

К.А.АНДРИАНОВ, инженер, В.П.ЯРЦЕВ, доктор технических наук (Тамбов)

Пенополистирол для ограждающих конструкций

Для соблюдения требований новых норм СНиП II-3-79* "Строительная теплотехника" необходимо устраивать дополнительную теплоизоляцию зданий эффективными утеплителями, среди которых наибольшее распространение получил пенополистирол.

Поскольку новые требования к теплозащите зданий вступили в действие сравнительно недавно, опыта эксплуатации конструкций утепления мало, и методика прогнозирования их долговечности еще не разработана.

При утеплении наружных стен зданий многослойными конструкциями их долговечность зависит в первую очередь от утеплителя.

Физической основой исследований по разработке методики прогнозирования долговечности пенополистирола является кинетическая термофлуктуационная концепция разрушения и деформирования, согласно которой определяющим является тепловое движение атомов и их групп, а роль нагрузки проявляется в направлении развития этих процессов.

По этой концепции долговечность, т.е. время свершения критического события (разрушения или деформирования твердого тела) определяют по уравнению

$$t = t_m \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{RT} \cdot \left(1 - \frac{T}{T_m} \right) \right]. \quad (1)$$

Формула (1) выражает правило температурно-временной и силовой эквивалентности, т.е. действие каждого параметра — температуры, времени и нагрузки — качественно одинаково. В отличие от общепринятого термина "несущая способность", связанного только с прочностью материала, взаимосвязанный комплекс из трех параметров характеризуется как работоспособность материала: при разрушении — прочностная, при деформировании — деформационная. Работоспособность материала определяется небольшой группой физических констант, связанных с составом, строением и структурой полимера.

Согласно принципу температурно-временной и силовой эквивалентности можно определить два других параметра прочностной и деформационной работоспособности материала:

прочность (предел вынужденной эластичности)

$$\sigma_{кр(в)} = \frac{1}{\gamma} \left[U_0 - \frac{2,3RT}{1 - T/T_m} \lg \frac{t}{t_m} \right] \quad (2)$$

и термостойкость (теплостойкость)

$$T_{кр(р)} = \left[\frac{1}{T_m} + \frac{2,3R}{U_0 - \gamma \sigma} \lg \frac{t}{t_m} \right]^{-1}. \quad (3)$$

где t_m , U_0 , γ , T_m — физические константы материала; t_m — отражает период колебания кинетических единиц (атомов или сегментов макромолекулы), U_0 — максимальная энергия активации процесса разрушения или деформирования, γ — структурно-механическая константа, отражающая неравномерность силового поля по сечению нагружаемого элемента, T_m — предельная температура существования твердого тела (его размягчения или раз-

ложения); σ — напряжение; T — температура; R — универсальная газовая постоянная.

Значения рассчитанных констант уравнений (1)–(3) в зависимости от действия различных факторов, определяющих работоспособность пенополистирола ПСБ-С, приведены в табл. 1 [1, 2].

Было установлено, что наиболее перспективным утеплителем является самозатухающий пенополистирол ПСБ-С марок М15 и М35. Причем большинство физико-химических показателей у М35 выше, однако цена М15 значительно ниже.

В соответствии со СНиП II-3-79* определяем требуемую толщину утеплителя для различных видов конструкций, а по условиям эксплуатации конкретизируем воздействия, которые могут снижать долговечность утеплителя.

Рассмотрим наиболее часто применяемые конструкции утепления и дадим примеры прогнозирования работоспособности пенополистирола в них.

Дополнительное утепление с наружной стороны стены. В такой конструкции [3] утеплитель (рис. 1) практически не несет механических нагрузок, но разрушение пенопласта возможно в контактных слоях между утеплителем, стеной и отделочным

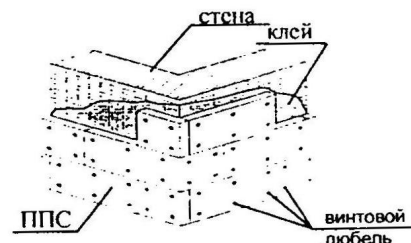


Рис. 1. Дополнительное утепление стен снаружи

Таблица 1

Марка пенополистирола	Вид предельного состояния	Диаметр отверстия, мм	Физические константы			
			t_m , с	T_m , К	U_0 , кДж/моль	γ , кДж/(моль·МПа)
М15	Разрушение поперечным изгибом	0	$10^{-4,5}$	555,6	186	1160
		0	$10^{-2,9}$	526,3	200	515,3
		4	$10^{-2,9}$	833	120	288,9
		10	$10^{-2,9}$	769	125	283,5
М35	Деформация сжатием (10%)	0	$10^{-4,5}$	980,4	130	1811
		0	$10^{-2,9}$	409,8	345	1811
		4	$10^{-2,9}$	402	420	2265
		10	$10^{-2,9}$	392	444	2284

покрытием. При забивке в пенополистирол анкерных штырей (дюбелей) возможно разрушение материала в месте контакта анкера и утеплителя. Основным фактором, снижающим долговечность пенополистирола, будет тепловое старение. В этом случае долговечность пенополистирола определяют по уравнению (1) при $\sigma = 0$.

При дополнительном утеплении наружных стен зданий возможно применение обеих марок пенополистирола ПСБ-С. По стоимости предпочтительнее М15, но толщина утеплителя будет на 20 мм больше. Соединения пенопласта М15 с кирпичной стеной различными клеями имеют более высокую прочность, пенопласт М15 можно приклеивать и цементом с добавкой поливинилацетатной эмульсии без дополнительного крепления дюбелями; М35 следует дополнительно закреплять [4]. Следует избегать попадания влаги между утеплителем и несущей стеной. Отверстия под анкерные штыри необходимо выполнять при изготовлении пенопласта или в специальных пресс-формах, чтобы стенки отверстий были оплавлены. Это позволит повысить работоспособность пенополистирола [2].

В несъемной опалубке (рис. 2, 3) определение работоспособности утеплителя зависит от вида нагружения.

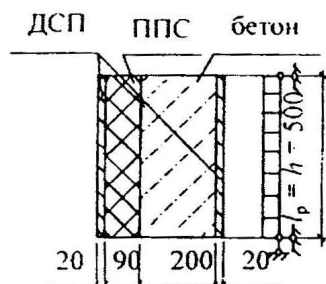


Рис. 2. Опалубка фирмы "Velox"

Расчет опалубок выполняют в следующем порядке:

1. Определяют давление бетонной смеси

$$P = \gamma h, \quad (4)$$

где γ — объемная масса бетонной смеси; h — высота панели.

2. Определяют нагрузку, действующую на опалубку,

$$q = P/2. \quad (5)$$

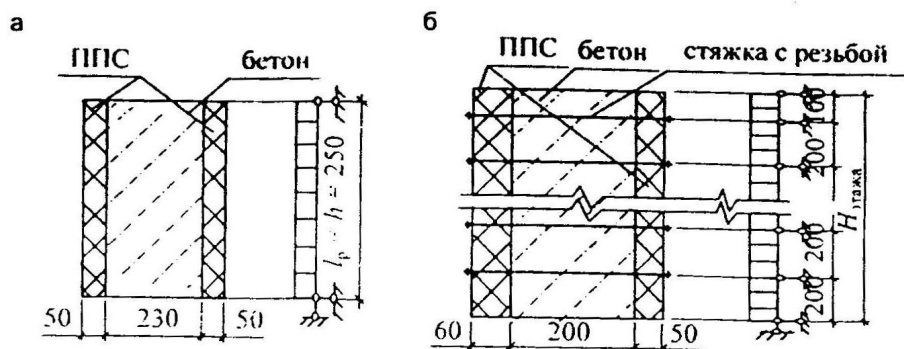


Рис. 3. Опалубки а — "Thermodom"; б — "Пластбай-3"

3. Определяют расчетную схему нагружения и вид действующего напряжения:

$$\sigma_{сж} = N/A, \quad (6)$$

$$\sigma_{изг} = M/W, \quad (7)$$

где $N = (qh)/2$ — нагрузка, приложенная к пенополистиролу; $A = bh$ — площадь утеплителя, воспринимающая нагрузку от бетонной смеси (см.рис. 2); $M = (qh^2)/8$ (см.рис. 3, а) и $M = (qz^2)/12$ (см.рис. 3, б) — изгибающие моменты, действующие на пенополистирол; z — расстояние между стяжками; $W = (hb^2)/6$ — момент сопротивления; h — высота плиты, b — толщина плиты

4. Вычисляют долговечность пенополистирола при заданных напряжениях и температуре по формуле (1). Долговечность пенополистирола должна быть не менее 28 сут (время твердения бетонной смеси), т.е.

$t = 10^{6,4}$. По формулам (2) и (3) в зависимости от вида нагружения можно также определить два других параметра работоспособности пенополистирола. Рассчитанные значения долговечности для пенополистирола приведены в табл. 2.

Поскольку пенополистирол в опалубке фирмы "Velox" (см.рис. 2) работает на сжатие, то его величину определяем по формуле (6). Вычислив по уравнению (1) значение долговечности (см.табл. 2), получаем, что пенополистирол марки М35 удовлетворяет данному требованию, т.е. $t = 10^{8,1}$. Для повышения долговечности М15 необходимо увеличить толщину.

Проведенные исследования [5] показали:

в качестве облицовки лучше применять древесностружечные плиты, а утеплителя — пенополистирол ПСБ-С марки М35;

Таблица 2

Вид материала	Вид нагрузки	Долговечность утеплителя в несъемной опалубке, t [с]*		
		"Velox"	"Thermodom"	"Пластбай-3"
ПСБ-С М15	Поперечный изгиб	—	—	$10^{4,7}$ [$10^{1,8}$]
	Сжатие	$10^{1,6}$	—	—
	(деформации 2%)**	—	—	—
	Сжатие (деформации 10%)**	$10^{4,8}$	—	—
ПСБ-С М35	Поперечный изгиб	—	$10^{3,7}$	$10^{10,1}$ [$10^{8,9}$]
	Сжатие	$10^{8,1}$	—	—
	(деформации 2%)	—	—	—
	Сжатие (деформации 10%)	$10^{11,6}$	—	—

* "Velox": $T = 18^\circ\text{C}$; $\sigma_{сж} = 0,033$ МПа — М35 и 0,03 МПа — М15; "Thermodom": $T = 18^\circ\text{C}$; $\sigma_{изг} = 0,225$ МПа — М35; "Пластбай-3": $T = 18^\circ\text{C}$; $\sigma_{изг} = 0,067$ МПа для наружной плиты [$\sigma_{изг} = 0,096$ МПа для внутренней плиты] — М15 и М35.

** Так как при сжатии не происходит хрупкого разрушения пенополистирола, то величина деформации 2% соответствует пределу упругости, а 10% — пределу вынужденной эластичности [1].

пенопласт целесообразно приклеивать к ДСП клеем ПВА-м с наполнителем (древесной мукой), что снижает стоимость клея и всей конструкции в целом. Такое сочетание материалов предпочтительно и с позиций теплового расширения.

Для опалубки "Thermodom" (см. рис. 3, а) обычно блоки выпускают размером 250х250 мм, а толщина стенок блока 50 мм. Однако теплотехнические расчеты для Тамбова показали, что необходима толщина бетона 230 мм; ширина блока составит 330 мм (см. рис. 3, а).

Утеплитель в такой опалубке работает на поперечный изгиб. Напряжение определяем по формуле (7). Долговечность при данном напряжении для наружной и внутренней сторон блока приведена в табл. 2.

Если наружная поверхность блока не защищена от атмосферных воздействий, то из полученного значения t необходимо вычесть поправку, приведенную в [6], учитывающую колебания температур в реальных условиях эксплуатации. Тогда долговечность утеплителя ПСБ-С М35 при данном напряжении будет $10^{3,7-1,06} = 10^{2,64}$, что меньше, чем минимальная эксплуатационная долговечность $10^{6,4}$. В этом случае необходимо увеличить толщину утеплителя или использовать другой с более высокими физико-механическими характеристиками.

В случае длительного атмосферного воздействия долговечность пенополистирола эквивалентна лабораторным результатам при температурах 303 и 313 К [5]. Следует отметить, что необходимо избегать контакта пенополистирола с машинным маслом, поскольку это существенно снижает его работоспособность, воздействие же серной кислотой, наоборот, увеличивает ее [7].

Для пенополистирола ПСБ-С М15 по теплотехническому расчету необходима толщина бетонного слоя 780 мм, что с технологических и экономических позиций нецелесообразно.

Таким образом, для данного вида опалубки применение пенополистирола ПСБ-С марок М15 и М35 экономически невыгодно. Кроме того, пенопласт этих марок обладает плохой адгезией к бетону.

Несъемную опалубку из пенополистирола по системе "Пластбау-3" (см. рис. 3, б) рассчитываем на поперечный изгиб. Напряжение определяем по формуле (7). Долговечность, определенная по уравнению (1), приведена в табл. 2.

Полученные значения для наружной панели в случае их незащищенности от атмосферных воздействий корректируем поправкой. Тогда долговечность для наружной стены панели из пенополистирола ПСБ-С марки М15 будет: $10^{4,7-2,06} = 10^{2,64}$, что меньше, чем $10^{6,4}$; для марки М35 — $10^{10,1-1,06} = 10^{9,04}$. Следовательно, условия эксплуатации по долговечности для наружной и внутренней панелей опалубки из пенополистирола ПСБ-С марки М35 выполняются.

В случае длительного атмосферного воздействия долговечность пенополистирола при поперечном изгибе эквивалентна лабораторным результатам при температуре 303 К.

Таким образом, в данном виде несъемной опалубки рекомендуется использовать пенопласт марки М35. Он более долговечен при любых режимах температурно-влажностных воздействий.

По формулам (4)–(7) были получены выражения для определения толщины утеплителя в зависимости от вида нагружения:

при поперечном изгибе

$$b = \sqrt{\frac{6qh}{8\sigma}}, \quad (8)$$

при сжатии

$$b = \frac{q}{2\sigma}. \quad (9)$$

Многослойные панели и стены из мелкоштучных элементов. В железобетонных панелях долговечность пенополистирола определяется величиной нагрузки от давления бетонной смеси и ее можно вычислить по уравнению (1), а термостойкость (при пропаривании панели) — по уравнению (2). Принятая марка пенополистирола должна обладать двукратным запасом прочности при сжатии согласно [8]. В процессе эксплуатации утеплитель практически не испытывает механических воздействий. В навесных же панелях утеплитель включается в совместную работу с обшивками. Поэтому важно знать адгезионную прочность применяемых материалов для выбранного вида клея.

Таким образом, в трехслойных панелях можно использовать пенополистирол обеих марок. Однако в навесных панелях более высокой адгезионной способностью с ДСП и ЦСП обладает пенопласт ПСБ-С М15 [4]. С позиций теплового расширения в таких конструкциях предпочтительно применение пенополистирола марки

М15 в сочетании с ЦСП, а М35 — с ДСП [5].

В трехслойных стенах из мелкоштучных элементов (кирпич, блоки) пенополистирол не испытывает механических воздействий, кроме концентраторов напряжения от анкерных штырей. Рекомендуется выполнять отверстия под штыри плавлением при изготовлении утеплителя. Целесообразно применение обеих марок пенополистирола.

Была установлена возможность определения работоспособности пенополистирола при помощи математических моделей, полученных при проведении математического планирования эксперимента, который был разработан для блочных термопластов и использован для исследования долговечности пенополистирола.

Поскольку на долговечность пенополистирола (t) основное влияние оказывают напряжение (σ) и температура (T), то варьировали эти переменные. В качестве функции принимали величину $\lg t$. Математическая модель для определения долговечности имеет вид

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2, \quad (10)$$

где $y = \lg t$; x_1 и x_2 — напряжение и температура; b_0, b_1, b_2, b_3 — коэффициенты.

Значимость коэффициентов оценивали, согласно ГОСТ 14353-69*, по величине доверительного интервала.

Из формулы (10) была получена математическая модель для определения долговечности по формуле (1)

$$\lg t = b_0 + b_1 \frac{1000}{T} + b_2\sigma - b_3\sigma \frac{1000}{T}, \quad (11)$$

$$\text{где } b_0 = \lg t_m - 0,43 \frac{U_0}{RT_m};$$

$$b_1 = 0,215U_0; \quad b_2 = 0,43 \frac{\gamma}{RT_m};$$

$$b_3 = 0,215\gamma \quad (\text{величины } U_0, \gamma, T_m, t_m \text{ — приведены в табл. 1); } y = \lg t; x_1 = 10^3/T; x_2 = \sigma.$$

По уравнению (11) были построены диаграммы (рис. 4), по которым, задавшись одним из параметров работоспособности (напряжением или температурой), можно определить время до разрушения (долговечность) при поперечном изгибе или время достижения предела упругости или вынужденной эластичности (деформационную долговечность) при сжатии.

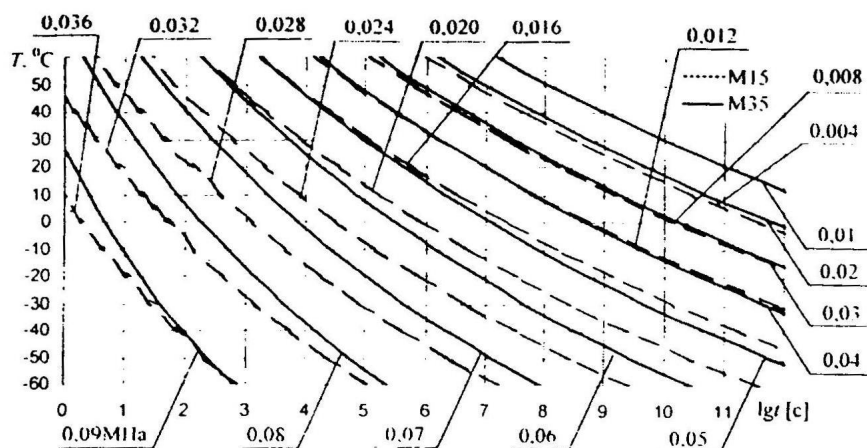


Рис. 4. Диаграмма для определения деформационной долговечности пенополистирола ПСБ-С марок М15 и М35 в зависимости от температуры и напряжения при деформации сжатия 2%

На основании вышеизложенного была разработана методика прогнозирования долговечности (работоспособности) утеплителя — пенополистирола:

1. Выбор схемы конструкции утепления и материалов для нее.

2. Выбор марки пенополистирола в зависимости от принятой конструкции и подбор необходимой толщины на основании теплотехнического расчета.

3. Определение основных эксплуатационных факторов, действующих на пенополистирол.

4. Определение долговечности (работоспособности) утеплителя принятой марки:

а) расчет действующего напряжения на пенополистирол по формулам (4)–(7) в зависимости от принятой толщины утеплителя (по теплотехническому расчету); определение (прогнозирование) его долговечности (работоспособности) по формулам (1)–(3) или по диаграммам;

б) при заданной долговечности и температуре определение напряжения по диаграммам; вычисление по формулам (8)–(9) необходимой толщины утеплителя.

Список литературы

1. Ярцев В.П., Андрианов К.А. Влияние величины деформации на физические константы, определяющие работоспособность пенополистирола при сжатии. — Ч. 1. Современные проблемы строительного материаловедения/Материалы седьмых академических чтений РААСН: Сб. науч. ст. — Белгород, 2001. — С. 642–645.

2. Андрианов К.А., Ярцев В.П. Влияние концентратора напряжений на работоспособность пенополистирола в ограждающих конструкциях зданий /Эффективные строительные конструкции: теория и практика: Сб. ст. международной науч.-

техн. конф. — Пенза, 2002. — С. 267–272.

3. Боград А.Я. Рациональные технические решения теплоэффективных наружных стен жилых домов различных конструктивных систем // «Строительные материалы», 1999, № 2. — С. 2–3.

4. Андрианов К.А., Ярцев В.П. Адгезия пенополистирола в многослойных конструкциях стен зданий // «Жилищное строительство», 2002, № 9. — С. 19–20.

5. Андрианов К.А. Прогнозирование долговечности (работоспособности) пенополистирола в ограждающих конструкциях зданий: Дисс... канд. техн. наук. — Тамбов, 2002. — 212 с.

6. Андрианов К.А., Ярцев В.П. Прогнозирование механической долговечности беспрессового пенополистирола при дополнительном утеплении зданий /Композиционные строительные материалы. Теория и практика: Сб. науч. трудов международной науч.-практ. конф. — Пенза, 2002. — С. 18–21.

7. Ярцев В.П., Андрианов К.А. Влияние жидких агрессивных сред на долговечность пенополистирола под нагрузкой // «Пластические массы», 2002, № 9. — С. 9–11.

8. Кулешов И.В., Торнер Р.В. Теплоизоляция из вспененных полимеров. — М.: Стройиздат, 1987. — 144 с.

Вниманию авторов и читателей!

В декабре 2000 г. была утверждена Тематическая направленность журнала «ЖИЛИЩНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО» на 2001–2010 гг.

Основная задача журнала — способствовать широкому развитию жилищного и культурно-бытового строительства на основе индустриализации, повышения эффективности и качества и ускорению научно-технического прогресса. В соответствии с научно-техническим и производственным профилем журнал освещает вопросы:

- ♦ развития рыночных отношений в области жилищно-гражданского строительства;
- ♦ повышения эффективности и качества;
- ♦ экономии ресурсов;
- ♦ внедрения опыта лучших строительных, проектных и научно-исследовательских организаций страны;
- ♦ популяризации передовых методов организации строительства;
- ♦ новых методов конструирования и расчета зданий;
- ♦ инженерного оборудования современных зданий;
- ♦ повышения качества архитектуры жилищно-гражданского строительства;
- ♦ строительства на селе;
- ♦ проектирования и строительства в сложных условиях;
- ♦ освещения зарубежного опыта жилищно-гражданского строительства;
- ♦ истории и теории;
- ♦ работы отечественных и зарубежных выставок;
- ♦ критики и библиографии.

Этой направленностью следует руководствоваться при направлении в редакцию авторских материалов.