

УДК 519.6

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТЕРМОРЕАКТИВНЫХ ПЕНОПЛАСТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ТЕПЛОУСТОЙЧИВОСТИ

Местников А.Е.

ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»,
Якутск, e-mail: mestnikovae@mail.ru

В статье приводятся результаты вычислительного эксперимента по прогнозированию структуры и свойств термореактивных пенопластов для легких ограждающих конструкций. Основная идея работы заключается в использовании характерной неоднородности физико-механических свойств пенофенопластов по высоте вспенивания для повышения эксплуатационной эффективности материалов в слоистых конструкциях по показателям теплоустойчивости. В выборе расчетной схемы вычислительного эксперимента использовали известный эффект повышения теплоустойчивости многослойных конструкций при сочетании различных утеплителей. Установлено, что максимальная теплоустойчивость ($v = 63,5$) однослойной теплоизоляции из пенофенопласта достигается при условии, когда распределение физико-механических (плотности и коэффициента теплопроводности) характеристик по высоте вспенивания имеет параболическую зависимость. На практике такую структуру вспененного пенофенопласта получить невозможно. Такую структуру теплоизоляционного слоя можно получить только склеиванием двух плит из пенофенопласта, изготовленных в замкнутой металлической форме. Наиболее реальная структура теплоизоляционного слоя (неоднородность структуры задана в виде параболы с нижним экстремумом) характеризуется достаточно высокой теплоустойчивостью ($v = 52,8$). Как показывают результаты вычислительного эксперимента, оптимальный выбор структуры и свойств теплоизоляционного слоя из пенофенопластов позволяет повысить теплоустойчивость легких ограждающих конструкций на 47–75 %.

Ключевые слова: теплоизоляция, пенофенопласты, структура и свойства, легкие ограждающие конструкции, теория теплоустойчивости, прогнозирование

FORECASTING THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THERMOREACTIVE FOAMS USING THE THEORY OF HEAT RESISTANCE

Mestnikov A.E.

North-Eastern Federal University named M.K. Ammosov, Yakutsk, e-mail: mestnikovae@mail.ru

The article presents the results of a computational experiment on predicting the structure and properties of thermosetting foams for light enclosing structures. The main idea of the work is to use the characteristic heterogeneity of the physical and mechanical properties of foam plastics in the foaming height to increase the operational efficiency of materials in layered structures in terms of thermal stability. In choosing the design scheme of the computational experiment, we used the well-known effect of increasing the heat stability of multilayer structures when combining various insulation materials. It is established that the maximum heat stability ($V = 63.5$) of a single-layer thermal insulation made of foam foam is achieved under the condition that the distribution of physical and mechanical (density and thermal conductivity coefficient) characteristics over the foaming height has a parabolic dependence. In practice, such a structure of foamed foam can not be obtained. This structure of the thermal insulation layer can only be obtained by gluing two foam boards made in a closed metal form. The most real structure of the thermal insulation layer (the inhomogeneity of the structure is given as a parabola with a lower extremum) is characterized by a sufficiently high thermal stability ($V = 52.8$). As the results of the computational experiment show, the optimal choice of the structure and properties of the thermal insulation layer made of foam plastics can increase the heat resistance of light enclosing structures by 47-75 %.

Keywords: thermal insulation, phenolic plastics, structure and properties, lightweight enclosing structures, theory of thermal stability, forecasting

Для реконструкции старого жилого фонда и нового строительства быстровозводимых зданий из легких ограждающих конструкций в условиях Арктики и Севера требуются эффективные теплоизоляционные материалы, изготавливаемые в заводских и построечных условиях. К таким материалам могут быть отнесены такие термореактивные пенопласты, как пенополиуретаны и пенофенопласты. Как известно, легкие ограждающие конструкции (ЛОК) на их основе наряду с повышенными теплозащитными показателями обладают пониженной теплоустойчивостью, что выражается в перегреве жилых помещений в условиях

жаркого лета и быстром их охлаждении при аварийных отключениях отопления в зимнее время [1].

В актуализированных строительных нормах (СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий) базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче $R_0^{\text{тп}}$ является заданной величиной, определяемой в зависимости от продолжительности отопительного периода для конкретного района строительства [2]. При этом постоянную температуру в жилых помещениях в зимних условиях обеспечивает система отопления.

В отечественных нормах расчет по теплоустойчивости проводится для стено-

вых конструкций жилых помещений зданий в районах с жарким климатом с целью определения толщины теплоизоляции, при выборе систем вентиляции и кондиционирования воздуха, а также при расчете температурно-влажностного режима помещения с периодической системой отопления.

В условиях резко континентального климата Якутии летом характерны резкие суточные изменения наружной температуры и высокая солнечная радиация. Эффект повышения теплоустойчивости легких ограждающих конструкций в климатических условиях Якутии при сочетании утеплителей был обоснован в работах специалистов Института физико-технических проблем Севера СО РАН [3].

Используя известный эффект повышения теплоустойчивости многослойных ограждающих конструкций, автор высказал предположение о возможности использования характерной неоднородности свойств пенопластов по высоте вспенивания для повышения эксплуатационной эффективности материалов в слоистых конструкциях по показателям теплоустойчивости стенового ограждения, а также прогнозировать их структуру и свойства методом математического моделирования на основе теории теплоустойчивости.

Целью исследовательской работы является прогнозирование структуры и свойств термореактивных пенофенопластов для легких ограждающих конструкций методом математического моделирования на основе теории теплоустойчивости.

Материалы и методы исследования

Теоретические расчеты проведены для отечественной марки пенофенопласта ФРП-1 (показатели приняты по СП 50.13330.2012) и модифицированного пенофенопласта «Пенорезол» (показатели определены расчетно-экспериментальным путем) (табл. 1).

Расчет теплоустойчивости легких ограждающих конструкций с теплоизоляционными слоями из пенофенопластов проводится по требованиям свода правил СП 50.13330.2012 и методических указаний [4].

В теории теплоустойчивости строительной теплофизики вводятся дополнительные параметры, такие как тепловая инерция ограждающей конструкции D , коэффициент теплоусвоения s , декремент затухания расчетной амплитуды колебаний температуры наружного воздуха v , что рассматривалось в работах О.Е. Власова, Л.А. Семенова, С.И. Муромова и А.М. Шкловера [5]. Математическое моделирование в этой области основано на решении дифференциального уравнения теплопроводности, где на поверхностях ограждающих конструкций выполняются условия теплообмена III рода (СП 50.13330.2012).

Результаты исследования и их обсуждение

Для математического моделирования структуры и свойств термореактивных пенопластов, применяемых в качестве теплоизоляции ЛОК, автором предложена следующая расчетная схема (рис. 1) расположения слоев из вспененных пенофенопластов с различными физико-механическими свойствами (табл. 1), принимая во внимание, кроме собственных, результаты других авторов [6–8].

Для снижения токсичности модифицированных пенофенопластов в составе исходных смесей используют добавочные материалы на основе солей металлов, которые способствуют связыванию свободного фенола в процессе структурообразования, например AlF_3 и $SnCl_2 \cdot H_2O$ [9]. Модификаторы данных видов повышают реакционную способность исходных фенолформальдегидных смесей, что может быть использовано в напыляемых композициях модифицированного пенофенопласта «Пенорезол» (табл. 1).

Таблица 1

Физико-технические характеристики пенофенопластов

№ по рис. 1	Название	В сухом состоянии			В условиях эксплуатации А		
		γ_0 , кг/м ³	c_0 , кДж/(кг·°C)	λ_0 , Вт/(м·°C)	w , %	λ_A , Вт/(м·°C)	s , Вт/(м·°C)
1	ФРП-1	100	1,68	0,047	5	0,052	0,85
2	ФРП-1	50	1,68	0,041	5	0,050	0,59
3	ФРП-1	40	1,68	0,038	5	0,041	0,48
1	Пенорезол	80	1,68	0,039	4	0,042	0,75
2	Пенорезол	40	1,68	0,036	4	0,039	0,52
3	Пенорезол	30	1,68	0,032	4	0,036	0,48

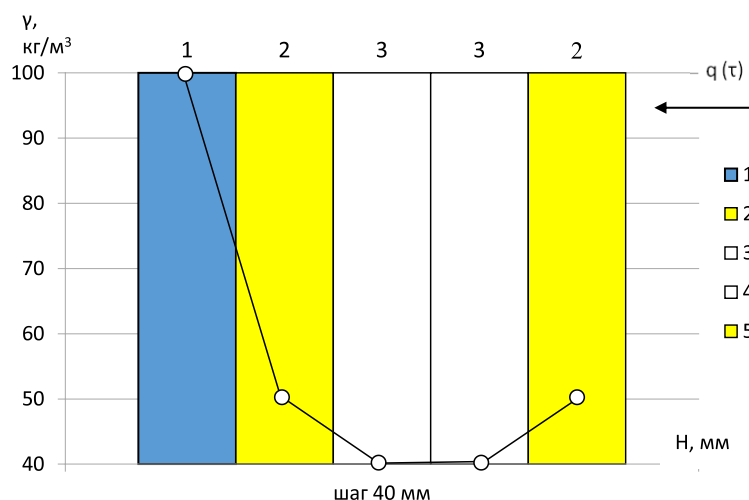


Рис. 1. Модельная расчетная схема для оптимизации структуры и свойств теплоизоляционного слоя ЛОК

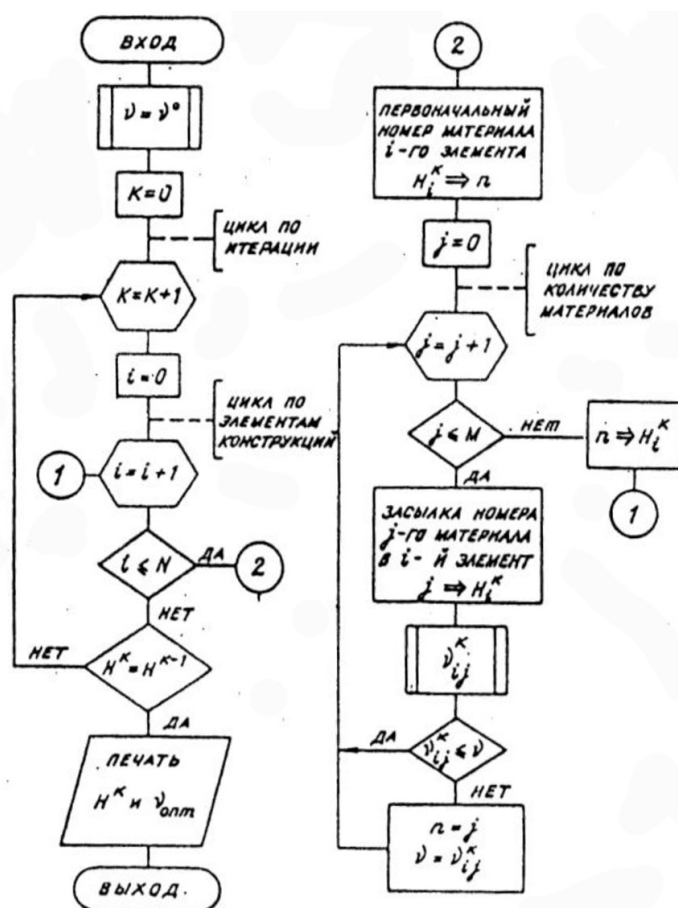


Рис. 2. Блок-схема алгоритма по оптимизации структуры и свойств теплоизоляционного слоя теплоустойчивой ограждающей конструкции

При данной разбивке на элементы в качестве управляющих параметров выбраны теплотехнические характеристики материалов из числа допустимых. Предло-

женный алгоритм по оптимизации структуры и свойств теплоизоляционного слоя теплоустойчивой конструкции показан на рис. 2.

В исследованиях легких ограждающих конструкций [3] максимальный эффект повышения теплоустойчивости достигается при сочетании утеплителей с минимальной теплопроводностью и минимальной температуропроводностью. Как известно, величина коэффициента температуропроводности зависит от природы вещества, поэтому в наших исследованиях в качестве материала теплоизоляционного слоя выбрали пенофенопласт, обладающий повышенной удельной теплоемкостью среди разновидностей пенопластов. В расчетной схеме приняты три плотности пенофенопластов (табл. 1), которые в процессе вычислительного эксперимента варьируются в пяти слоях и вычисляются декременты затухания амплитуды колебаний температуры наружного воздуха для ограждающих конструкций в целом. При этом вариации слоев по значениям плотности максимально должны соответствовать структуре реальных теплоизоляционных плит из пенофенопластов, изготовленных на технологических линиях в заводских условиях.

Вычислительный эксперимент по оптимизации структуры и свойств теплоизоляционного слоя теплоустойчивой ограждающей конструкции проводится при постоянной температуре внутреннего воздуха жилого помещения (22 °С) и воздействии гармонических суточных температурных колебаний амплитуды наружной температуры.

В вычислительном эксперименте главными расчетными параметрами являются максимальные величины v и R_k (табл. 2).

Полученные результаты по оптимизации структуры и свойств теплоизоляционного слоя из пенофенопласта ФРП-1 приведены в табл. 2 (поз. 4–9). Наибольшей тепловой инерцией ($v_{\text{макс}} = 52,2$) обладает трехслойная теплоизоляция из ФРП-1. Для сравнения на поз. 1–3 приведены данные для однослойной теплоизоляции из ФРП-1 с различной плотностью (100, 50 и 40 кг/м³). На практике получить структуру с аналогичной однородной пористостью по высоте вспенивания для заливочных пенофенопластов не представляется возможным.

В поз. 10 и 11 табл. 2 приведены близкие к реальным структурам теплоизоляционных плит из вспененных пенофенопластов «Пенорезол», изготовленных различными способами. Так, структура пенофенопласта, приведенная в поз. 10 табл. 2, характерна для пенофенопластов, полученных способом напыления или заливки при свободном вспенивании композиции. А структура пенофенопласта, показанная в поз. 11, соответствует структуре теплоизоляционного слоя в трехслойных металлических панелях, изготовленных на технологических ли-

ниях непрерывного действия [10], а также для теплоизоляционных плит, изготовленных в замкнутой плоской металлической форме [7–9].

Как видно из результатов вычислительного эксперимента (табл. 2), при выбранной разбивке элементов, расчетная максимальная теплоустойчивость однослойной теплоизоляции из пенофенопласта ($v = 63,5$) достигается при условии, когда неоднородности физико-механических (плотности и коэффициента теплопроводности) свойств пенофенопластов по высоте вспенивания имеют параболическую зависимость с верхним экстремумом (поз. 12). Однако в реальных условиях получить однослойную теплоизоляцию из вспененных пенопластов с такими характеристиками не представляется возможным.

Наиболее близкое к теоретической оптимальной кривой (поз. 12) распределение средней плотности по высоте вспенивания достигается при сочетании двух плит из модифицированного пенофенопласта, изготовленных в замкнутой металлической форме при температуре 18 °С.

Наиболее близкими к реальным структурам вспененных пенофенопластов оказались расчетные схемы, показанные в позициях 10 и 11, у которых декремент затухания температурных колебаний составляет соответственно 53,3 и 52,8 при достаточно высоком значении термического сопротивления R_k .

Следовательно, вычислительный эксперимент с использованием метода математического моделирования позволяет не только установить оптимальные параметры структуры и физико-механических свойств теплоизоляционных плит из вспененного пенофенопласта, но и прогнозировать рациональные технологии их изготовления (табл. 2), а также оценить эксплуатационную эффективность применяемых пенопластов в составе легких ограждающих конструкций.


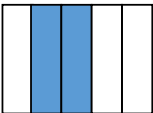
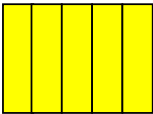
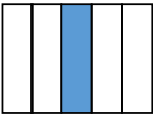
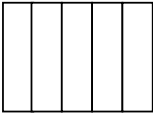
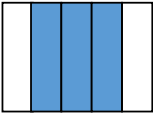

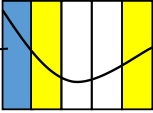



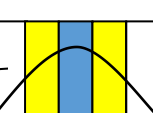
Результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили предложить два технологических приема получения модифицированных пенофенопластов с заданной неоднородностью структуры и свойств для ЛОК повышенной теплоустойчивости;

1) изготовление теплоизоляционных плит в замкнутой металлической форме при температуре подложки и композиции 18 °С способом свободного вспенивания модифицированного пенофенопласта с повышенной каталитической активности исходной смеси;

2) изготовление теплоизоляционного слоя ЛОК способом напыления активированной фенолоформальдегидной композиции.

Таблица 2

Результаты вычислительного эксперимента по прогнозированию структуры и свойств пенофенопластов по высоте вспенивания

№	Расчетная схема	ν	$R_k, \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	№	Расчетная схема	ν	$R_k, \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$
1	+  1 1 1 1 1	45,2	4,44	7	+  3 1 1 3 3	50,6	5,21
2	+  2 2 2 2 2	43,8	5,00	8	+  3 3 1 3 3	48,1	5,46
3	+  3 3 3 3 3	39,5	5,71	9	+  3 1 1 1 3	52,2	4,95
4	+  3 1 1 1 1	48,3	4,70	10	+  1 2 3 3 2	53,3	5,17
5	+  1 1 1 1 3	48,8	4,70	11	+  1 2 3 2 1	52,8	4,82
6	+  3 3 1 1 3	50,2	5,21	12	+  3 2 1 2 3	63,5	5,17

Примечание: γ_T – теоретическая кривая распределения плотности (коэффициента теплопроводности) по высоте вспенивания пенофенопласта.

Технология получения теплоизоляционных плит из модифицированных пенофенопластов с заданной структурой и свойствами предполагает их производство на специализированных технологических линиях периодического и непрерывного действия. С другой стороны, применение способа напыления позволяет получать мо-

дифицированные пенофенопласты с аналогичными заданными структурой и свойствами в условиях строительной площадки при положительных температурах окружающего воздуха не ниже 18°C .

Как показывают результаты вычислительного эксперимента, оптимальный выбор структуры и свойств теплоизоляцион-

ного слоя из пенофенопластов позволяет повысить теплоустойчивость легких ограждающих конструкций на 47–75 %.

Заключение

На основе результатов вычислительного эксперимента обоснована эффективность использования метода математического моделирования в прогнозировании структуры и свойств вспененных пенофенопластов в качестве теплоизоляционного слоя в легких ограждающих конструкциях повышенной теплоустойчивости.

Список литературы

1. Местников А.Е., Абрамова П.С., Антипкина Т.С., Егорова А.Д. Тепловая защита зданий на Севере: материалы, изделия и конструкции. М.: Изд-во АСВ, 2009. 236 с.
2. Гагарин В.Г., Чжоу Ч. Учет градусо-суток отопительного периода при сравнении потребления энергии зданиями // Бюллетень строительной техники. 2016. № 6 (982). С. 58–59.
3. Тимошенко А.Т., Ефимов С.С., Попов Г.Г. Теплоустойчивость многослойных ограждающих конструкций. Якутск: ЯНЦ СО СССР, 1990. 176 с.
4. Гагарин В.Г., Козлов А.В., Неклюдов А.Ю., Пастушков П.П., Желдаков Д.Ю., Ельчищева Т.Ф. Расчеты тепловой защиты зданий: методическое пособие // Министерство строительства и ЖКХ РФ. М., 2017. 94 с.
5. Строительная физика: краткий курс лекций для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению 270800 «Строительство» / Электрон. текстовые данные. М.: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2014. 57 с. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.iprbookshop.ru/27466.html>. ЭБС «IPRbooks» (дата обращения: 05.11.2020).
6. Швецов А.Е., Плешкова К.А. Структура и материалы ограждающих конструкций // Alfabuild. 2018. № 1 (3). С. 15–23.
7. Бруяко М.Г., Григорьева Л.С., Васильева М.А., Киселева О.В. Способы снижения содержания свободного фенола в пенофенопласте // Вестник МГСУ. 2012. № 12. С. 134–138.
8. Нгуен Вьет Кыонг, Сосновский Н.Ю., Янчук В.П., Смирнова А.М., Григорьева Л.С. Получение заливаемого пенофенопласта пониженной токсичности // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 9. С. 1132–1139. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.9.1132-1139.
9. Бруяко М.Г., Григорьева Л.С., Ушков В.А. Эксплуатационная стойкость и горючесть модифицированных пенофенопластов // Вестник МГСУ. 2009. № 4. С. 77–80.
10. Торлова А.С., Виткалова И.А., Пикалов Е.С. Технологии производства, свойства и области применения композиций на основе фенолоформальдегидных смол // Научное обозрение. Технические науки. 2017. № 2. С. 96–114.