и т.д.

При традиционном устройстве плоской кровли верхним слоем является гидроизоляция. При таком расположении она оказывается

подвержена воздействиям, которые могут привести к разрушению всей кровли:

- суточные перепады температур (вызывают трещины);
- механические повреждения;
- ультрафиолетовое облучение (ускоряет процесс старения гидроизоляции).

Чтобы избежать воздействия таких вредных факторов необходимо устраивать инверсионные кровли. Инверсионной (от латинского *inversio* – переворачивание, перестановка) называется кровля, конструкция которой "перевернута" по сравнению с традиционной, т.е. гидроизоляционный слой располагается под слоем утеплителя непосредственно на поверхности бетонного перекрытия (основания кровли). В конструкции такой кровли применяется экструзионный пенополистирол, представляющий собой теплоизоляционный материал с равномерно распределёнными закрытыми (замкнутыми) ячейками, который не впитывает воду, не набухает и не даёт усадки, обладает высокой механической прочностью, химически стоек и не подвержен гниению [см. гл. 4]. Эти свойства утеплителя позволяют расположить его над гидроизоляцией, для которой он является ещё и защитой от внешних воздействий.

Слой гидроизоляции при таком расположении утеплителя не испытывает существенных температурных перепадов, так как постоянно, и зимой, и летом, находится в зоне положительных температур, а также надёжно защищён от непосредственных механических воздействий и ультрафиолетового излучения.

Высокая прочность материала на сжатие защищает гидроизоляционную мембрану от механических повреждений, а низкая теплопроводность обеспечивает превосходную защиту от перепадов температур. Простейшее исполнение инверсионной кровли – это кровля с гравийной засыпкой по дренирующему слою из геотекстильного материала, уложенного по плитам (рис. 29) – метод, предложенный в [74]. Благодаря этому, как показал опыт, значительно увеличивается долговечность гидроизоляционного слоя. Инверсионный тип кровли незаменим при строительстве зданий с эксплуатируемыми кровлями. В этом случае вместо гравийной засыпки используются тротуарные плиты на подушке из мелкого гравия, асфальтовое или бетонное покрытие. В связи с тем, что в настоящее время озеленение городов не развивается из-за дефицита свободных площадей, зелёные насаждения на кровлях и террасах зданий и сооружений, несомненно, украшают внешний вид городов.

Пенополистирол активно применяется в качестве теплоизолирующего слоя в такой отрасли строительства, как аэродромное и дорожное строительство.

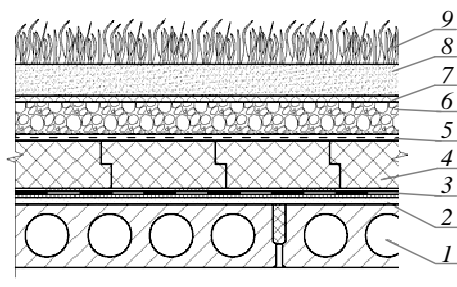


Рис. 29. Схема инверсионной кровли с использованием экструдированного пенополистирола в качестве утеплителя:

1 – железобетонная плита покрытия; 2 – стяжка из цементно-песчаного раствора 50 ... 30 мм; 3 – водоизоляционный ковер; 4 – теплоизоляция (экструзионный пенополистирол); 5 – фильтрующий слой; 6 – дренажный слой из гравия; 7 – противокорневой слой; 8 – грунтовочный слой; 9 – растительный слой

Строительство автомобильных дорог. Основные причины, по которым дороги быстро приходят в негодность, давно известны. К ним в первую очередь относятся:

- слабая прочность основания и верхнего слоя покрытия дороги;
- достижение предельного напряженно-деформированного состояния конструкции дороги в результате механических и температурных воздействий;
- плохое качество строительства и эксплуатации дорог.
- локальное или обширное механическое воздействие на конструкцию дороги со стороны основания в результате образования ледяных линз или пучинистости грунта, что приводит к разрушению дорожной конструкции.

Остановимся подробнее на последней причине. Сильное разрушение покрытия наблюдается, когда в основании имеются пучинистые грунты, которые при увлажнении и последующем замерзании увеличиваются в объёме и дают на конструкцию дороги. Увеличение объёма пучинистых грунтов по длине и ширине дороги неравномерное. Поэтому на поверхности появляются трещины: продольная – в середине и множество поперечных. Нередко возникает местное поднятие поверхности дороги, разрушение и выкрашивание покрытия.

Источниками возникновения ледяных линз и увеличения объёма пучинистых грунтов являются повышенная влажность и отрицательная температура в основании земляного полотна. В условиях России пучины серьезно осложняют эксплуатацию дорог. На отдельных участках дороги их протяжённость достигает 30% и более. В некоторых развитых странах

с целью недопущения образования пучин основание дорог высшей категории отапливают с помощью электричества [85, 94]. Мероприятие чрезвычайно дорогое и не нашедшее понимания у россиян.

Однако предотвратить увлажнение грунта и его промерзание можно путём устройства дополнительных слоёв основания: морозозащитного, дренирующего, капилляропрерывающего. Эти меры требуют значительных капиталовложений, трудозатрат и, как правило, малоэффективны для предотвращения процессов пучинообразования. Выходом из данной ситуации является введение в конструкцию дорожного покрытия специального материала, обладающего одновременно гидроизоляционными и теплоизоляционными свойствами. Естественно, он должен иметь хорошие прочностные и деформативные характеристики. К таким материалам относится экструзионный пенополистирол. Для использования в дорожной одежде пенополистирол должен обладать характеристиками не ниже приведённых в прил. 2.

При использовании пенопластов в строительстве автодорог можно успешно решить следующие проблемы:

- снижение толщины морозозащитного слоя;
- уменьшение высоты насыпи и глубины выемки;
- использование грунтов повышенной влажности;
- повышение долговечности и ровности покрытия за счёт устранения пучинообразования.

Рассмотрим эти проблемы подробнее на примере экструзионного пенополистирола Styrofoam [51 – 53].

Снижение толщины морозозащитного слоя. В районах с сезонным промерзанием грунтов их пучение под дорожной одеждой не должно превышать допустимых значений [68]. Для обеспечения этого требования устраивают морозозащитные слои из кондиционных песков, песчано-гравийной смеси, гравия, укреплённых грунтов и из других непучинистых материалов. Расчёт толщины морозозащитного слоя ведётся согласно [67, 68]. На участках с неблагоприятными грунтово-гидрологическими условиями толщина морозозащитного слоя может достигать 1 м и более. На таких участках трудно обеспечить необходимое количество кондиционных грунтов и материалов для устройства морозозащитных слоёв. Во многих районах таких грунтов и материалов нет. Дальность перевозки кондиционных песков составляет десятки и сотни километров.

Устройство теплоизолирующего слоя из пенопласта позволяет резко уменьшить толщину или полностью исключить морозозащитный слой. На рисунке 30 представлены конструкции дорожной одежды

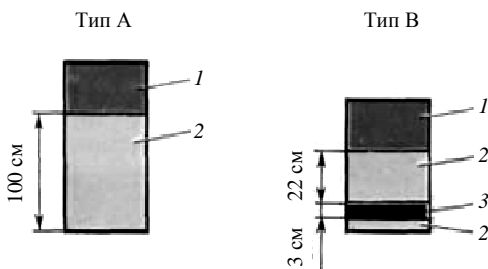


Рис. 30. Конструкции дорожной одежды, равноценные по морозоустойчивости, в условиях Москвы:

1 – покрытие и основания дорожной одежды; *2* – песок;
3 – пенопласт Styrofoam

с морозозащитным слоем из песка (тип А) и с теплоизолирующим слоем из пенопласта (тип В), которые удовлетворяют требованиям по прочности и морозоустойчивости в условиях Москвы [68].

Уменьшение высоты насыпи. При проектировании автодорог высоту насыпи назначают исходя из двух условий [70]:

- высота насыпи должна быть такой, чтобы не происходило переувлажнение грунтов рабочего слоя земляного полотна;
- высота насыпи должна быть такой, чтобы дорогу не заносило снегом во время метелей.

Высота насыпи зависит от грунтов, которые входят в рабочий слой земляного полотна. Толщина рабочего слоя принимается равной 2/3 глубины промерзания, но не менее 1,5 м от поверхности покрытия. Теплоизолирующий слой из пенопласта позволяет уменьшить толщину рабочего слоя благодаря снижению глубины промерзания, а также уменьшить высоту насыпи и сократить толщину морозозащитного слоя. Приведём примеры.

На рисунке 31 представлены минимальные значения высот насыпи, которые нужно устраивать в Архангельской области на участках с грунтовыми водами на уровне поверхности земли. В случае устройства традиционной дорожной одежды высота насыпи из мелкого песка или супеси песчанистой должна быть не менее 2,0 м (тип А). В случае устройства конструкции с теплоизолирующим слоем, предотвращающим промерзание грунтов ниже поверхности земли, высота насыпи должна быть не менее 1,5 м (тип В) [51].

Уменьшение глубины выемки. При неблагоприятных грунтово-гидрологических условиях в районах с сезонным промерзанием устраивают в выемках толстые морозозащитные слои (тип А).

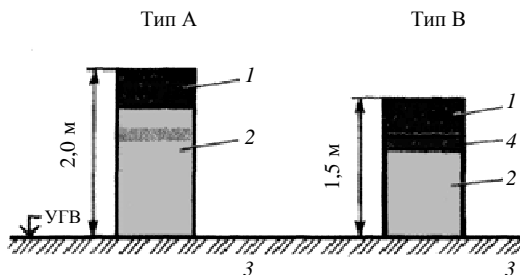


Рис. 31. Минимальные значения высот насыпи в Архангельской области при устройстве традиционной конструкции дорожной одежды (тип А) и конструкции с пенопластом, предотвращающим промерзание грунтов ниже поверхности земли (тип В):

1 – дорожная одежда; 2 – песок мелкий или супесь песчанистая;
3 – супеси и суглинки пылеватые; 4 – пенопласт Styrofoam

Ту же морозоустойчивость можно обеспечить устройством тонких теплоизолирующих слоёв из пенопласта (тип В). В результате уменьшается толщина дорожной одежды, снижается глубина выемки, уменьшается объём земляных работ и облегчаются условия их проведения, особенно в период выпадения дождей.

На рисунке 33 представлены конструкции земляного полотна в выемках на дороге Омск – Новосибирск от км 38 + 500 до км 76 + 515. Дорога запроектирована по нормативам I технической категории. В конструкциях типа А и В дорожная одежда удовлетворяет требованиям по прочности и морозоустойчивости [67, 68]. Благодаря устройству теплоизолирующего слоя сокращается количество кондиционного песка и уменьшается объём земляных работ.

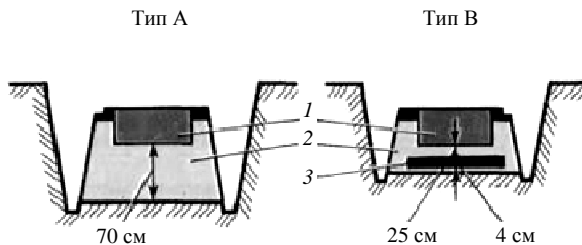


Рис. 33. Конструкции земляного полотна в выемках на дороге Омск – Новосибирск при устройстве традиционной дорожной одежды (тип А) и дорожной одежды с пенопластом (тип В):

1 – покрытие и основание дорожной одежды; 2 – песок средней крупности;
3 – пенопласт Styrofoam

Использование грунтов повышенной влажности. При устройстве дорожной одежды с асфальтобетонным или цементобетонным покрытием плотность грунта рабочего слоя должна быть не ниже соответственно 0,98 и 1,0 максимальной плотности по методу стандартного уплотнения [66]. Такое уплотнение возможно только при влажности грунта, близкой к оптимальной (W_{opt}). Обеспечить стройку грунтами с такой влажностью бывает сложно, особенно весной после таяния снега и осенью в период выпадения дождей. Применение теплоизолирующих слоёв из пенопласта позволяет использовать грунты повышенной влажности для устройства рабочего слоя земляного полотна при выполнении трёх условий: 1) тип увлажнения рабочего слоя земляного полотна должен быть 1-м или 2-м; 2) грунт надо уплотнять до плотности не ниже 0,95 от максимальной; 3) толщина пенопласта должна быть такой, чтобы не происходило промерзание грунтов под дорожной одеждой. При таких условиях не происходит морозное пучение грунта, а происходит только его усадка в летний период. В результате этого грунт доуплотняется до максимальной плотности и даже более [66].

На рисунке 34 указаны максимальные значения влажности тяжёлого пылеватого суглинка, при которых можно применять этот грунт для устройства рабочего слоя земляного полотна в случае традиционного решения дорожной одежды с асфальтобетонным покрытием (тип А) и в случае включения в конструкцию теплоизолирующего слоя из пенопласта (тип В) [51, 52].

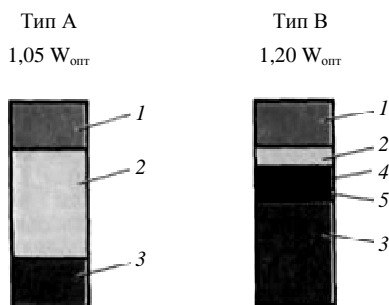


Рис. 34. Допустимые значения влажности тяжёлого пылеватого суглинка, при которых можно уплотнить грунт до нормативных величин при устройстве традиционной дорожной конструкции (тип А) и конструкции с пенопластом (тип В):

1 – покрытие и основание дорожной одежды; 2 – песок; 3 – тяжёлый пылеватый суглинок; 4 – пенопласт Styrofoam; 5 – геотекстиль

Повышение долговечности и ровности покрытия. В процессе эксплуатации дороги в районах с сезонным промерзанием происходит круглогодичный процесс изменения плотности и влажности пучинистых грунтов. В результате осадки и усадки грунтов в весенне-летний период может происходить или не происходить восстановление их начальной плотности, достигнутой при строительстве дороги. В последнем случае имеет место разуплотнение грунтов при многократном пучении в течение целого ряда лет, пока их плотность в летний период не станет равной "бытовой плотности" [51].

Указанные процессы поднятия и опускания дорожной одежды происходят неравномерно по площади проезжей части. Особенно это имеет место весной, когда под действием транспорта усиливается неравномерность осадки разуплотнённого и водонасыщенного грунта. При этом, чем больше размер пучения грунта, тем более неравномерно происходит поднятие и опускание проезжей части. Такое ежегодное воздействие на дорожную одежду влияет на её долговечность и ровность покрытия.

Для повышения ровности и долговечности покрытия необходимо устранить морозное пучение заменой пучинистых грунтов на всю глубину промерзания кондиционным песком, песчано-гравийной смесью, гравием, укрепленным грунтом и другими непучинистыми материалами. Практически сделать это невозможно в районах, где глубина промерзания достигает 3,0 м и более.

Применение теплоизолирующих слоёв из пенопласта позволяет предотвратить промерзание пучинистых грунтов под дорожной одеждой. В результате этого устраняется основной фактор разуплотнения грунтов рабочего слоя земляного полотна. Плотность ненабухающих и слабонабухающих грунтов почти не меняется в процессе эксплуатации дороги. Влажность грунтов, уплотнённых до нормативных значений, также меняется мало. При таких условиях несущая способность грунтов рабочего слоя не меняется по сезонам года. Только благодаря этому фактору долговечность покрытия увеличивается примерно на 30% по сравнению с традиционным решением дорожной конструкции. Продолжительность срока службы конструкции с пенопластом значительно больше указанного значения, так как не происходит ежегодного неравномерного поднятия и опускания дорожной одежды, которое во многом определяет долговечность сооружения [51 – 53].

На рисунке 35 приведены данные о соотношении между сроками службы покрытия (T , лет) при традиционном решении дорожной одежды (тип А) и устройстве конструкции с пенопластом, предотвращающим промерзание грунтов рабочего слоя земляного полотна (тип В). Приведены данные о ровности покрытия на дороге Омск – Новосибирск. Замеры проводились после 12 лет эксплуатации дороги [51].

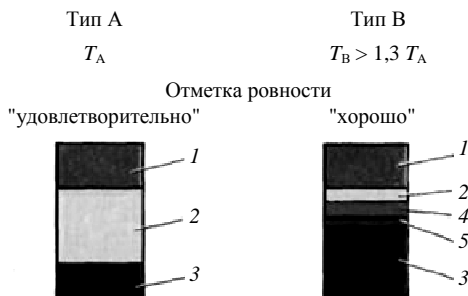


Рис. 35. Показатели долговечности и ровности покрытия при устройстве традиционной конструкции дорожной одежды (тип А) и дорожной одежды с пенопластом (тип В):

1 – покрытие и основание дорожной одежды; 2 – песок;
3 – грунт; 4 – пенопласт Styrofoam; 5 – геотекстиль

Решения, возможные только с использованием пенопласта.

В ряде случаев борьба с пучинами или малоэффективна, или просто невозможна. На рисунке 36 показан один из таких случаев. Дорога проходит в насыпи высотой 1 м. Местность равнинная, поверхностный сток не обеспечен. Под насыпью залегает супесь пылеватая. Имеются подземные воды (верховодка), уровень которых совпадает с поверхностью земли. Глубина промерзания в открытом поле более 1,5 м. На дороге имеются пучины. Реконструкция пучинистого участка предусматривает устройство дорожной одежды толщиной 0,5 м.

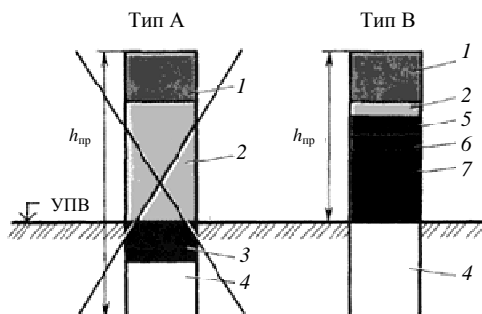


Рис. 36. Конструкции дорожной одежды с морозозащитным слоем (тип А) и с теплоизолирующим слоем из пенопласта (тип В), которые рассматривались при решении задачи по устранению пучины на дороге:

1 – покрытие и основание дорожной одежды; 2 – песок; 3 – гравий;
4 – супесь пылеватая; 5 – пенопласт Styrofoam; 6 – геотекстиль;
7 – грунт существующей насыпи; $h_{пр}$ – глубина промерзания

В случае устройства дополнительного морозозащитного слоя его толщина должна быть более 0,5 м (тип А). При таких условиях низ дорожной одежды располагается ниже поверхности земли в зоне верховодки. Для обеспечения требуемой долговечности конструкции нужно отводить воду из слоёв дорожной одежды и верхних слоёв земляного полотна, что выполнить нельзя.

Не представляется возможным отвести воду и в равнинной местности, когда часть морозозащитного слоя находится ниже уровня подземных вод. В указанных условиях нельзя устраивать морозозащитный слой для устранения пучин. Ниже поверхности земли он будет заполнен водой, в результате чего снижается его несущая способность. Морозозащитный слой, заполненный водой, не устраняет пучение, так как в нём происходит льдообразование [52].

Конструкция с теплоизолирующим слоем из пенопласта (тип В) не имеет указанных недостатков и позволяет устранить пучины на дорогах. Таким образом в районах с вечномёрзлыми грунтами при устройстве земляного полотна в низкой насыпи применение теплоизолирующего слоя из пенопласта позволяет предотвратить оттаивание грунтов и разрушение дороги [51].

Отмечается, что до 1998 г. в качестве теплоизоляционного слоя использовались импортные пенополистирольные плиты Styrofoam, позже дорожники перешли на использование отечественного экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС (рис. 37). Экономические расчёты показывают, что во многих случаях строительство дороги с применением плит ПЕНОПЛЭКС обходится дешевле, чем строительство традиционным способом [86].

В качестве примеров успешной защиты дорожной конструкции от воздействия неравномерного пучения грунтов основания уместно привести соединительную автомобильную дорогу между автодорогами Москва – Киев и Калуга – Тула (Калужская область); автодороги Чита – Хабаровск "Амур" (Амурская область), М-2 "Крым" на участке Серпухов – Тула, М-4 "Дон" в районе г. Кашира Московской области. ПЕНОПЛЭКС был успешно применен и в Северо-Западном регионе – при реконструкциях дороги М-10 "Россия" на объезде г. Тосно Ленинградской области.



Рис. 37. Использование плит ПЕНОПЛЭКС при строительстве дорог

В условиях вечной мерзлоты теплоизоляционные слои из плит ПЕНОПЛЭКС использовались при строительстве федеральной дороги Сургут – Салехард на уча-

стке Пуровск – Ягнетта, участке автодороги Коротчаево – Пуровск (Ямало – Ненецкий АО), применялись при строительстве автодороги в Республике Саха (Якутия).

В 2003 г. ФГУП "СОЮЗДОРНИИ" было проведено обследование на опытных участках, построенных с применением плит ПЕНОПЛЭКС, автодорог МКАД – Кашира и Серпухов–Тула, которое показало целесообразность применения данного материала.

Промерзания земляного полотна под теплоизолирующим слоем не произошло. Отсутствие деформаций в виде сетки трещин позволило судить об обеспечении прочности и несущей способности конструкции.

На основании сопоставления показателей различных материалов был сделан вывод о том, что в конструкции дорожного полотна 1 см материала ПЕНОПЛЭКС по теплозащитной функции эквивалентен 30 см песка [83]. В течение 12 лет проводились наблюдения за участком дороги Омск – Новосибирск, при возведении которого использовался экструзионный пенополистирол толщиной 50 и 100 мм [86]. Экспериментальный участок оборудовали постами наблюдения за водно-тепловым режимом дорожного покрытия и основания с гидро-теплоизолирующим слоем и без него. Район строительства характеризуется сезонным промерзанием грунтов, морозными зимами и жарким летом. В результате исследования экспериментального участка выяснилось, что при толщине теплоизолирующих плит 100 мм промерзание грунта по оси проезжей части не наблюдалось, в то время как на обочине дороги промерзание составило 1800, 2500 мм. На участке дороги без теплоизолирующего слоя промерзание грунта по оси проезжей части составило 2500 мм. Результаты нивелирования осадочных марок показали, что пучение грунтов под проезжей частью с теплоизоляцией составило 5 ... 20 мм, а на обочине этого участка – 130 мм. За 12 лет эксплуатации дороги материал не изменил свои свойства.

Применение плит ПЕНОПЛЭКС позволяет снизить высоту насыпи до 0,9 м по сравнению с типовым решением. Анализ работы дорог показывает, что при толщине плит 100 мм оседание дороги за 3 года эксплуатации практически не наблюдается, тогда как на контрольном участке обычной конструкции оседание достигало 30 см. Пример такой конструкции приведён на рис. 38.

Теплоизоляционные плиты также выполняют функцию разделительного слоя и обеспечивают равномерное распределение нагрузки. В этом случае необходимость капитального ремонта дорог возникает значительно реже. Результатом применения данного материала в качестве теплоизолирующего и разделительного слоёв является повышение ровности покрытия при эксплуатации и отсутствие разрушений дорожной одежды от неравномерных деформаций в земляном полотне [86, 95].

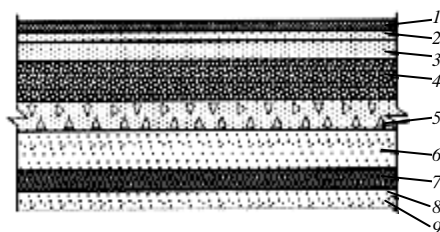


Рис. 38. Пример утепляющей конструкции земляного полотна:

- 1 – асфальтобетон мелкозернистый плотный (5 см);
- 2 – асфальтобетон крупнозернистый пористый (7 см); 3 – асфальтобетон крупнозернистый пористый (9,5 см); 4 – тощий бетон (16 см);
- 5 – щебень гранитный, фракция 40 ... 70 мм, обработанный битумом (10 см);
- 6 – песок 1 класса (32 ... 36 см); 7 – пеноплекс 45 – 4 ... 8 см (по расчёту);
- 8 – песок 1 класса (10 см); 9 – геосинтетический материал Тайпар SF 56

Помимо рассмотренных выше плит Styrofoam, ПЕНОПЛЭКС из экструзионного пенополистирола, в современном дорожном строительстве применяют плиты из экструзионного пенополистирола следующих производителей: ТЕХНОПЛЕКС, СТИРОПЛЕКС, ГРИНПЛЕКС, ТЕПЛОИЗОПЛИТ, ЭКСТРОЛ и многих других [77, 79, 83, 85, 86, 88, 95].

Строительство высоких насыпей и подходов к мостам на слабых основаниях. Как известно, при проектировании и строительстве дорожных насыпей на слабых основаниях требуют решения вопросы, связанные с недостаточной несущей способностью основания, возможностью больших осадок и длительным сроком их прохождения. Уменьшение нагрузки на слабое основание возможно за счёт уменьшения веса насыпи, которое может быть достигнуто применением для её устройства материалов, имеющих значительно меньшую плотность, чем грунт [76].

Существует множество лёгких материалов, которые потенциально могут использоваться в дорожных насыпях. Наибольшее распространение получил жёсткий пенопласт – пенополистирол, обладающий уникально низкой удельной плотностью ($20 \dots 65 \text{ кг/м}^3$), достаточной прочностью и долговечностью. Наряду с геосетками, геотекстилем и геомембранами пенополистирол относится к категории геосинтетических материалов. В дорожном строительстве применяются изделия из пенополистирола в виде плит толщиной до 100 мм, изготавливаемых методом экструзии (XPS плиты), и в виде блоков (EPS блоки) [76].

За рубежом и в России XPS плиты используются в основном для устройства теплоизолирующих прослоек. Их применение в облегчённых насыпях считается экономически и технологически нецелесообразным.

Мировая практика свидетельствует о том, что из всех легких материалов для устройства облегченных насыпей наибольший эффект даёт применение EPS блоков. Широкое внедрение насыпей из EPS блоков за рубежом началось в середине 80-х гг. прошлого века. С тех пор применение EPS блоков ежегодно расёт, особенно в Японии, а также в Скандинавских странах, США, Германии, Англии, Франции, других странах. По имеющимся данным, в мире к 2004 г. построено более 3000 дорожных объектов с применением EPS в объёме более 2,5 млн. м³. Более 50% объёма приходится на Японию, для которой характерно широкое распространение слабых грунтов и высокая сейсмическая активность [76, 82].

Основные области применения облегченных насыпей из EPS блоков:

- линейные участки автомобильных дорог на слабом основании;
- подходы к мостовым сооружениям на слабом основании;
- уширение насыпей на слабом основании;
- строительство автомобильных дорог на участках возможных оползней;
- устройство заполнения за подпорными стенками.

Высота насыпей от 1,5 до 16 и более метров. Для засыпки боковых откосов могут применяться традиционные типы грунта. Толщина засыпки должна быть не менее 0,25 м. Вертикальные откосы из EPS блоков могут защищаться сборными железобетонными панелями, гофрированной сталью и другими материалами.

Так как полистирол не обладает стойкостью к нефтепродуктам, то верхние и откосные поверхности EPS блоков рекомендуется защищать от возможного контакта с нефтепродуктами укладкой герметичной (полиэтиленовой) мембраны.

Крепление силовых ограждений, опор дорожных знаков, мачт наружного освещения и других систем обустройства дороги производится к железобетонной плите, укладываемой по поверхности верхнего ряда EPS блоков. При достаточной толщине земляного полотна над облегченной частью насыпи системы обустройства дороги могут заделываться в грунт.

Строительство облегченных насыпей с применением EPS блоков по сравнению с обычными насыпями имеет следующие основные преимущества:

- значительное сокращение величины и времени прохождения осадки;
- простота технологии и сокращение сроков строительства;

- производство работ в неблагоприятных погодных условиях;
- отсутствие методов предварительной нагрузки на слабое основание, отсыпки насыпи с перегрузкой и стадийного строительства;
- значительное снижение затрат на содержание автомобильных дорог при неравномерных осадках и длительной вторичной консолидации основания, характерных для обычных насыпей;
- снижение требуемой ширины полосы отвода благодаря возможности устройства более крутых или вертикальных откосов;
- снижение боковой нагрузки на мостовые устои и подпорные стенки;
- снижение неравномерности относительной осадки мостового сооружения и примыкающей насыпи;
- снижение относительной осадки при уширении насыпей на слабом основании;
- полное исключение или уменьшение объёма перекладки инженерных сетей, проходящих под насыпью;
- снижение нагрузки на сооружения, расположенные под насыпью, например тоннели метрополитена;
- высокая долговечность;
- значительное снижение гравитационных нагрузок на основания насыпей и инерционных сил, возникающих при землетрясениях.

Уникально низкая удельная плотность материала EPS блоков, составляющая около 1% от плотности грунта, применяемого в традиционных насыпях, в сочетании с достаточной прочностью позволяет нести нагрузки от автотранспорта, железнодорожных составов, самолётов, легких зданий и сооружений, опорных элементов мостов.

Вместе взятые кратковременные и долговременные преимущества с меньшей стоимостью строительства насыпей с применением EPS блоков могут компенсировать разницу между единичной стоимостью EPS (среднемировая цена 1 м³ – 40 ... 50 долларов США) и традиционным грунтом.

На рисунке 39 показан пример конструкции облегчённой насыпи из EPS блоков на подходе к путепроводу на федеральной автомагистрали 1–15 в городе Солт-Лейк-Сити, штат Иллинойс, США.

Одной из первых попыток внедрения облегчённых насыпей в России явился разработанный в 2004 г. ЗАО "Петербург-Дорсервис" вариант проектно-технологического решения подхода к путепроводу на одном из участков КАД (кольцевой автодороги). Участок строительства характеризовался залеганием в основании насыпи до глубины 21,5 м чрезвычайно слабого грунта – супеси текучей консистенции.

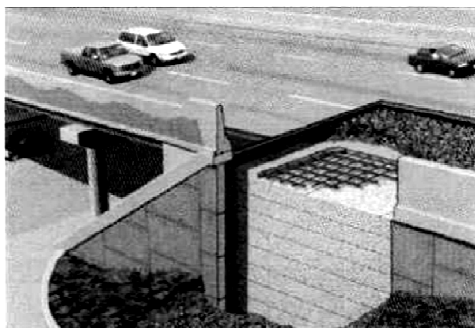


Рис. 39. Облегчённая насыпь из EPS блоков на подходе к путепроводу на федеральной автомагистрали 1–15 США

Геометрические параметры насыпи: высота до 12,5 м, ширина поверху 44,5 м. Технико-экономическое сравнение вариантов конструктивного решения показало, что рассмотренные варианты безосадочной насыпи на свайном основании оказались наиболее дорогостоящими. Кроме того, рассматривалась осадочная насыпь "плавающего" типа, армированная геосинтетическим материалом и облегчённая насыпь с применением пенополистирола. Расчётная величина осадки "плавающей" насыпи составила 60 см. Время прохождения осадки до нормативной степени консолидации основания составила до 7 лет, что не укладывалось в директивные сроки строительства КАД. Для облегчённой насыпи эти показатели составили 7,5 см и 50 дней соответственно, что давало возможность укладки асфальтобетонной дорожной одежды без технологического перерыва сразу после возведения насыпи.

В связи с отсутствием отечественного производства качественных EPS блоков проектом было предусмотрено применение составных блоков из XPS плит, т.е. материала значительно более дорогого, чем EPS. Даже в этом случае стоимость строительства оказалась в 1,2 – 1,3 ниже стоимости строительства безосадочной насыпи на свайном основании.

Состоящие из блоков пенополистирола основания позволяют выполнять равномерное распределение нагрузки для насыпей и мостов в регионах с плохо выдерживающей нагрузку почвой. Высота складирования блоков из пенополистирола может достигать 8 м и более. Лёгкая насыпь такого состава предотвращает оседание и образование рытвин в дорожной структуре, особенно в зонах критического доступа для структур с глубокими фундаментами, например, мостов (рис. 40) [86, 93, 95].

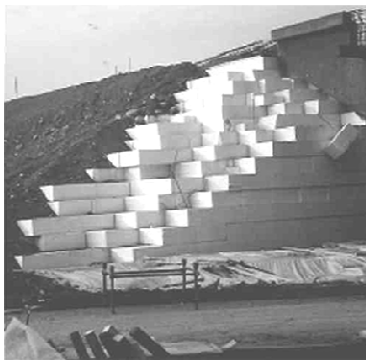


Рис. 40. Блоки из пенопласта при строительстве насыпей и мостов образуют скаты в регионах с плохо выдерживающими нагрузку почвами (Европейская скоростная автомагистраль Е6, Люндскиле, Швеция)

Железные дороги. Российские железнодорожники также активно переходят на использование экструзионного пенополистирола, ведь проблемы на железных дорогах схожи с автомобильными. Повреждение полотна железной дороги также возникает из-за проникновения и замерзания воды в холодовосприимчивых слоях несущих грунтов.

В настоящее время одним из вариантов усиления основной площадки земляного полотна под железнодорожными колеями был выбран метод устройства защитного слоя из экструзионного пенополистирола (рис. 41) [86]. Этот метод реконструкции железнодорожных путей был признан как наиболее эффективный в неблагоприятных условиях: при затруднённом поверхностном водоотводе и в зонах повышенных силовых воздействий. Будучи уложенными на глубине не менее 0,4 м теплоизоляционные плиты в дождливый осенний период предотвращают накопление воды в несущих слоях насыпи, а в зимний период



Рис. 41. Пенополистирол при строительстве железных дорог

уменьшают глубину промерзания грунта. Толщина теплоизоляционного слоя зависит от климатических условий, глубины расположения уровня грунтовых вод, состояния водоотводных сооружений и определяется теплотехническим расчётом [68] из условия полного выведения пучинистых грунтов из зоны промерзания (исключение промерзания грунтов). Применение плит ПЕНОПЛЭКС качественно меняет процесс промерзания земляного полотна.

В [86] доказано, что при замене традиционной дорожной одежды с применением песка на конструкцию со слоем из экструзионного пенополистирола и песка снижение стоимости строительства составит около 17 долларов США на 1 м проезжей части дороги. Приведённый ниже эскиз (рис. 42) показывает схематическое устройство утеплённой с помощью плит ПЕНОПЛЭКС дороги без защитного щебёночно-песочного слоя. Укладка теплоизоляционных плит осуществляется при капитальном ремонте железнодорожного полотна при помощи специальной ремонтно-строительной техники РМ-80 (рис. 43) [86, 94, 96].

Аэродромные покрытия. Следует также сказать о применении плит экструзионного пенополистирола для теплоизоляции аэродромных стоянок и взлётно-посадочных полос. При строительстве, расширении и реконструкции сооружений аэропортов в целях недопущения превышения предельных вертикальных деформаций [72] предусматривается ряд мероприятий по исключению или уменьшению вредного воздействия природных и эксплуатационных факторов, устранению неблагоприятных свойств грунтов под аэродромными покрытиями, в том числе устройство термоизолирующих прослоек из экструзионного пенополистирола (рис. 44).

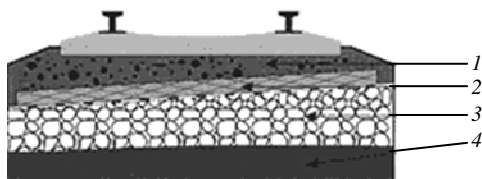


Рис. 42. Типовая конструкция утепления железных дорог:

1 – чистый щебёночный балласт (не менее 400 мм от подошвы шпалы);
2 – ПЕНОПЛЭКС; 3 – старый балластный слой; 4 – грунт земляного полотна



Рис. 43. Реконструкция железнодорожного полотна с помощью машины РМ-80 с применением плит ПЕНОПЛЭКС 45



Рис. 44. Вариант реконструкции искусственной взлётно-посадочной полосы с одновременным уменьшением глубины промерзания грунтов основания:

- 1 – слой нового асфальтобетонного покрытия (12 см);
- 2 – Геосетка "Хателит"; 3 – чёрный щебень (5 см); 4 – утеплитель ПЕНОПЛЭКС (16 см); 5 – выравнивающий слой из песка (5 см);
- 6 – существующее асфальтобетонное покрытие (16 см);
- 7 – существующее цементобетонное покрытие (30 см);
- 8 – песчаное основание (30 см); 9 – насыпной грунт (30 ... 400 см);
- 10 – естественное основание (пучинистое)

На стоянке колёса шасси самолёта оказывают высокое давление на поверхность. Это предъявляет крайне высокие требования к покрытию и изоляции под ним. Они должны выдерживать высокие нагрузки от давления колёс, в сочетании с динамической нагрузкой при движении, особенно во время посадки и взлёта воздушных судов [76, 81, 86, 92, 94, 97]. Толщина слоя изоляции определяется климатической зоной и вычисляется согласно [68, 71].

Пенополистирольные плиты вполне могут использоваться на аэродромах в районах с холодным климатом, на которых даже в летний период в почве под взлётно-посадочной полосой сохраняется постоянная мерзлота.

Применение плит из экструзионного пенополистирола при строительстве городских улиц. Первыми объектами применения данного теплоизоляционного материала стали реконструируемые улицы в историческом центре Санкт-Петербурга [86].

В 1999 г. плиты фирмы ПЕНОПЛЭКС применялись для устройства пешеходной зоны на Малой Садовой улице. По проекту она должна была быть подогреваемой. Перед проектировщиками встал вопрос уменьшения теплопотерь и, как следствие, сокращения эксплуатационных расходов. В конструкции был предусмотрен теплоизоляционный слой из плит ПЕНОПЛЭКС, снижающий тепловой поток в грунт основания.

В том же 1999 г. проводилась реконструкция Малой Морской улицы. Её расположение обусловило наличие в основании дороги множества инженерных коммуникаций. Применение экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС позволило уменьшить глубину промерзания и исключить влияние коммуникаций на температурный режим в несущих слоях основания дороги.

В 2000 г. началась реконструкция 6-й и 7-й линий Васильевского острова (рис. 45). Проходящая под улицей магистральная теплотрасса всегда осложняла её эксплуатацию. На этапе проектирования было решено устроить теплоизоляционный слой из плит ПЕНОПЛЭКС для уменьшения глубины промерзания и, следовательно, для защиты от неравномерных деформаций морозного пучения.

Сенная площадь в Санкт-Петербурге частично расположена над вестибюлем станции метрополитена. В 2002 г. при реконструкции площади для обеспечения равномерного пучения дорожной конструкции над вестибюлем станции и прилегающими к нему участками были применены плиты ПЕНОПЛЭКС.

Ещё одна область применения пенополистирольных плит – *обогреваемые тротуары и площадки* (рис. 46, а). В северных европейских странах и Канаде уже давно применяют подогреваемые дорожные покрытия, например, пешеходные переходы или дорожки вокруг коттеджей для борьбы с гололёдом и не только. Системы снеготаяния служат для растапливания снега и предотвращения образования льда на открытых площадках в зимнее время. Данные системы применяются для поддержания внешних территорий в незамерзающем состоянии в зимний период с целью повышения безопасности, облегчения чрезвычайно трудоёмких работ по очистке территорий от снега и льда.

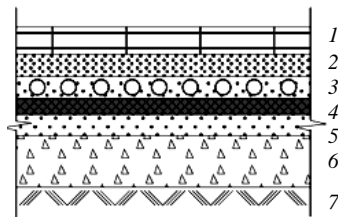
При прокладке обогреваемых тротуаров и дорог возникает проблема более рационального использования тепла, выделяемого нагревательными элементами. В таких случаях под ними укладывают теплоизоляционные плиты, которые снижают теплотери в основании, сокращая энергозатраты, т.е. используя тепло более эффективно (рис. 46, б) [86, 94].



Рис. 45. Реконструкция 6-й и 7-й линий Васильевского острова с использованием экструзионного пенополистирола в Санкт-Петербурге



а)



б)

Рис. 46. Пример конструкции обогреваемого тротуара:

а – общий вид; б – конструкция; 1 – камень мощения;

2 – пескоцементная смесь; 3 – песок с нагревательными элементами;

4 – пенополистирольные плиты; 5 – песок; 6 – щебень; 7 – грунт

Основой системы является экранированный низкотемпературный нагревательный кабель. Нагревательные кабели наиболее эффективны в системах антиобледенения и снеготаяния для взлётно-посадочных полос, сложных участков дорог, пандусов, лестниц, тротуаров и подъездов к гаражам, а также нашли применение для обогрева стадионов, беговых дорожек, спортивных площадок с целью увеличения периода эксплуатации. Эти системы отличаются высокой надёжностью и долговечностью работы, полной автоматизацией управления (включение системы в зависимости от текущих погодных условий).

Одним из элементов обогреваемого тротуара являются плиты из экструзионного пенополистирола.

Одними из первых тёплые тротуары появились в 1998 г. в финской столице Хельсинки (Финляндия). Сегодня подогрев дорожного покрытия, автобусных остановок и железнодорожных платформ применяется в США, Канаде, Японии и странах Скандинавии. Впрочем, в массовую практику тёплые дороги пока не вошли, и это притом, что мировой опыт показал: посыпать улицы песком или другими реагентами затратнее, чем подогревать их. Ведь это избавляет не только от закупки реагентов или щебня, но и от грязи, облегчает уборку улиц.

Полы в промышленных сооружениях и ледовых аренах. Преимущество плит экструзионного пенополистирола особенно очевидно при устройстве полов по грунту промышленных зданий и торговых комплексов, а также других зданий и сооружений, в которых полы укладываются непосредственно на специально подготовленное основание. Такое утепление эффективно даже при эксплуатации в самых экстремальных условиях: воздействии влаги, низких температур и механических нагрузок, а также при наличии в районах строительства водоносных слоёв и грунтовых вод. Температура на поверхности пола является основным фактором, определяющим степень комфортности помещения. Из этого следует, что полы зданий должны быть тепло-

изолированы. Полы производственных зданий несут на себе большие статические и динамические нагрузки, поэтому для их теплоизоляции необходим материал, имеющий высокую прочность на сжатие и малую степень деформации.

Экструзионный пенополистирол незаменим в тех случаях, когда наряду с высокими теплоизоляционными свойствами необходимы высокие прочностные свойства материалов, а часто и химическая стойкость материала утеплителя.

Также незаменим экструзионный пенополистирол при устройстве нагружаемых полов по грунту. Такие полы используют в промышленных зданиях. Как правило, полы в таких зданиях устраиваются с учётом проезда автотранспорта (рис. 47) [80, 86, 92, 94, 95]. Плиты экструзионного пенополистирола при этом включаются в состав конструкции пола и выполняют несущую функцию, воспринимая и передавая нагрузку на основание.

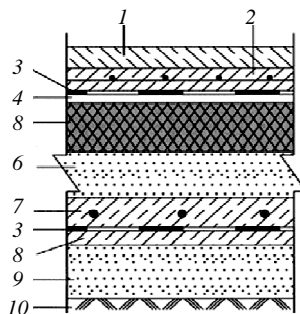
Рационально использовать пенополистирольные плиты в конструкции обогреваемых полов, используя как теплоизолирующие, так и несущие свойства материала утеплителя, а также в составе покрытий ледовых арен, где плиты пенополистирола защищают подстилающие грунты от промерзания (рис. 48) [86, 94]. В этом случае наиболее активно используются теплофизические и прочностные свойства утеплителя.



Рис. 47. Конструкция нагружаемых полов



а)



б)

Рис. 48. Строительство открытого катка в Минске:

а – общий вид; *б* – применённая конструкция пола;

1 – монолитное бетонное покрытие; 2 – армобетонная стяжка;

3 – гидроизоляция; 4 – стяжка из цементно-песчаного раствора;

5 – теплоизоляция "ПЕНОПЛЭКС"; 6 – уплотнённый песок;

7 – бетонная стяжка с электронагревателями; 8 – стяжка из бетона;

9 – песчаная подушка; 10 – грунт основания



Рис. 49. Теплоизоляция трубопровода

ную (траншейную), что минимизирует тепловое воздействие трубопровода на вечномёрзлые грунты в условиях крайнего Севера.

Следует отметить, что при этом в два раза сокращается объём земляных работ по созданию песчаной подсыпки, уменьшается срок строительства газопровода и увеличивается его рабочий ресурс.

Изоляция нефтепроводов значительно снижает затраты по их эксплуатации, так как сводит к минимуму возможность временного выхода из строя нефтепровода из-за влияния низких температур на нефть (особенно в случаях высокой парафинизации).

Защита трубопроводов от механических повреждений. Высокие прочностные характеристики экструзионного пенополистирола обеспечивают надёжную защиту трубопроводов от механических повреждений, в том числе острых скалистых пород. Примером может служить строительство газопровода "Голубой поток" между Россией и Турцией, где сегменты из экструзионного пенополистирола применены для защиты газопровода на участках активных тектонических разломов [85, 96, 97].

Теплоизоляция тоннелей. В своды и в донную часть тоннелей часто просачивается вода. При этом, чем ближе тоннельный вход к воде, тем выше риск, что она замёрзнет с образованием ледяных наслоений.

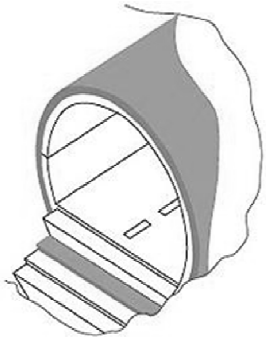


Рис. 50. Теплоизоляция тоннеля

Теплоизоляция трубопроводов. Активно развивающимся направлением является применение экструзионного пенополистирола в качестве теплоизоляции газонефтепроводов в условиях крайнего Севера (рис. 49) [86, 94, 96, 97].

Применение трубной изоляции позволяет заменить надземную и полузаглубленную прокладку трубопровода на заглубленную (траншейную), что минимизирует тепловое воздействие трубопровода на вечномёрзлые грунты в условиях крайнего Севера.

Применение трубной изоляции позволяет заменить надземную и полузаглубленную прокладку трубопровода на заглубленную (траншейную), что минимизирует тепловое воздействие трубопровода на вечномёрзлые грунты в условиях крайнего Севера.

Следует отметить, что при этом в два раза сокращается объём земляных работ по созданию песчаной подсыпки, уменьшается срок строительства газопровода и увеличивается его рабочий ресурс.

Изоляция нефтепроводов значительно снижает затраты по их эксплуатации, так как сводит к минимуму возможность временного выхода из строя нефтепровода из-за влияния низких температур на нефть (особенно в случаях высокой парафинизации).

Защита трубопроводов от механических повреждений. Высокие прочностные характеристики экструзионного пенополистирола обеспечивают надёжную защиту трубопроводов от механических повреждений, в том числе острых скалистых пород. Примером может служить строительство газопровода "Голубой поток" между Россией и Турцией, где сегменты из экструзионного пенополистирола применены для защиты газопровода на участках активных тектонических разломов [85, 96, 97].

Теплоизоляция тоннелей. В своды и в донную часть тоннелей часто просачивается вода. При этом, чем ближе тоннельный вход к воде, тем выше риск, что она замёрзнет с образованием ледяных наслоений.

В связи с высоким давлением воды количество воды и льда может быть значительным и стать причиной проблем с безопасностью. Под действием не только воды, но и ветра, оползней, в тоннель начинает проникать мороз.

В течение всего расчётного срока службы тоннеля должны сохраняться такие свойства теплоизоляционного материала как высокая прочность на сжатие, низкая абсорбция воды при диффузии, стойкость к промерзанию и оттаиванию. Идеально здесь подходит экструзионный пенополистирол (рис. 50).

Защищённый от морозов тоннель обладает следующими техническими характеристиками:

- полотно для движения транспорта защищено от действия мерзлоты;
- дренаж защищён от действия мороза;
- свод тоннеля – от действия мороза и воды [86, 95, 97].

Фундамент и цоколь коттеджей. Надёжность дома и срок его службы во многом зависит от того, насколько грамотно спроектирован и насколько качественно выполнены работы по устройству фундамента.

Однако массивный фундамент – это ещё не гарантия его долгосрочной службы и беззаботной жизни домовладельцев. Довольно часто после зимы дом "проседает" с одного края, появляются трещины по стенам. Причина – морозное пучение грунтов. Возникающие при этом деформации ведут к дорогостоящим ремонтам, и иногда даже к разрушению дома, поэтому крайне важно при проектировании малозаглубленных фундаментов предусмотреть мероприятия, направленные на снижение вызванных морозным пучением грунтов деформаций до предельно допустимых величин.

Рост стоимости строительства и цен на землю вынуждают застройщиков и архитекторов рассматривать подземные части здания как полезные эксплуатируемые площади. Для создания комфортного климата, сокращения энергопотребления (до 20% теплопотерь происходит через подземную часть коттеджа) и предотвращения конденсации, например, обусловленной наличием грунтовых вод, эти помещения должны иметь надёжную тепловую изоляцию [71, 95].

Учитывая, что для решения этой задачи теплоизоляционный материал будет находиться в постоянном контакте с влагой и испытывать воздействие сжимающих нагрузок, трудно найти достойную альтернативу экструзионным пенополистирольным плитам. Замкнутая ячеистая структура материала делает его нечувствительным к влаге, а устойчивость к деформации – нечувствительным к механическим воздействиям.

Плиты XPS устанавливаются поверх гидроизоляционной мембраны и могут окружать всю несущую конструкцию сооружения (рис 51.) Теплоизоляционный контур дополнительно защищает гидроизоляционную мембрану от механических повреждений.

Поверх утеплителя монтируется специальная дренажная мембрана, что позволяет избежать давления грунтовых вод на теплоизоляционный материал. Также в случае устройства теплоизоляции только на глубину промерзания грунтов дренажная мембрана будет защищать от повреждения гидроизоляцию.



Рис. 51. Теплоизоляция фундамента

Бывает так, что дом построен без теплоизоляции фундамента или она не эффективна. Есть решение и для этого случая. Теплоизоляционные плиты XPS укладывают под отсыпку по периметру дома в грунт от подвальной стены и на расстояние, равное глубине промерзания грунта плюс 500 мм [95].

Практический опыт. Исходя только из лабораторных исследований, нельзя в полной мере сделать выводы относительно характеристик материалов при долговременных воздействиях. Для этого фирма BASF длительный период времени проводила испытания эксплуатационных характеристик пенопласта в естественных условиях, в том числе в строительстве. В частности, термоизоляционные характеристики испытывали на плоских крышах сооружений производственных площадок фирмы BASF. Пенополистирольные листы были смонтированы в 1955 г. и демонтированы для исследований в 1986 г. Анализ показал, что места соединений между отдельными изоляционными листами были надёжно герметизированы. Не было замечено никаких изменений линейных размеров листов, которые могли бы возникнуть из-за сжатия или усадки. Также не было замечено деформационных изменений или искривлений, которые могли бы произойти из-за теплового воздействия. Листы из пенопласта находились в отличном состоянии (рис. 52, а, б).

Таким образом, с середины 1960-х гг. пенопласт обеспечивает прекрасную защиту от мороза фундаментам, трубопроводных систем и оснований автомобильных и железных дорог (рис. 53).

Существенным недостатком пенополистирола является его высокая деформативность и низкая прочность. Устранить эти недостатки можно путём модифицирования пропиткой мономерами. В [64] отмечается, что в результате пропитки пенополистирола ПСБ-С 50 олигомером до полного заполнения всех пор, прочность пенополистирола при поперечном изгибе увеличивается примерно на 20%.



а)



б)

Рис. 52. Удаление покрытия крыши для изучения состояния панелей из пенопласта, установленных 31 год назад (а); образец, взятый с плоской крыши (б)



Рис. 53. Панель из пенопласта для защиты от промерзания при дорожном строительстве.

Образцы взяты через 11 лет после установки. Панели из пенопласта были в таком же состоянии, что и при установке

Это связано с образованием плотного каркаса в объёме образца, кроме того, меняется и механизм разрушения: разлом проходит не между гранулами, а по чистой гладкой поверхности.

Правильное использование пенопластов в строительных конструкциях существенно повышает их долговечность.

Как правило, значительные изменения теплотехнических свойств плит происходят в результате нарушения технологического регламента при производстве строительных работ. Например, на втором году эксплуатации торгового подземного комплекса, построенного на Манежной площади в Москве, при вскрытии покрытия было обнаружено значительное разрушение материалов [96]. В конструктивном решении покрытия предусматривалось устройство гидроизоляционного ковра из гекопреновой мастики. Основой этой мастики является битум и синтетический хлоропеновый каучук, растворённые в органических

растворителях. Полученная гидроизоляционная мастика при нанесении на железобетонное покрытие активно выделяла летучие химические вещества. По гидроизоляционному слою без выдержки установленного срока были уложены пенополистирольные плиты. При вскрытии покрытия было обнаружено на большинстве пенополистирольных плит значительное число раковин и трещин. Основной причиной их разрушения следует считать активное выделение и воздействие на утеплитель летучих веществ из мастики. Несоблюдение сроков укладки теплоизоляционных плит привело к ускорению деструкционных процессов пенополистирола. В результате толщина плит изменилась с 77 до 14 мм и отклонение от проектного значения составило от 4 до 470%. При этом плотность пенополистирола в зоне самой тонкой части плиты увеличилась до 120 кг/м^3 , т.е. более чем в 4 раза, что вызвало изменение коэффициента теплопроводности материала в сухом состоянии с 0,03 до 0,07 Вт/(м °С). Термическое сопротивление теплоизоляционного слоя покрытия в зоне чрезмерной деструкции пенополистирольных плит стало составлять $0,32 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$, что отличает его от проектного значения, равного $2,7 \text{ м}^2\text{°C/Вт}$, более чем в 8 раз [96].

10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ (РАБОТОСПОСОБНОСТИ) ПЕНОПОЛИСТИРОЛА В КОНСТРУКЦИЯХ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Долговечность – свойство элемента или системы длительно сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при определённых условиях эксплуатации [69]. В ранних работах [47] проблема долговечности рассматривалась на основе представлений классической механики о пластических деформациях. При этом разрушение твёрдых тел считалось критическим событием, наступающим, когда действующие в материале напряжения достигают некоторой предельной величины.

Впоследствии долговечность стали рассматривать как часть общей теории надёжности, и расчёты её проводились с использованием математического аппарата теории вероятностей, а также теории множеств. Сложность этого подхода заключается в ограниченных возможностях получения достаточного статистического материала [55].

Следующий путь к построению теории долговечности основан на изучении физико-химических свойств и параметров объектов, процессов, происходящих в них, физической природы и механизма разрушения. При этом используются уравнения, отражающие физические закономерности. Согласно кинетической концепции прочности разрушение твёрдого тела рассматривается не как критическое событие, а как постепенный кинетический, термоактивационный процесс, развивающийся в механически напряжённом теле во времени с момента приложения к нему нагрузки, в том числе меньше критической [48, 56].

Развитие кинетической концепции обязано в первую очередь фундаментальным работам школы С.Н. Журкова. Первоначально был установлен универсальный характер временной зависимости прочности (5) [56], т.е. для разрушения материала необходимо время τ , в течение которого в нагруженном теле протекают процессы, приводящие к его разделению на части.

Позже возникла концепция о механическом разрушении полимеров как их термомеханической деструкции. Она явилась результатом трактовки физического смысла константы U_0 в известной формуле Журкова для долговечности (6):

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U}{RT}\right) = \tau_0 \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right),$$

где τ – время до разрушения (долговечность); τ_0 – период колебания кинетических единиц; U – эффективная энергия активации; U_0 – начальная энергия активации; γ – структурно-чувствительная константа; R – универсальная газовая постоянная; σ – напряжение; T – температура.

Из формулы (4) вытекает неизменность состояния вещества и постоянство констант во всем диапазоне температур и нагрузок. Однако для каждого вещества существует предельная температура, достигнув которой происходит его распад на фрагменты. Этой предельной температуре отвечает положение полюса [47, 63] (рис. 54). Формула (6) с учётом смещения полюса принимает вид:

$$\tau = \tau_m \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_m} \right) \right], \quad (7)$$

где $1/T_m$ – величина смещения температуры полюса.

Величина τ_m соответствует колебаниям химически несвязанных атомов или молекул в реальных решётках. Однако структура полимера дискретна, т.е. в реальный процесс разрушения "завязаны" разные релаксационные процессы, определяемые перемещением или распадом элементов структуры разной величины, поэтому τ_m оказывается размещённым в большом диапазоне времён и не равно 10^{-13} с [41, 59].

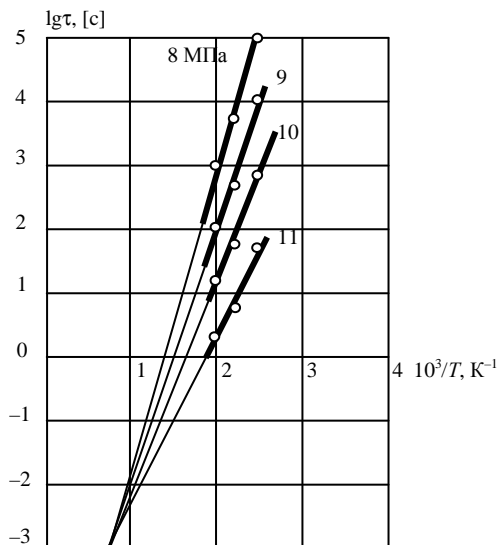


Рис. 54. Зависимость логарифма времени разрушения от обратной температуры при поперечном изгибе для ДСП плотностью 650 кг/м³

Введение в формулу (6) четвёртой константы T_m не отразилось ни на трактовке роли и вклада теплового движения и работы внешних сил, ни на физическом смысле констант U_0 и γ [46, 63].

В уравнении (7) T_m – предельная температура существования твёрдого тела, при которой все химические связи рвутся за одно тепловое колебание и вещество полностью распадается; τ_m – минимальное время разрушения вещества (при $T = T_m$) часто гораздо больше, чем $\tau_0 = 10^{-13}$ с; U_0 – максимальная энергия активации процесса разрушения или размягчения. Она определяет энергетический барьер работоспособности материала и связана с энергией связей, которые препятствуют свершению того или иного критического события, приводящего к данному предельному состоянию – потере целостности тела или его формы; γ – структурно-механическая константа, характеризующая эффективность механического поля при действии нагрузки. Величина γ пропорциональна прочности и имеет размерность объёма: $\gamma = \chi\omega$ (ω – флуктуационный объём, в котором происходит всплеск тепловой энергии, достаточной для разрыва лимитирующей связи и отвечает размерности химической связи, $\approx 10^{-23}$ см; χ – характеризует концентрацию перенапряжений на разрываемой связи).

Константы U_0 , T_m , τ_m различаются при разных предельных состояниях (разрушении и деформировании) и являются атомно-молекулярными характеристиками материала, не зависящими от вида нагрузки и напряжённого состояния; γ показывает, насколько снижается основной потенциал работоспособности материала U_0 при разрушении или деформировании.

Часто формула (7) не оправдывается. Это наблюдается при хрупком разрушении ряда полимеров и композитов на их основе. В результате получаем семейство прямых, которые в координатах $\lg t - \sigma$ и $\lg t - 1/T$ не сходятся в полюс (рис. 55, а). В этом случае реализуются два варианта формул:

$$\tau = B\sigma^{-m} \exp \frac{U}{RT}; \quad (8)$$

$$\tau = \tau_* \exp \frac{U}{RT} \exp(-\beta\sigma), \quad (9)$$

где τ_* – эмпирическая константа.

Формула (9) по роли нагрузки является промежуточной между формулой (7), в которой напряжение влияет экспоненциально (но совместно с температурой через отношение σ/T), и формулой (8), в которой напряжение действует независимо от температуры, как и в формуле (9), но менее сильно.

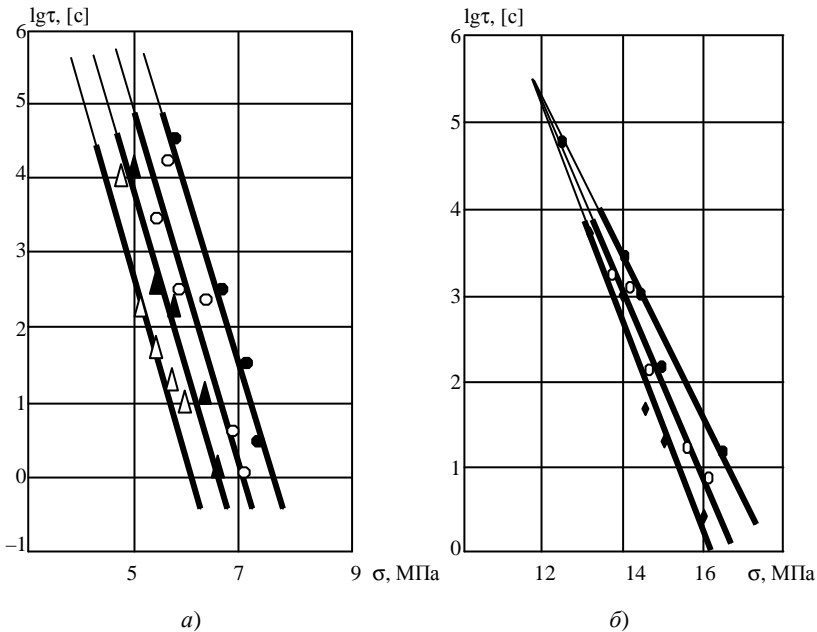


Рис. 55. Зависимость логарифма долговечности от напряжения:
a – при изгибе для ДСП плотностью 800 кг/м^3 ;
б – при сжатии для ДСП плотностью 800 кг/м^3

Наблюдаются также и случаи обращения пучка прямых: они сходятся в полюс не при предельно высокой, а при предельно низкой температуре (рис. 55, *б*).

$$\tau = \tau_m^* \exp \frac{U_0^* - \gamma^* \sigma}{RT} \left(\frac{T_m^*}{T} - 1 \right), \quad (10)$$

где τ_m^* , U_0^* , γ^* , T_m^* – эмпирические константы.

Трансформация вида температурно-временной зависимости, по-видимому, связана с нестабильностью структуры полимеров. В процессе длительных испытаний при вариации нагрузки и температуры происходит изменение константы γ по различным законам, в результате получаемые зависимости описываются уравнениями вида (8) – (10).

Формулы (7) – (10) выражают правило температурно-силовой временной эквивалентности, т.е. действие каждого параметра – температуры, нагрузки и времени – качественно одинаково. Поэтому повышение или понижение любого из них можно компенсировать изменением любого из двух других. Для одновременного повышения всех

этих трёх параметров необходимо направленно регулировать указанные выше константы: повышать T_m , τ_m , U_0 и понижать γ [48, 63].

Предельные значения границ работоспособности для прямого пучка, параллельных прямых и обратного пучка можно представить графически (рис. 56).

Из рисунка видно, что формально максимальная долговечность может быть бесконечной при абсолютном нуле, что нереально. При конечных температурах максимальная долговечность будет в отсутствии нагрузки; это отвечает времени, необходимому для термодеструкции [63].

Необходимо отметить, что в процессе эксплуатации все строительные конструкции работают под действием длительных нагрузок и температур, кроме того, они подвергаются действию агрессивных сред. В табл. 15 произведён анализ видов воздействия на конструкции с применением пенополистирола.

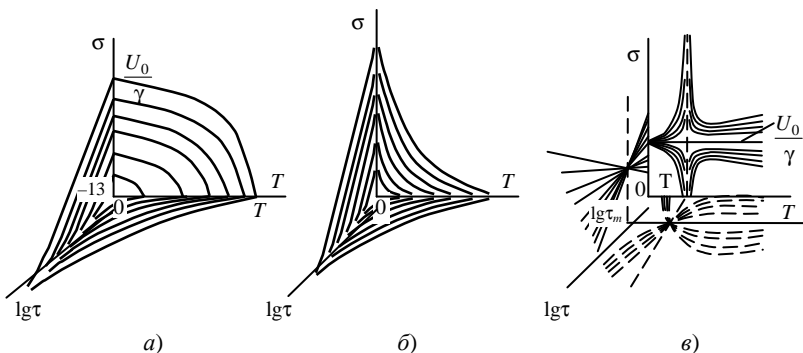


Рис. 56. Схема границ работоспособности композитных материалов для прямого пучка (а); параллельных прямых (б); обратного пучка (в)

15. Характер воздействий на пенополистирол в конструкциях утепления

Вид конструкций	Состав конструкции и характеристики материалов*	Основные виды воздействий
Утепление снаружи (гл. 9, рис. 21, б)	Силикатный кирпич на цементно-песчаном растворе [$\gamma = 1800 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,76 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 510 \text{ мм}$	Адгезия, концентрация напряжения, пенетрация, сжатие
	ПСБ-С [$\gamma = 35 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,037 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 80 \text{ мм}$	
	Сложный раствор (песок, известь, цемент) [$\gamma = 1700 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,7 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 30 \text{ мм}$	

Вид конструкций	Состав конструкции и характеристики материалов*	Основные виды воздействий	
Трёхслойная кирпичная стена (гл. 9, рис. 21, в)	Силикатный кирпич на цементно-песчаном растворе [$\gamma = 1800 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,76 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 250 (380) \text{ мм}$	Концентрация напряжения, пенетрация	
	ПСБ-С [$\gamma = 35 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,037 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 90 (80) \text{ мм}$		
	Силикатный кирпич на цементно-песчаном растворе [$\gamma = 1800 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,76 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 120 \text{ мм}$		
Трёхслойные панели	Железобетонные (гл. 9, рис. 21)	Железобетон [$\gamma = 2500 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 1,92 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 120 \text{ мм}$	Адгезия, термическое расширение, сжатие
		ПСБ-С [$\gamma = 35 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,037 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 100 \text{ мм}$	
		Железобетон [$\gamma = 2500 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 1,92 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 80 \text{ мм}$	
	Навесные [12]	а) ДСП [$\gamma = 700 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,11 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 20 \text{ мм}$	Адгезия, термическое расширение, поперечный изгиб, сжатие
		ПСБ-С [$\gamma = 35 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,037 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 90 \text{ мм}$	
		ДСП [$\gamma = 700 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,11 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 20 \text{ мм}$	
		б) ЦСП [$\gamma = 1350 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,17 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 20 \text{ мм}$	
		ПСБ-С [$\gamma = 35 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,037 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 100 \text{ мм}$	
		ЦСП [$\gamma = 1350 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,17 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 20 \text{ мм}$	
Несъёмная опалубка	"Velox" (гл. 9, рис. 2б)	а) ДСП [$\gamma = 700 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,11 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 20 \text{ мм}$	Сжатие, адгезия, термическое расширение
		ПСБ-С [$\gamma = 35 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,037 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 90 \text{ мм}$	

Вид конструкций	Состав конструкции и характеристики материалов *	Основные виды воздействий	
Несъёмная опалубка	"Velox" (гл. 9, рис. 26)	Сжатие, адгезия, термическое расширение	
		ДСП [$\gamma = 700 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,11 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 20 \text{ мм}$	
		б) ЦСП [$\gamma = 1350 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,17 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 20 \text{ мм}$	
		ПСБ-С [$\gamma = 35 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,037 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 100 \text{ мм}$	
		Бетон на гравии или щебне из природного камня [$\gamma = 2400 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 1,74 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 120 \dots 200 \text{ мм}$	
		ЦСП [$\gamma = 1350 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,17 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 20 \text{ мм}$	
	"Thermodom" (гл. 9, рис. 27)	ПСБ-С [$\gamma = 35 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,037 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 50 \text{ мм}$	Поперечный изгиб, климатические воздействия, концентрация напряжения, пенетрация, агрессивные среды
		Бетон на гравии или щебне из природного камня [$\gamma = 2400 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 1,74 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 230 \text{ мм}$	
		ПСБ-С [$\gamma = 35 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,037 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 50 \text{ мм}$	
	"Пластбау-3" (гл. 9, рис. 28)	ПСБ-С [$\gamma = 35 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,037 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 60 \text{ мм}$	Поперечный изгиб, климатические воздействия, концентрация напряжения, пенетрация, агрессивные среды
		Бетон на гравии или щебне из природного камня [$\gamma = 2400 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 1,74 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 120 \dots 200 \text{ мм}$	
		ПСБ-С [$\gamma = 35 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,037 \text{ Вт/(м·К)}$], $\delta = 50 \text{ мм}$	

Вид конструкции	Состав конструкции и характеристики материалов*	Основные виды воздействий	
Дорожные конструкции	Нежесткого типа (для автодороги III категории)	Изгиб, сжатие, климатические факторы, пенетрация, агрессивные среды, динамические воздействия, совместное действие изгиба и сжатия	
			Асфальтобетон высокоплотный [$\gamma = 2400 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 1,40 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$], $\delta = 90 \text{ мм}$
			Асфальтобетон пористый [$\gamma = 2300 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 1,25 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$], $\delta = 160 \text{ мм}$
			Щебёночно-гравийная-песчанная смесь, обработанная неорганическим вяжущим, марки 40 [$\gamma = 2000 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 2,10 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$], $\delta = 200 \text{ мм}$
			Песок мелкий [$\gamma = 1850 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 2,18 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$], $\delta = 300 \text{ мм}$
	Пенополистирольные плиты Техноплекс [$\gamma = 45 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,032 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$], $\delta = 40 \text{ мм}$		
	Жесткого типа (для автодороги III категории)	Сжатие, климатические факторы, пенетрация, агрессивные среды, динамические воздействия	
			Тяжёлый бетон класса В tb 2.8 [$\gamma = 2400 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 1,74 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$], $\delta = 220 \text{ мм}$
			Готовые песчано-щебёночные смеси 1 класса прочности, укрепленные портландцементом М-40 в количестве 4 ... 6% [$\gamma = 2000 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 2,02 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$], $\delta = 1800 \text{ мм}$
Песок мелкий [$\gamma = 1850 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 2,18 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$], $\delta = 300 \text{ мм}$			
Пенополистирольные плиты Техноплекс [$\gamma = 45 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 0,032 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$], $\delta = 40 \text{ мм}$			

* Для пенополистирола ПСБ-С марки М15 толщина будет 120 мм, а для М35 – 100 мм.

В [12] было проведено исследование долговечности пенополистирола марки ПСБ-С М35 и экструзионного пенополистирола ТЕХНОПЛЕКС 45 в [25] с позиций термоактивационной концепции прочности твёрдых тел. Испытания проводились при поперечном изгибе и сжатии до 10% относительной деформации по методике, изложенной в [48] при заданных постоянных температурах и напряжениях. По результатам исследований получены зависимости, приведённые на рис. 57. Значения констант, рассчитанные из этих зависимостей, представлены в табл. 16.

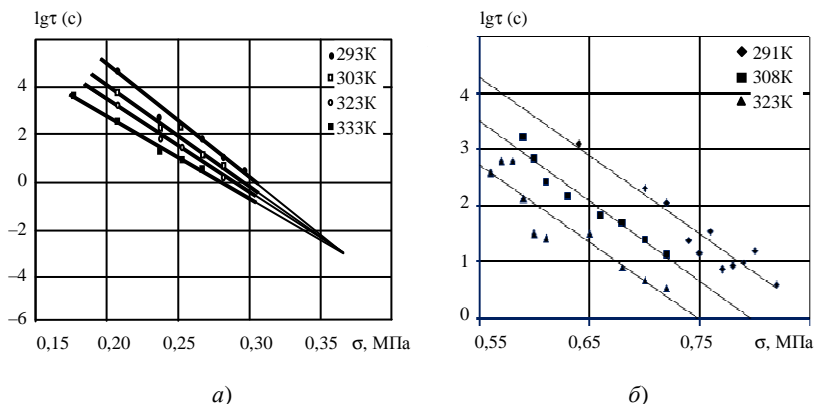


Рис. 57. Зависимости времени до разрушения от напряжения при поперечном изгибе:
a –пенополистирол ПСБ-СМ35; *б* – ТЕХНОПЛЕКС 45

16. Значения физических констант полистирола и пенополистирола ПСБ-С М35 и ТЕХНОПЛЕКС 45 при поперечном изгибе и сжатии до 10% относительной деформации

Тип пенополистирола	Физические константы			
	τ^*, τ_m, c	T_m, K	$U, U_0, \text{кДж/моль}$	$\gamma, \text{кДж}/(\text{моль} \cdot \text{МПа}), \beta, 1/\text{МПа}$
Поперечный изгиб				
ПСБ-С М35	$10^{-2,9}$	526,3	200	515,3
ТЕХНОПЛЕКС 45	$10^{-0,85}$	371,74	325	650
Сжатие до 10% относительной деформации				
ПСБ-С М35	$10^{-2,9}$	409,8	345	1811
ТЕХНОПЛЕКС 45	$2,9 \cdot 10^{-10}$	–	90,16	16

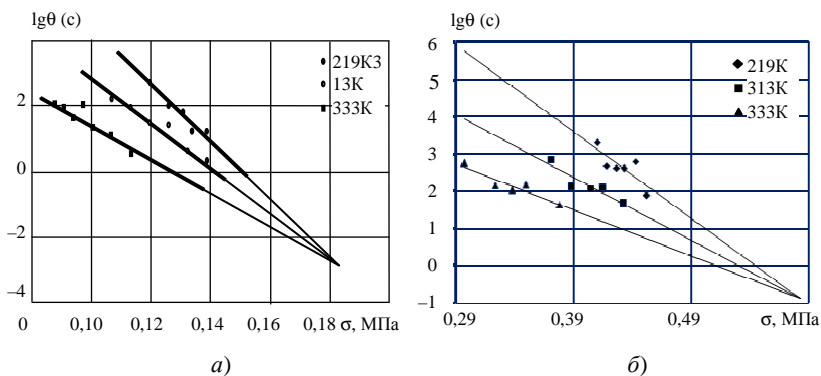


Рис. 58. Зависимости времени достижения относительной деформации 10% от напряжения:
a – пенополистирол ПСБ-С М35; *б* – ТЕХНОПЛЕКС 45

Семейства прямых на рис. 57, *a* и 58 имеют вид веерообразных прямых, сходящихся в одну точку – полюс и согласно [41] описываются уравнением (8). Семейство прямых, представленных на рис. 57, *б* является параллельным при различных температурах. В этом случае, согласно [63], реализуется формула (10). Подставив константы из таблицы 15 в уравнения (8), (10) можно прогнозировать долговечность (работоспособность материала).

Кинетическая концепция позволяет осуществлять прогноз долговечности с учётом всех видов воздействия и их комбинаций.

Прогнозирование долговечности пенополистирола в инженерных конструкциях необходимо проводить по методике, изложенной в прил. 1.

В прил. 2 проведён прогноз долговечности пенополистирола в реальных инженерных сооружениях с использованием экспериментальных зависимостей, представленных на рис. 56, 57 и значений табл. 16.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Активное развитие строительной индустрии и ужесточение требований к теплозащите конструкций зданий и сооружений требует применения наиболее эффективных утеплителей. Для грамотного применения пенополистирола в тех или иных конструкциях утепления необходимо иметь чёткое представление о его теплофизических и физико-механических свойствах. В данном пособии подробно рассмотрены современные конструктивно-технологические способы повышения теплозащиты наружных стен, в том числе с применением зарубежного опыта, подробно изложено применение пенополистирола в такой новой для него отрасли, как мостовое и дорожное строительство. Подробно рассмотрено изменение свойств пенополистирола во времени, а также приведены физико-механические характеристики наиболее распространённых видов и марок пенополистирола.

Особое внимание в пособии уделено вопросам долговечности пенополистирола при дополнительном утеплении различных инженерных сооружений. Подход к вопросам долговечности осуществлён с точки зрения термофлуктуационной концепции прочности твёрдых тел. Подробно описана методика, позволяющая прогнозировать долговечность пенополистирольных плит в таких конструкциях с учётом различных эксплуатационных воздействий, приведены примеры расчёта долговечности утеплителя в них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ball, G.W. The thermal conductivity of Isocyanate – based Rigid Cellular Plastics : Perfomance in Practice / G.W. Ball, W.G. Healy, J.B. Partington // The Evropean Journal of Cellular Plastics. – 1978. – V. 1. – № 1. – P. 50 – 63.

2. Chan, R. Mechanical properties Plastic foams. The dependence of Yield Stress and Modulus on the structural variables of Closed Cell and Open Cell foams / R. Chan, M. Nakamura // J. Cell. Plast. – 1969. – № 5. – P. 112 – 118.

3. Bueche, F. Physical properties of polymers / F. Bueche // A division of John Wiley & Sons. – New York – London, 1962. – P. 354.

4. Gent, A.N. Failure of foamed plastic materials / A.N. Gent, A.G. Thomas // Journal of Applied Science. – 1959. – № 6. – P. 108 – 111.

5. Hingst, U. Der Wärmetransport in Polystyrol – und Polyurethanschäumen bei tilfen Temperaturen / U. Hingst // Forchung in Ingenierwesen. – 1974. – V. 43. – № 6. – S. 185 – 190.

6. Styrodur – экструдированный пенополистирол фирмы BASF AG // Строительные материалы. – 1998. – № 3. – С. 18–19.

7. Victor, A. Mations. Elastic behaviour of low density rigid. Foams in structural applications / A. Victor // SPE Journal. – 1964. – № 9. – P. 83 – 87.

8. Бируля, А.К. Проектирование автомобильных дорог. Ч. 1 / А.К. Бируля. – 4-е изд., доп. и перераб. – М. : Научно-техническое издательство министерства автомобильного транспорта и автомобильных дорог, 1961.

9. Авдеев, Г.К. Исследование теплозащитных качеств ограждающих конструкций жилых домов, выполненных с использованием пластмасс : дис. ... канд. техн. наук / Г.К. Авдеев. – М., 1965. – 133 с.

10. Айнбиндер, С.Б. Свойства полимеров в различных напряжённых состояниях / С.Б. Айнбиндер, Э.Л. Тюнина, К.И. Цируле. – М. : Химия, 1981. – 232 с.

11. Александров, А.Я. Конструкции с заполнителями из пенопластов / А.Я. Александров, М.Я. Бородин, В.В. Павлов. – М. : Машиностроение, 1972. – 212 с.

12. Андрианов, К.А. Прогнозирование долговечности (работоспособности) пенополистирола в ограждающих конструкциях зданий : дис. ... канд. техн. наук / К.А. Андрианов. – Тамбов, 2002. – 212 с.

13. Анохин, В.В. "Термошуба" из Белоруссии – эффективный путь утепления фасадов / В.В. Анохин // Строительные материалы. – 1999. – № 2. – С. 18–19.

14. Берлин, А.А. Упрочнённые газонаполненные пластмассы / А.А. Берлин, Ф.А. Шутов. – М. : Химия, 1980. – 224 с.

15. Брандман, Г.С. Оценка длительных механических характеристик жёстких ячеистых пластических масс (обзор) / Г.С. Брандман, И.В. Шамов, А.Г. Дементьев и др. // Пластические массы. – 1985. – № 3. – С. 13 – 15.

16. Гуль, В.Е. Структура и механические свойства полимеров / В.Е. Гуль. – М. : Высш. шк., 1979. – 353 с.

17. Дементьев, А.Г. Структура и свойства пенопластов / А.Г. Дементьев, О.Г. Тараканов. – М. : Химия, 1983. – 176 с.

18. Дементьев, А.Г. Структура и свойства газонаполненных полимеров : дис. ... д-ра техн. наук / А.Г. Дементьев. – М., 1997. – 409 с.

19. Дементьев, А.Г. Влияние ячеистой структуры на теплопроводность жёстких закрытопористых пенополимеров при длительном старении / А.Г. Дементьев, М.А. Дементьев, П.А. Зингер и др. // Механика композитных материалов. – 1999. – № 2. – С. 187 – 198.

20. Дементьев, А.Г. Ячеистая структура и физико-механические свойства пенопластов / А.Г. Дементьев, О.Г. Тараканов // Пластические массы. – 1982. – № 3. – С. 17 – 20.

21. Деменцов, В.Н. Практическое применение высокоэффективного теплоизоляционного материала "STYROFOAM" / В.Н. Деменцов // Строительные материалы. – 1996. – № 6. – С. 18.

22. Дмитриев, А.Н. Энергосберегающие ограждающие конструкции гражданских зданий с эффективными утеплителями : дис. ... д-ра техн. наук / А.Н. Дмитриев. – М., 1999. – 353 с.

23. Дмитриев, П.А. Современные тенденции и принципы проектирования стеновых ограждающих конструкций малоэтажных жилых зданий / П.А. Дмитриев, Р.Б. Орлович // ИВУЗ "Строительство". – 1998. – № 1. – С. 4 – 11.

24. Иванов, Д.В. Исследование долговечности и теплофизических характеристик экструзионного пенополистирола в строительстве / Д.В. Иванов, К.А. Андрианов, В.П. Ярцев // Журн. Academia. Архитектура и строительство. – М. : НИИСФ РААСН, 2009. – № 5. – С. 559–560.

25. Канцельсон, М.Ю. Пластические массы. Справочник / М.Ю. Канцельсон, Г.А. Балаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1968. – 443 с.

26. Кац, М.С. Кинетическая природа микротвёрдости полимеров / М.С. Кац, В.Р. Регель, Т.П. Санфирова и др. // *Механика полимеров*. – 1973. – № 1. – С. 22 – 28.

27. Козлов, К.В. Исследование полистирольных беспрессовых пенопластов, применяемых в строительных конструкциях : дис. ... канд. техн. наук / К.В. Козлов. – М., 1969. – 225 с.

28. Колодкин, А.А. Экструдированный пенополистирол отечественного производства / А.А. Колодкин, В.П. Осипович, Г.А. Кудрявцева // *Строительные материалы*. – 1996. – № 6. – С. 11–12.

29. Комплектные системы "Тиги – Кнауф" : Проспект фирмы ЗАО "Тиги – Кнауф Маркетинг". – М., 1997. – 19 с.

30. Кулешов, И.В. Теплоизоляция из вспененных полимеров / И.В. Кулешов, Р.В. Торнер. – М. : Стройиздат, 1987. – 144 с.

31. Куприянов, А.В. Российский экструзионный пенополистирол "ПЕНОПЛЕКС" / А.В. Куприянов // *Строительные материалы*. – 2000. – № 9. – С. 22–23.

32. Мадорский, С. Термическое разложение органических полимеров / С. Мадорский. – М. : Мир, 1967. – 328 с.

33. Мацкевич, А.Ф. Несъёмная опалубка монолитных железобетонных конструкций / А.Ф. Мацкевич. – М. : Стройиздат, 1986. – 96 с.

34. Николаев, А.Ф. Синтетические полимеры и пластические массы на их основе / А.Ф. Николаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1966. – 768 с.

35. Овчинников, Е.Н. Система утепления фасадов «Шуба плюс» / Е.Н. Овчинников // *Строительные материалы*. – 2000. – № 8. – С. 15.

36. Павлов, В.А. Пенополистирол / В.А. Павлов. – М. : Химия, 1973. – 240 с.

37. Палиев, А.И. Пенополистирол "ТИГИ KNAUF" / А.И. Палиев // *Жилищное строительство*. – 1998. – № 8. – С. 28 – 31.

38. Палиев, А.И. Реконструкция с материалами и комплектными системами "ТИГИ – Кнауф" / А.И. Палиев // *Строительные материалы*. – 1995. – № 5. – С. 6–7.

39. Панфёров, К.В. О методах определения длительной прочности пенопластов / К.В. Панфёров, И.Г. Романенков, А.И. Вахрушев // *Заводская лаборатория*. – 1969. – № 1. – С. 103 – 105.

40. Писаренко, Г.С. Деформирование и прочность материалов при сложном напряжённом состоянии / Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев. – Киев : Наукова думка, 1976. – 415 с.

41. Полонская, М.И. Исследование долговечности, прочности и деформативности пенопластовых заполнителей ограждающих конструкций : дис. ... канд. техн. наук / М.И. Полонская. – М., 1978. – 337 с.

42. Пособие по физико-механическим характеристикам строительных пенопластов и сотопластов / И.Г. Романенков, К.В. Панферов и др. – М. : Стройиздат, 1977. – 289 с.

43. Практическое руководство по производству тепловых расчётов оснований в районах с вечномёрзлыми грунтами / Министерство строительства предприятий тяжёлой индустрии СССР, Проектный и научно-исследовательский институт "Красноярский ПРОМСТРОЙ-НИИПРОЕКТ". – Красноярск, 1976.

44. Прикладная механика ячеистых пластмасс : пер. с англ. / под ред. Н.К. Хильярда. – М. : Мир, 1985. – 360 с.

45. Пугачев, И.Н. Анализ данных влияния температуры воздуха на температуру промерзания и оттаивания грунта земляного полотна на глубинах и использование их для назначения сроков ограничения пропуска автомобильной нагрузки разной грузоподъёмности / И.Н. Пугачев. – Хабаровск : Хабаровский государственный технический университет, 2001. – 9 с.

46. Расс, Ф.В. Ползучесть пенополистирола при сдвиге периодически изменяющейся нагрузкой / Ф.В. Расс, Л.В. Сурова // Механика композитных материалов. – 1983. – № 2. – С. 355 – 359.

47. Ратнер, С.Б. Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? / С.Б. Ратнер, В.П. Ярцев. – М. : Химия, 1992. – 320 с.

48. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твёрдых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М. : Наука, 1974. – 560 с.

49. Романенков, И.Г. Исследование прочности и деформативности строительных пенных и сотовых пластмасс применительно к работе лёгких конструкций : дис. ... д-ра техн. наук. – М., 1974. – 355 с.

50. Романенков, И.Г. Физико-механические свойства пенных пластмасс / И.Г. Романенков. – М. : Госстандарт, 1970. – 170 с.

51. Рувинский, В.И. Оптимальные конструкции земляного полотна / В.И. Рувинский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1992. – 240 с.

52. Рувинский, В.И. Пособие по устройству теплоизолирующих слоёв из пенопласта Styrofoam на автомобильных дорогах России / В.И. Рувинский. – М. : Транспорт, 2000. – 71 с.

53. Рувинский, В.И. Эффективность применения пенопласта в дорожном строительстве России / В.И. Рувинский. – М. : Транспорт, 1996. – 72 с.

54. Система наружного утепления зданий : Проспект фирмы ООО "ТЕПЛО – АВАНГАРД". – М., 2000.

55. Справочник по пластическим массам. Т. 11 / под ред. : В.М. Катаева, В.А. Попова, Б.И. Сажина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1975. – 568 с.

56. Тагер, А.А. Физикохимия полимеров / А.А. Тагер. – 3-е изд., перераб. – М. : Химия, 1978. – 544 с.

57. Теплозащита зданий в современном строительстве // Жилищное строительство. – 1999. – № 2. – С. 31.

58. Теплоизоляция строительных конструкций материалами фирмы "NESTE Chemicals" // Строительные материалы. – 1996. – № 6. – С. 19–20.

59. Устройство дополнительной теплоизоляции : Проспект фирмы ОАО "СИБАРТ". – М., 1999.

60. Фридман, О.А. Получение материалов из пенополистирола методом экструзии / О.А. Фридман, В.Г. Малейкович, В.С. Конюченко и др. // Пластические массы. – 1972. – № 11. – С. 35 – 37.

61. Хайлов, Б.А. Технология производства и опыт применения в строительстве пенополистирольных комплексных систем "ТИГИ – Кнауф" / Б.А. Хайлов, А.И. Палиев // Строительные материалы. – 1995. – № 3. – С. 24 – 29.

62. Швецов, Г.А. Технология переработки пластических масс / Г.А. Швецов, Д.У. Алимова, М.Д. Барышникова ; под ред. Г.А. Швецова. – М. : Химия, 1988. – 512 с.

63. Ярцев, В.П. Физико-технические основы работоспособности органических материалов в деталях и конструкциях : дис. ... д-ра техн. наук / В.П. Ярцев. – Воронеж, 1998. – 350 с.

64. Ярцев, В.П. Влияние модифицирования пропиткой на долговечность пенополистирола до и после УФ-облучения / В.П. Ярцев, А.А. Ширяев // Композиционные строительные материалы. Теория и практика. – Пенза, 2009. – С. 131 – 134.

НОРМАТИВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

65. ГОСТ 15588–86. Плиты пенополистирольные. Технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1986.

66. Гост 22733–90. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. – М. : Изд-во стандартов, 1990.

67. Методические рекомендации по проектированию и устройству теплоизоляционных слоёв дорожной одежды из пенополистирольных плит "Пеноплэкс". – Введ. с 01.01.01 распоряжением № 00-35-р от 20.12.2000 М-ва транспорта РФ. – М., 2000.

68. ОДН 218 046–01. Проектирование нежёстких дорожных одежд / Государств. служба дорожного хозяйства м-ва транспорта РФ. – М., 2001.

69. П 3-2000 к СНИП 3.03.01–87. Проектирование и устройство тепловой изоляции ограждающих конструкций жилых зданий. – М., 1987.

70. СНИП 2.05.02–85*. Автомобильные дороги.

71. СНИП 23-02–2003. Тепловая защита зданий.

72. СНИП 32-03–96. Аэродромы.

73. СП (Свод правил) 23-101–2004. Проектирование тепловой защиты зданий.

74. Строительные системы "ТЕХНОНИКОЛЬ". Нормативная и проектная документация.

75. Ярцев, В.П. Технические условия и основные этапы методики прогнозирования долговечности фанеры в строительных изделиях // В.П. Ярцев, А.В. Сузюмов. – Тамбов : Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2010.

ИНТЕРНЕТ-ИСТОЧНИКИ

76. <http://www.gusad.nnov.ru/>

77. <http://www.polymer.ru/>

78. ru.wikipedia.org/wiki/

79. www.polistirol.ru/

80. www.rdstroy.ru/

81. www.avtan-izh.narod.ru/

82. www.belteplo.by/aterials/uteplenie-iznutri/

83. www.kao23.mass.hc.ru/

84. www.parebrik.ru/

85. www.penoplast-torg\page202.ru/

86. www.penoplex.ru/

87. www.plast-tech.ru/content/tematika-zapisi/polimernye-materialy/penoplasty

88. www.polymerbranch.com/

89. www.propenoplast.ru/

90. www.proseptic.ru/
91. www.s-nip.ru/
92. www.spbgasu.ru/
93. www.tdbutovo.ru/
94. www.tdpsm.ru/
95. www.technoplex.ru/
96. www.termogroups.ru/
97. www.torg.rusexp.su/
98. www.incompen.ru/

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

В связи с тем, что температура и другие внешние воздействия резко влияют на прочность и долговечность пенополистирола прогноз долговечности возможно провести по методике [75], основанной на термофлуктуационной концепции разрушения и деформирования.

1. Для пенополистирола в конкретном изделии или конструкции определяется характер силового воздействия, т.е. вид действующего статического нагружения.

2. Определяются напряжения (σ), возникающие в материале и температуры эксплуатации (T), а также внутренние и внешние факторы, влияющие на долговечность (агрессивные среды, климатические воздействия и т.д.).

3. В режиме заданных постоянных напряжений и температур проводятся длительные испытания образцов фанеры. Полученные зависимости обрабатываются в координатах: логарифм времени до разрушения $\lg(\tau)$ или критического деформирования $\lg(\theta)$ от напряжения (σ) и температуры (T). Экспериментальные результаты представляют различные семейства прямых.

4. Определяется характер зависимостей долговечности при разрушении или деформировании и устанавливаются описывающие их уравнения.

5. Графоаналитическим способом определяются константы входящие в уравнения долговечности (7) и (10).

6. Зная величины констант при установленных эксплуатационных параметрах (σ и T) по аналитическим зависимостям рассчитывается теоретическая долговечность $\lg(\tau)$ – время потери формы или разрушения.

Образцы для испытаний изготавливают согласно [65], однако их следует вырезать в направлении вспенивания плиты (реальное положение утеплителя в конструкции) и они должны иметь поверхностную плёнку, в отличие от [65], в котором рекомендуется механическое изготовление образцов, при котором нарушается структура материала и

увеличивается содержание дефектов. Поскольку в пенопласте происходят колебания плотности по высоте блока (см. гл. 1), то образцы выбираются на каждую точку испытаний, исходя из их средней кажущейся плотности.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Методика проведения кратковременных и длительных испытаний при разрушении поперечным изгибом. Длительные испытания при разрушении поперечным изгибом проводят в режиме заданных постоянных напряжений и температур (в интервале от 16 до 80°C) по следующей методике. Образцы выдерживают при заданной температуре в течение часа (термостатируют), помещают в испытательную секцию установки и нагружают до определённой величины. В результате испытаний фиксируют время от момента начала нагружения до разрушения образца.

При проведении кратковременных испытаний образцы ступенчато нагружают до их полного разрушения. В итоге фиксируют максимальную нагрузку, выдерживаемую материалом. В одинаковых условиях для получения одной точки испытывают шесть образцов. За конечный результат принимают их среднее арифметическое значение.

Методика проведения испытаний на долговечность при деформировании длительным сжатием и пенетрацией. Испытания образцов на долговечность при деформировании сжатием и пенетрацией проводят по следующей методике.

До приложения нагрузки образцы термостатируют в течение часа. Затем при заданной температуре и напряжении (твёрдости) с помощью секундомера фиксируют время погружения индентора на заданную глубину (h), при деформировании пенетрацией, или достижения заданной деформации (ϵ) при деформировании сжатием. Для серии образцов фиксируют изменение величины деформации через определённые промежутки времени с помощью индикатора часового типа. Эксперимент проводят при различных температурах (18 ... 60 °C) и трёх напряжениях (твёрдости). Для получения одной точки в одинаковых условиях испытывают 5–6 образцов. За конечный результат принимают их среднее арифметическое значение.

Методика проведения испытаний при воздействии жидких сред. Методика проведения испытаний на водопоглощение и набухание. Испытания проводят на водопоглощение фанеры по массе и

набухание по толщине. Для проведения испытаний используют предварительно взвешенные образцы которые погружают полностью в емкость с водой, при температуре 2 ... 20 °С. Через определённые промежутки времени образцы извлекают из воды, протирают фильтровальной бумагой и фиксируют изменение массы и толщины.

На основании этих измерений производят вычисление водопоглощения и набухания.

Методика проведения испытаний при воздействии жидких агрессивных сред. Для различных агрессивных сред проводят испытания на кратковременную и длительную прочность (долговечность) фанеры, а также определяют набухание по её толщине и поглощение среды.

Испытания проводят по методике, изложенной выше. Для определения химической стойкости фанеры образцы выдерживают заданное время в агрессивной среде, а затем подвергают испытаниям на кратковременную и длительную прочность при поперечном изгибе.

Методика проведения испытаний при климатических воздействиях. Методика проведения испытаний в натуральных условиях. Испытания в натуральных условиях проводят на долговечность при разрушении поперечным изгибом и деформировании (пенетрации) на установках, приведённых в [12, 75]. От прямого воздействия дождя и снега образцы изолируют специальным навесом. Колебания температуры фиксируют с помощью спиртового термометра. В процессе испытаний при разных напряжениях определяют долговечность (время до разрушения образца).

Методика проведения испытаний на тепловое старение и УФ-облучение. Испытания на тепловое старение и УФ-облучение проводят следующим образом. В течение заданного времени образцы подвергают тепловой обработке (рекомендуемая температура прогрева от 50 до 80 °С), или выдерживают определённое время под лампами ПРК. После старения их охлаждают при комнатной температуре. После чего подвергают испытаниям на кратковременную прочность при разрушении поперечным изгибом, деформировании (пенетрации), а также на водопоглощение и набухание.

Последовательность проведения испытаний на водопоглощение, набухание, кратковременную прочность при разрушении поперечным изгибом приведены выше.

Методика проведения циклических испытаний при воздействии замораживания-оттаивания. Испытания при воздействии замо-

раживания-оттаивания проводят следующим образом. Образцы замачивают в воде в течение часа при температуре 2 ... 20 °С, затем замораживают в морозильной камере в течение 3 – 5 часов при температуре – 20 °С. Замороженные образцы вытаскивают из морозильной камеры и оттаивают при комнатной температуре в течение 18 ... 20 часов. После оттаивания их подвергают испытаниям на долговечность при разрушении и деформировании по методике предлагаемой выше.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ И ЭМПИРИЧЕСКИХ КОНСТАНТ

Методика определения физических термофлуктуационных констант графоаналитическим методом. Для пенополистирола ПСБ М35 при разрушении наблюдается зависимость в виде классического "прямого" пучка, описываемого уравнением (7) и представленного на рис. 59.

Определение физических термофлуктуационных констант для зависимости в виде "прямого" пучка, полученного при разрушении, осуществляют графоаналитическим способом, по схеме, показанной на рис. 59.

Согласно схеме, полученные экспериментальные значения выстраивают в координатах логарифма долговечности ($\lg \tau$) от напряжения (σ) (рис. 59, а), а затем перестраивают в виде зависимости логарифма долговечности от обратной температуры ($10^3/T$), из которой определяют по положению полюса (П) физические константы τ_m и T_m (рис. 59, б). Затем, по формуле

$$U(\sigma) = 2,3R \frac{\Delta \lg \tau}{\Delta(10^3/T)} \quad (11)$$

для каждого напряжения вычисляют значения энергии активации, и строят график зависимости полученных значений U от напряжения (σ) (рис. 59, в). Экстраполяцией прямой на ось ординат получают максимальную энергию активации (U_0), а определяя тангенс угла наклона прямой – величину структурно-механической константы γ . При деформировании долговечность описывается уравнением (7), однако константы, входящие в уравнение имеют другой смысл (см. гл. 10).

Процесс деформирования так же подчиняется принципу температурно-временной силовой эквивалентности. Физические константы, входящие в уравнение (7), определяются графоаналитическим способом так же как, при разрушении.

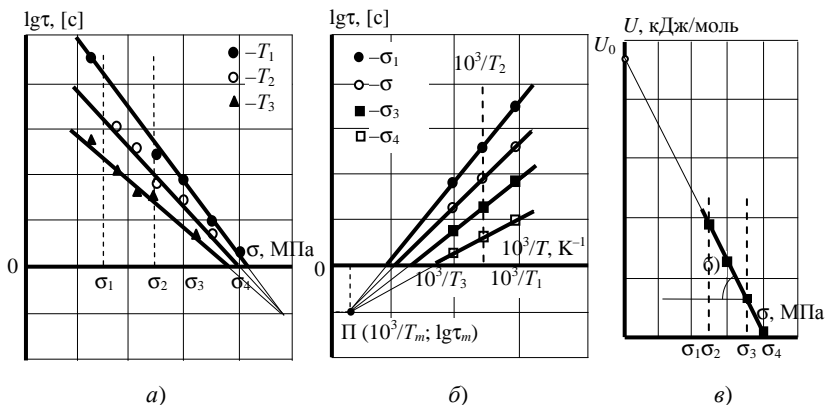


Рис. 59. Схема определения физических констант для «прямого пучка»

**ПРИМЕРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
(РАБОТОСПОСОБНОСТИ) В КОНСТРУКЦИЯХ УТЕПЛЕНИЯ**

Рассмотрим в качестве примера определение долговечности пенопласта ПСБ-С М35 при применении его в *несъёмной опалубке*. Для этого вида конструкций долговечность (работоспособность) утеплителя зависит от действующего на него напряжения [12].

Рассмотрим несъёмную опалубку фирмы "Velox" (см. гл. 9, рис. 26).

Для расчёта несъёмной опалубки фирмы "Velox" характеристики материалов взяты из табл. 16 [12]; схема ограждающей конструкции приведена на рис. 60. Расчёт ведём в следующей последовательности.

Определяем давление бетонной смеси, согласно

$$P = \gamma h = 24 \cdot 0,5 = 12 \cdot 10^{-3} \text{ (МПа)}, \quad (12)$$

где γ – объёмный вес бетонной смеси; h – высота панели.

В качестве расчётной схемы принимаем однопролётную балку, нагруженную равномерно распределённой нагрузкой. Для расчёта на несущую способность вырежем полосу длиной 1 м. Нагрузка, действующая на материалы опалубки

$$q = P/2 = 12 \cdot 10^{-3} / 2 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ (МПа)}. \quad (13)$$

Древесностружечная плита работает на поперечный изгиб. Поэтому напряжение, воспринимаемое плитой от давления бетонной смеси, определяем по формуле:

$$\sigma_{\text{изг}} = M/W = 0,188 \cdot 10^{-3} / 3,3 \cdot 10^{-5} = 5,7 \text{ (МПа)}, \quad (14)$$

где $M_{\text{ДСП}} = (qh^2)/8 = (6 \cdot 0,52^2)/8 = 0,188 \text{ (кН}\cdot\text{м)}$ – изгибающий момент, действующий на ДСП; $W_{\text{ДСП}} = (hb^2)/6 = (0,5 \cdot 0,022^2)/6 = 3,3 \cdot 10^{-5} \text{ (м}^3\text{)}$ – момент сопротивления, b – толщина панели.

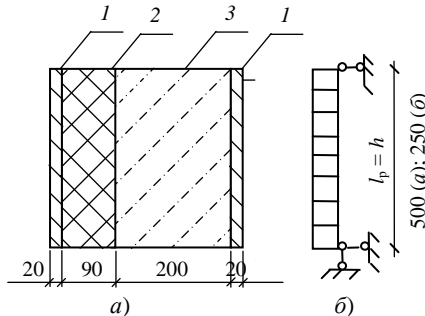


Рис. 60. Схемы конструкций стен несъёмной опалубки:

a – "Velox"; *б* – расчётная схема; 1 – ДСП; 2 – пенополистирол; 3 – бетон

Пенополистирол работает на сжатие, поскольку с наружной стороны ДСП препятствует его изгибу. Напряжение при сжатии определяем по формуле:

$$\sigma_{\text{сж}} = N/A = 1,5 \cdot 10^{-3} / 0,045 = 0,033 \text{ (МПа)}, \quad (15)$$

где $N_{\text{ППС}} = (qh)/2 = (6 \cdot 0,5)/2 = 1,5 \text{ (кН)}$ – нагрузка, приложенная к пенополистиролу; $A_{\text{ППС}} = bh = 0,09 \cdot 0,5 = 0,045 \text{ (м}^2\text{)}$ – площадь утеплителя, воспринимающая нагрузку от бетонной смеси.

Долговечность ДСП и пенополистирола должна быть не менее 28 суток (время твердения бетонной смеси), т.е. $\tau(\theta) = 10^{6,4}$. Рассчитанные её значения по формулам (10) – для ДСП и (8) – для пенополистирола приведены в табл. 16. Полученные результаты показали, что ДСП и пенополистирол марки М35 удовлетворяют данному требованию.

17. Долговечность материалов, определённая по уравнениям (7) и (10)*

Вид материала	Вид нагрузки	Вид несъёмной опалубки
		"Velox"
ПСБ-С М35	Поперечный изгиб (τ), с	–
	Сжатие при деформации 10% (θ), с	1011,6
ДСП	Поперечный изгиб (τ), с	109,3

* $T = 18 \text{ }^\circ\text{C}$; $\sigma_{\text{сж}} = 0,033 \text{ МПа}$; $\sigma_{\text{изг}} = 5,7 \text{ МПа}$.

Для экструзионного пенополистирола рассмотрим в качестве примера расчёт долговечности в **дорожной конструкции**. Для этого вида конструкций долговечность (работоспособность) утеплителя так же зависит от действующего на него напряжения. На рисунке 61 приведён пример эффективного применения экструзионного пенополистирола



Рис. 61. Конструкция нежёсткой дорожной одежды с применением экструзионного пенополистирола ТЕХНОПЛЕКС 45 для дороги III категории

в конструкции дорожной одежды для дороги III категории, запроектированной для наиболее неблагоприятных условий Тамбовской области (3 тип местности по условиям увлажнения, в основании применён третий по степени пучинистости грунт – супесь лёгкая). Конструкция дорожной одежды запроектирована в соответствии с требованиями [65, 66, 68].

Действующие на материал напряжения вычисляются по методике, изложенной в [8]. В этом случае для определения напряжённо-деформированного состояния, возникающего в земляном полотне и слоях дорожной одежды, многослойную конструкцию с неоднородными свойствами слоёв приводят к эквивалентному однородному массиву.

Эквивалентная толщина дорожной одежды определяется зависимостью:

$$z_3 = z^{2,5} \sqrt{E_{\text{верх}}/E_{\text{ниж}}}, \quad (16)$$

где z – толщина слоя покрытия; $E_{\text{верх}}$, $E_{\text{ниж}}$ – соответственно модули упругости вышележащего и нижележащего слоёв.

Значения напряжений можно определить по формуле М.И. Якунина [8]:

$$\sigma_z = \frac{\rho_0}{1 + (z_3/D)^2}, \quad (17)$$

где ρ_0 – давление колеса на покрытие, z_3 – эквивалентная толщина дорожной одежды, D – диаметр круга, равновеликого площади контакта колеса с покрытием.

Кроме внешней нагрузки на материал действует собственный вес грунта и вес дорожной одежды. Пример расчёта распределения напряжений приведён на рис. 62.

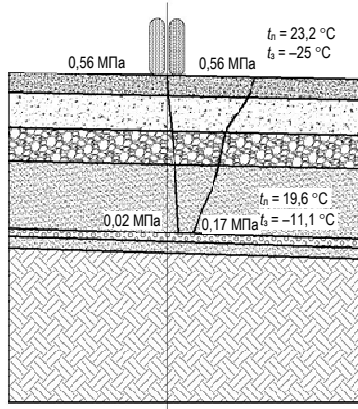


Рис. 62. Распределение напряжений от собственного веса и внешней нагрузки. Распределение температуры на поверхности пенополистирольных плит ТЕХНОПЛЕКС 45

Методика, предложенная в [43], позволяет определить температуру в земляном полотне, зная температуру поверхности грунтов открытого поля. Уравнение для вычисления температуры в любой плоскости дорожной конструкции или открытого поля имеет следующий вид:

$$t_n = t_B + \frac{t_T - t_B}{R} (R_n + \sum R_n), \quad (18)$$

где $\sum R_n$ – суммарное тепловое сопротивление вышележащих n -х слоёв; R – тепловое сопротивление дорожной конструкции; t_B – температура воздуха; t_T – температура грунта; t_n – температура в рассматриваемом слое.

Температура грунта определяется с определённой вероятностью по климатическим данным региона. Среднегодовая температура участков естественной поверхности рассчитывается по формуле [45]:

$$t_T = t_B + \frac{B - LE}{\alpha_k} + 0,07 A_M \sqrt{R_{сн}}, \quad (19)$$

где t_T – температура поверхности грунта; t_B – температура воздуха; B – радиационный баланс, ккал/м²·мес; LE – затраты тепла на испарение, ккал/м²·мес; A_M – годовая амплитуда колебаний температуры воздуха, град; $R_{сн}$ – термическое сопротивление снега, м²·час·град/ккал; α_k – коэффициент теплоотдачи, ккал/м²·час·град.

При помощи данной методики была определена температура на поверхности пенополистирольных плит в летний и зимний периоды эксплуатации (рис. 61).

С учётом вышеизложенного, в табл. 18 вычислена долговечность экструзионного пенополистирола для конструкции дорожной одежды, приведенной на рис. 60.

18. Долговечность экструзионного пенополистирола ТЕХНОПЛЕКС 45

Категория дороги		Долговечность τ , с	
		Изгиб	Сжатие
III	лето	$10^{5,37}$	$10^{9,90}$
	зима	$10^{7,25}$	$10^{15,47}$

19. Технические характеристики экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС (ТУ 5767-006-56925804–2007)

Наименование	Метод испытаний	Размерность	Показатели плит ПЕНОПЛЭКС®				
			31С	31	35	45С	45
Плотность	ГОСТ 15588–86	кг/м ³	28,0 ... 30,5	25,0 ... 30,5	28,0 ... 37,0	35,0 ... 40,0	38,1 ... 45,0
Прочность на сжатие при 10% линейной деформации, не менее	ГОСТ 17177–94	МПа	0,20	0,20	0,25	0,41	0,50
Предел прочности при статическом изгибе, не менее	ГОСТ 17177–94	МПа	0,25	0,25	0,4	0,4	0,4-0,7
Модуль упругости	СОЮЗ-ДОРНИИ	МПа	15	15	15	18	18
Водопоглощение за 24 часа, не более	ГОСТ 17177–94	% по объёму	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2
Водопоглощение за 30 суток, не более	ГОСТ 17177–94	% по объёму	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4
Категория стойкости к огню	СНиП 21-01-97	группа	Г4	Г1	Г1	Г4	Г4
Коэффициент теплопроводности при (25 ± 5)°С	ГОСТ 7076–94	Вт/(м·°С)	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
Расчётный коэффициент теплопроводности при условиях эксплуатации "А"	СП 23-101–2004	Вт/(м·°С)	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031
Расчётный коэффициент теплопроводности при условиях эксплуатации "Б"			0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
Теплоусвоение при условиях "А" (при периоде 24 часа)			0,36	0,36	0,36	0,40	0,40
Теплоусвоение при условиях "Б" (при периоде 24 часа)			0,37	0,36	0,37	0,42	0,42
Коэффициент паропроницаемости	ГОСТ 25898–83	мг/(м·ч·Па)	0,018	0,018	0,018	0,015	0,015
Удельная теплоёмкость, с ₀	СП 23-101–2004	кДж/(кг·°С)	1,65	1,65	1,65	1,53	1,53
Звукоизоляция перегородки (ГКЛ-ПЕНОПЛЭКС®50 мм-ГКЛ), R _w	ГОСТ 27296–87	дБ	41	41	41	–	–
Индекс улучшения изоляции структурного шума в конструкции пола	ГОСТ 16297–80	дБ	23	23	23	–	–
Температурный диапазон эксплуатации		°С	–50 ... +75				

20. Технические характеристики экструзионного пенополистирола ТЕХНОПЛЕКС (ТУ 2244-047-17925162–2006)

Наименование	Метод испытаний	Размерность	Показатели плит ТЕХНОПЛЕКС					
			30 ... 250С	30 ... 250	35 ... 250С	35 ... 250	45 ... 500С	45 ... 500
Плотность	ГОСТ 15588–86	кг/м ³	25,0 ... 30,0	25,0 ... 30,0	30,1 ... 38,0	30,1 ... 38,0	38,1 ... 45,0	38,1 ... 45,0
Прочность на сжатие при 10% линейной деформации, не менее	ГОСТ 17177–94	МПа	0,2	0,2	0,25	0,25	0,5	0,5
Предел прочности при статическом изгибе, не менее	ГОСТ 17177–94	МПа	0,3	0,3	0,35	0,35	0,35	0,35
Модуль упругости	СОЮЗ-ДОРНИИ	МПа	18	18	18	20	20	20
Водопоглощение за 24 часа, не более	ГОСТ 17177–94	% по объёму	0,2	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2
Водопоглощение за 30 суток, не более	ГОСТ 17177–94	% по объёму	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Категория стойкости к огню	СНиП 21-01-97	группа	Г4	Г1	Г4	Г1	Г4	Г4
Коэффициент теплопроводности при (25 ± 5)°С	ГОСТ 7076–94	Вт/(м·°С)	0,029	0,029	0,029	0,029	0,03	0,03
Расчётный коэффициент теплопроводности при условиях эксплуатации "А"	СП 23-101–2004	Вт/(м·°С)	0,031	0,031	0,031	0,031	0,032	0,032
Расчётный коэффициент теплопроводности при условиях эксплуатации "Б"			0,031	0,031	0,031	0,031	0,032	0,032
Коэффициент паропроницаемости	ГОСТ 25898–83	мг/(м·ч·Па)	0,011	0,011	0,01	0,01	0,005	0,005
Удельная теплоёмкость, с ₀	СП 23-101–2004	кДж/(кг·°С)	1,65	1,65	1,65	1,65	1,53	1,53
Температурный диапазон эксплуатации		°С	–50 ... +75					

21. Технические характеристики экструзионного пенополистирола STYROFOAM (ТУ 2244-001-42809359-02)

Наименование	Метод испытаний	Размерность	Показатели плит STYROFOAM							
			STYROFOAM 250 А	STYROFOAM 300 А	STYROFOAM 500 А	STYROFOAM IB 250-А	STYROFOAM IBF 250-А	STYROFOAM GEO 350 А	STYROFOAM GEO 500 А	STYROFOAM GEO 700 А
Плотность	ГОСТ 15588–86	кг/м ³	32	32	38	32	32	34	38	45
Прочность на сжатие при 10% линейной деформации, не менее	ГОСТ 17177–94	МПа	0,25	0,30	0,50	0,25	0,30	350	500	700
Водопогло- щение за 30 суток, не более	ГОСТ 17177–94	% по объёму	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5	0,2	0,2	0,2
Категория стойкости к огню	СНиП 21-01–97	группа	Г 1	Г 1	Г 1	Г 1	Г 1	Г 4	Г 4	Г 4
Коэффициент теплопрово- дности при (25 ± 5)°С	ГОСТ 7076–94	Вт/ (м·°С)	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
Коэффициент паро- проницаемости	ГОСТ 25898–83	мг/ (м·ч·Па)	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
Температурный диапазон эксплуатации		°С	от –160 до +75							

22. Технические характеристики пенополистирола, изготовленного по беспрессовой технологии (ГОСТ 15588–86)

Наименование	Метод испытаний	Размерность	Показатели плит ПСБ-С			
			ПСБ-С 15	ПСБ-С 25	ПСБ-С 35	ПСБ-С 50
Плотность	ГОСТ 17177–94	кг/м ³	До 12	15,1 ... 25	25,1 ... 35	35,1 ... 50,00
Прочность на сжатие при 10% линейной деформации, не менее	ГОСТ 17177–94	МПа	0,02	0,02	0,16	0,20
Предел прочности при статическом изгибе, не менее	ГОСТ 17177–94	МПа	0,04	0,18	0,25	0,35
Водопоглощение за 24 часа, не более	ГОСТ 17177–94	% по объёму	4,0	2,0	2,0	1,8
Коэффициент теплопроводности при (25 ± 5)°С	ГОСТ 7076–94	Вт/(м·°С)	0,043	0,039	0,037	0,040
Температурный диапазон эксплуатации		°С	–50 ... +75			

23. Технические характеристики пенополистирола, изготовленного по прессовой технологии (ТУ 2244-461-05761784–01)

Наименование	Метод испытаний	Размерность	Показатели плит ПС						
			ПС-4-40	ПС-4-60	ПС-1-100	ПС-1-150	ПС-1-200	ПС-1-350	ПС-1-600
Плотность	ГОСТ 17177–94	кг/м ³	40 ± 5	60 ± 20	100 ± 20	150 ± 30	200 ± 20	350 ± 50	600 ± 50
Прочность на сжатие при 10% линейной деформации, не менее*	ГОСТ 17177–94	МПа	0,17	0,30	0,8	1,50	3,00	7,00	7,00
Водопоглощение за 24 часа, не более	ГОСТ 17177–94	% по объёму	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Коэффициент теплопроводности при (25 ± 5)°С	ГОСТ 7076–94	Вт/(м·°С)	0,017	0,022	0,026	0,031	0,039	0,043	0,047
Температурный диапазон эксплуатации		°С	–65 ... +70			–60 ... +65			

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕНОПЛАСТОВ	5
2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА	8
3. СТРУКТУРА ПЕНОПОЛИСТИРОЛА	15
4. ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПЕНОПОЛИСТИРОЛА	18
5. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕНОПОЛИ- СТИРОЛА	25
6. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕНОПОЛИСТИРОЛА	34
7. ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЧНО- СТНЫЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕНОПОЛИ- СТИРОЛА. СТАРЕНИЕ	39
8. ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА МЕХАНИЧЕС- КИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА	41
9. ПРИМЕНЕНИЕ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА В ОГРАЖДАЮЩИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ И ДОРОЖНЫХ ОДЕЖДАХ	50
10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЕНОПОЛИСТИРОЛА В КОНСТРУКЦИЯХ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ	89
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	100
ПРИЛОЖЕНИЯ	107