

УДК 699.86

## ВЫБОР ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ МЕТОДА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ АЛЬТЕРНАТИВ

**Д.Е. Цыпленков**

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

**Аннотация.** Теплоизоляционные материалы имеют различные характеристики и параметры. При выборе оптимального варианта (материала) достаточно сложно учесть все критерии одновременно, особенно когда часть из них стремится к минимуму, например, как стоимость, а другая к максимуму – срок службы. В таких случаях можно использовать метод многокритериальной оценки альтернатив. Для расчетов, представленных в статье, были выбраны наиболее значимые и общие для рассматриваемых теплоизоляционных материалов критерии: коэффициент теплопроводности, срок службы, стоимость, минимальная и максимальная температура применения материала, степень пожарной опасности, плотность, коэффициент сопротивления диффузии водяного пара. Согласно методу многокритериальной оценки альтернатив, материалом с наименьшей суммой (наиболее рациональным решением) оказался аэрогель. Дальнейшие исследования предполагается дополнить теплотехническим расчетом ограждающей стеновой конструкции с использованием аэрогеля, а также оценкой экономической эффективности принятого конструктивного решения.

**Ключевые слова:** теплоизоляционные материалы, энергоэффективность, аэрогель, утеплитель, пластмигран, вакуумная изоляция, PIR-изоляция, жидкая изоляция, многокритериальная оптимизация, принятие решений, критерий, альтернатива, многокритериальный анализ, метод многокритериальной оценки альтернатив.

**Ссылка для цитирования:** Цыпленков Д.Е. Выбор теплоизоляционного материала на основе метода многокритериальной оценки альтернатив // Инженерные исследования. 2022. №5 (10). С. 25-30. EDN: НРҮКЛО

## SELECTION OF THE HEAT-INSULATING MATERIAL ON THE BASIS OF THE METHOD OF MULTI-CRITERIA ASSESSMENT OF ALTERNATIVES

**D.E. Tsyplenkov**

*Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)*

**Abstract.** Thermal insulation materials have different characteristics and parameters. When choosing the best option (material), it is rather difficult to take into account all the criteria at the same time, especially when some of them tend to a minimum, for example, as cost, and the other to a maximum - service life. In such cases, the method of multi-criteria evaluation of alternatives can be used. For the calculations presented in the article, the most significant and common criteria for the thermal insulation materials under consideration were chosen: thermal conductivity coefficient, service life, cost, minimum and maximum temperature of material application, degree of fire hazard, density, water vapor diffusion resistance coefficient. According to the method of multi-criteria assessment of alternatives, the material with the smallest amount (the most rational solution) turned out to be aergel. Further studies are supposed to be supplemented with a thermal calculation of the enclosing wall structure using aergel, as well as an assessment of the economic efficiency of the adopted design solution.

**Keywords:** heat-insulating materials, energy efficiency, aergel, heat insulator, plasticgrain, vacuum insulation, PIR-insulation, liquid insulation, multicriteria optimization, decision making, criterion, alternative, multicriteria analysis, method of multicriteria assessment of alternatives.

**For citation:** Tsyplenkov D.E. Selection of the heat-insulating material on the basis of the method of multi-criteria assessment of alternatives // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2022. No.5 (10). Pp. 25-30. EDN: НРҮКЛО

## ВВЕДЕНИЕ

Большая часть энергоресурсов расходуется при эксплуатации здания. Тепловая энергия уходит через различные элементы зданий и сооружений. Поэтому главная задача при повышении энергоэффективности – снизить теплообмен здания с внешней средой [1]. Добиться этого помогает использование энергоэффективных материалов. С каждым годом их число пополняется, так как постоянно ведутся различные испытания, исследования, позволяющие производить инновационные материалы с наилучшими эксплуатационными характеристиками [2, 3]. Использование данных материалов в скором будущем может стать необходимостью, поскольку природные ресурсы ограничены, а цены на них постоянно повышаются. Такие материалы отличаются долговечностью, экологичностью, легкостью, простотой монтажа и так далее. Некоторые материалы при значительно меньшей толщине имеют те же самые показатели энергоэффективности. И поскольку тепла из здания уходит меньше это позволяет при постоянно растущих ценах на коммунальные услуги значительно экономить бюджет [4]. Единственным, но значительным недостатком таких материалов является их высокая цена, которая обосновывается небольшой распространенностью в мире и сложностью изготовления.

## СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

На рынке строительных материалов представлено огромное количество видов теплоизоляционных материалов, позволяющих повысить энергоэффективность зданий и сооружений [5-7]. Традиционными уже давно считаются утеплители на основе минеральной (базальтовой) ваты, пенополистирола и экструдированного пенополистирола. В табл.1 представлены относительно новые виды современных теплоизоляционных материалов [5, 8].

Таблица 1. Современные теплоизоляционные материалы  
Table 1. Modern thermal insulation materials

Материал	Описание	Преимущества	Недостатки
Пластмигран	В основе материала - полистирол и минераловатные гранулы. <i>Область применения:</i> теплоизоляция жилых домов и промышленных сооружений, а также различных инженерных сетей. <i>Коэффициент теплопроводности:</i> 0,08-0,1 Вт/м·К	Безопасен при пожаре, влагоустойчив, хорошие звукоизоляционные свойства, экологически чистый, гибкий, прост и удобен в монтаже, высокая на разрыв прочность, устойчив при воздействии грунтовых вод и микроорганизмов.	Высокая цена. Монтажным работам должны предшествовать работы по обработке поверхности (обезжириванию) для лучшего сцепления с поверхностями.
Вакуумная изоляция	Представляет собой панель из пористого материала (полиуретан, аэрогель и др.), облицованную фольгой, внутри которой создан вакуум. <i>Область применения:</i> утепление жилья (фасады, полы), промышленных зданий, фургонов для перевозки продуктов питания, теплиц и т.д. <i>Коэффициент теплопроводности:</i> 0,004–0,006 Вт/м·К	Высокий срок службы (более 50 лет), безопасность материала при пожаре, экологичность и легкость, низкая плотность молекул, т.е. в нем отсутствует теплопередача, что делает вакуумную теплоизоляцию одним из самых энергоэффективных материалов.	Один из наиболее дорогих и сложных в производстве, сложность монтажа (стыковки панелей), особенно, в труднодоступных местах. При повреждении панели нарушаются ее основные свойства.

Материал	Описание	Преимущества	Недостатки
PIR-изоляция	<p>В основе - пенополиизоцианурат, облицованный фольгированной обшивкой. На 97% материал состоит из пор.</p> <p><i>Область применения:</i> для утепления стен, перекрытий, кровель.</p> <p><i>Коэффициент теплопроводности:</i> <math>\lambda = 0,021</math> Вт/м·К</p>	<p>Влагоустойчив, при горении обугливается внешний слой, образуя углеродную матрицу, которая препятствует дальнейшему распространению огня, срок службы - более 50 лет, легкость (плотность 30-50 кг/м<sup>3</sup>), высокая прочность на сжатие (120 кПа), простота монтажа (за счет профилировки, исключая мостики холода), практически не теряет теплофизические и механические свойства со временем (даже после механических воздействий), не подвержен гниению и разложению, экологичен.</p>	<p>В составе присутствует полиуретан, из которого при нагревании выделяются токсины. Также при температурном воздействии примерно в 200 °С изоляция начинает крошиться и терять прочность, что в некоторых случаях может привести к разрушению теплоизоляции.</p>
Жидкая изоляция	<p>Представляет собой суспензию на основе раствора акриловых полимеров с разреженным газом внутри (технический вакуум).</p> <p><i>Область применения:</i> теплоизоляция стен, полов, кровель, потолков, а также гидроизоляция инженерных систем (трубопроводов).</p> <p><i>Коэффициент теплопроводности:</i> составляет 0,0012 Вт/м·К.</p>	<p>Хорошая адгезия, прочность, водонепроницаемость, стойкость к коррозии, легкость (низкая нагрузка на конструкции), устойчивость к механическим воздействиям и вибрации, герметично изолирует поверхность, экологически безопасен, отсутствие «мостиков холода», негорючесть. Некоторые разновидности данного материала позволяют наносить изоляцию на необработанную поверхность (например, на ржавчину), а также при отрицательных температурах.</p>	<p>Высокая цена.</p>
Аэрогель	<p>Представляет собой желеобразный материал на основе диоксида кремния, жидкая фаза которого заменена газообразной. На 98-99% состоит из обездвиженного воздуха. Плотность аэрогелей всего в 1,5 раза больше, чем у воздуха – может достигать 0,003 г/см<sup>3</sup>. Он является самым легким твердым материалом в мире.</p> <p><i>Область применения:</i> изоляция трубопроводов, легкая промышленность, авиация; теплоизоляция зданий (полы, стены, потолки и др.).</p> <p><i>Коэффициент теплопроводности:</i> 0,01-0,02 Вт/м·К</p>	<p>Низкая теплопроводность, высокая светопропускная способность, что позволяет использовать его в качестве заполнения оконных проемов, гибкость, легкий вес (не утяжеляют конструкций), простота монтажа, высокая огнестойкость (до 1200 °С), водонепроницаемость, гидрофобность, хорошая звукоизоляция, высокая прочность и сопротивление механическим нагрузкам, экологическая безопасность (не содержит опасных веществ), эстетичность.</p>	<p>Высокая цена.</p>

### ОЦЕНКА РАЦИОНАЛЬНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АЭРОГЕЛЯ МЕТОДОМ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ АЛЬТЕРНАТИВ

Теплоизоляционные материалы имеют различные характеристики и параметры. При выборе оптимального варианта достаточно сложно учесть все критерии одновременно, особенно когда часть из них стремится к минимуму, например, как стоимость, а другая к максимуму (срок службы). В таких случаях можно использовать метод многокритериальной оценки альтернатив.

Метод многокритериальной оценки альтернатив – это метод, позволяющий выбрать наиболее эффективное решение, посредством интегральной оценки, принимая во внимание различные критерии, не имеющих прямой зависимости между собой. Классическая модель многокритериальной оценки представлена в [9].

Для выбора теплоизоляционного материала с помощью метода многокритериальной оценки альтернатив сравним аэрогель и шесть других теплоизоляционных материалов. Для начала необходимо выбрать наиболее значимые и общие для всех материалов критерии. Были выбраны: коэффициент теплопроводности, срок службы, стоимость, минимальная и максимальная температуры применения материала, степень пожарной опасности, плотность, коэффициент сопротивления диффузии водяного пара. Числовые значения критериев для рассматриваемых материалов приведены в табл.2.

Для правильной оценки методом многокритериальной оценки альтернатив необходимо также ввести дополнительные варианты – лучший и худший, которые принимаются, как округленное значение суммы наименьшего/наибольшего значения выбранных утеплителей и 10% от их значений.

Таблица 2. Теплоизоляционные материалы и критерии оценки альтернатив  
 Table 2. Thermal insulation materials and criteria for evaluating alternatives

Материал	Коэффициент теплопроводности (при 25 °С), Вт/мК	Стоимость за 1 м <sup>2</sup> , руб.	Срок службы, лет	Максимальная температура применения, °С	Минимальная температура применения (по модулю), °С	Пожарная классификация	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент сопротивления диффузии водяного пара
Худший	0,06	4000	10	800	300	0,5	150	7500
Аэрогель Evergel	0,019	3300	20	675	250	1	1	4,8
Мат из базальтовой ваты Rockwool Техмат	0,037	350	50	640	100	1	43	100
Полиизоциурат (PIR) PirroVentiDuct	0,026	935	30	130	190	1	30	130
Пенополиуретан на основе BASF Elastospray 1622/32	0,026	1250	50	125	125	3	45	100
Экструдированный полистирол Пеноплекс 45	0,034	360	60	75	100	4	40	470
Вспененный каучук K-Flex ST	0,038	2600	25	105	200	1	45	7000
Пеностекло СТЭС D130	0,048	2620	40	430	250	5	130	0
Лучший	0,015	300	80	30	50	6	0,5	0

Далее все показатели критериев необходимо свести к ряду коэффициентов для упрощения дальнейших расчетов по формуле (1):

$$\alpha_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (1)$$

где:  $\alpha_{ij}$  – нормализованные оценки альтернатив по критериям;  
 $x_{ij}$  – оценка  $i$ -ой альтернативы по  $j$ -ому критерию;  
 $x_{min}$  – минимальное значение  $j$ -го критерия по альтернативам;  
 $x_{max}$  – максимальное значение  $j$ -го критерия по каждой альтернативе.

Результаты расчетов сведены в табл.3.

Все критерии стремятся к максимуму или к минимуму. Необходимо свести все коэффициенты к однообразию. Минимизируем их. Для этого, те коэффициенты, критерии которых стремятся к максимуму, необходимо пересчитать. Предположим, что  $\beta \rightarrow \max$ , тогда  $\beta' \rightarrow \min$  и рассчитывается по формуле (2):

$$\beta' = 1 - \beta \rightarrow \min \quad (2)$$

Далее необходимо посчитать сумму по строкам. Так как в нашем случае все критерии минимизировались, то лучшим вариантом будет тот, где сумма наименьшая. Результаты расчетов сведены в табл.4.

Таблица 3. Матрица коэффициентов  
 Table 3. Coefficient matrix

Материал	$\alpha \rightarrow \min$	$\alpha \rightarrow \min$	$\beta \rightarrow \max$	$\beta \rightarrow \max$	$\beta \rightarrow \max$	$\beta \rightarrow \max$	$\alpha \rightarrow \min$	$\alpha \rightarrow \min$
	↘	↘	↗	↗	↗	↗	↘	↘
	Коэффициент теплопроводности (при 25 °С), Вт/мК	Стоимость за 1 м <sup>2</sup> , руб.	Срок службы, лет	Максимальная температура применения, °С	Минимальная температура применения (по модулю), °С	Пожарная классификация	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент сопротивления диффузии водяного пара
Худший	0,055	4000	18	745	275	0,9	145	7700
Аэрогель Evergel	0,100	0,810	0,042	0,897	0,865	0,022	0,001	0,001
Мат из базальтовой ваты Rockwool Техмат	0,550	0,009	0,667	0,846	0,054	0,022	0,292	0,013
Полиизоциурат (PIR) PirroVentiDuct	0,275	0,168	0,250	0,096	0,541	0,022	0,202	0,017
Пенополиуретан на основе BASF Elastospray 1622/32	0,275	0,254	0,667	0,088	0,189	0,457	0,306	0,013
Экструдированный полистирол Пеноплекс 45	0,475	0,012	0,875	0,015	0,054	0,674	0,271	0,061
Вспененный каучук K-Flex ST	0,575	0,620	0,146	0,059	0,595	0,022	0,306	0,909
Пеностекло СТЭС D130	0,825	0,626	0,458	0,537	0,865	0,891	0,896	0,000
Лучший	0,015	315	66	65	90	5,5	0,9	0

Таблица 4. Теплоизоляционные материалы и критерии оценки альтернатив  
 Table 4. Thermal insulation materials and criteria for evaluating alternatives

Материал	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	Σ
	Коэффициент теплопроводности (при 25 °С), Вт/мК	Стоимость за 1 м <sup>2</sup> , руб.	Срок службы, лет	Максимальная температура применения, °С	Минимальная температура применения (по модулю), °С	Пожарная классификация	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент сопротивления диффузии водяного пара	
Худший	0,055	4000	18	745	275	0,9	145	7700	
Аэрогель Evergel	0,100	0,810	0,958	0,103	0,135	0,978	0,001	0,001	3,03
Мат из базальтовой ваты Rockwool Техмат	0,550	0,009	0,333	0,154	0,946	0,978	0,292	0,013	3,26
Полиизоциурат (PIR) PirroVentiDuct	0,275	0,168	0,750	0,904	0,459	0,978	0,202	0,017	3,74
Пенополиуретан на основе BASF Elastospray 1622/32	0,275	0,254	0,333	0,912	0,811	0,543	0,306	0,013	3,43
Экструдированный полистирол Пеноплекс 45	0,475	0,012	0,125	0,985	0,946	0,326	0,271	0,061	3,14
Вспененный каучук K-Flex ST	0,575	0,620	0,854	0,941	0,405	0,978	0,306	0,909	4,68
Пеностекло СТЭС D130	0,825	0,626	0,542	0,463	0,135	0,109	0,896	0,000	3,60
Лучший	0,015	315	66	65	90	5,5	0,9	0	

Согласно методу многокритериальной оценки альтернатив, материалом с наименьшей суммой оказался аэрогель ( $\Sigma = 3,03$ ). Из этого следует, что, если при выборе между данными материалами учитывать все вышеперечисленные критерии, то наиболее рациональным решением будет использование аэрогеля.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методы многокритериальной оценки альтернатив используются для задач как с качественными, так и с количественными критериями [10, 11]. Основная проблема методов многокритериальной оценки – это как получить оценки по отдельным критериям и затем объединить их в общую оценку полезности альтернативы. Тем не менее, как показали приведенные выше расчеты, метод многокритериальной оценки альтернатив может успешно применяться, например, для выбора теплоизоляционного материала для ограждающих стеновых конструкций. Согласно методу многокритериальной оценки альтернатив, теплоизоляционным материалом с наименьшей суммой оказался аэрогель ( $\Sigma = 3,03$ ), из чего следует, что, если при выборе между рассматриваемыми материалами (аэрогель, базальтовая вата, полиизоциурат, пенополиуретан, экструдированный полистирол, вспененный каучук, пеностекло) учитывать все вышеперечисленные критерии, то наиболее рациональным решением будет использование аэрогеля.

Дальнейшие исследования предполагается дополнить теплотехническим расчетом ограждающей стеновой конструкции с использованием аэрогеля, а также оценкой экономической эффективности принятого конструктивного решения [12].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильева И.Л., Немова Д.В. Энергоэффективные материалы нового поколения в строительстве // Экология и строительство. 2018. № 4. С. 18-24. DOI 10.24411/2413-8452-2018-10016. EDN YWJGPR.
2. Балакчина О.Л., Никонорова Н.М. Применение аэрогелей в строительстве // Инновационное развитие строительства и архитектуры: взгляд в будущее: Сборник тезисов участников Международного студенческого строительного форума, посвященного 60-летию Академии строительства и архитектуры, Симферополь, 18-20 ноября 2020. Симферополь: ООО «Издательство Типография «Ариал», 2020. С. 140-144. EDN KYDAPR.
3. Гамаюнова О.С. Энергосберегающие решения, направленные на снижение потребления тепловой энергии // Строительство: новые технологии - новое оборудование. 2019. № 9. С. 72-78. EDN QTEVVK.
4. Комарова Н.Д., Есипова А.А., Комарова К.С. Нанотехнологии в строительной отрасли // Университетская наука. 2016. № 1(1). С. 29-31. EDN WAWTFB.
5. Цыпленков Д., Гамаюнова О. Современные строительные энергоэффективные материалы // Строительство: новые технологии - новое оборудование. 2021. № 12. С. 6-11. EDN TKVKWH.
6. Гамаюнова О.С. Методика обоснования теплотехнических характеристик стеновых конструкций жилых зданий: специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, 2021. 166 с. EDN CJHWXK.
7. Гамаюнова О. С. Выбор оптимального варианта утепления жилых домов в различных климатических зонах // Строительство и техногенная безопасность. 2019. № 16(68). С. 89-97. EDN ANXMJJ.
8. Шакирова А., Терех М.Д. Использование аэрогеля в фасадных и светопрозрачных конструкциях // Неделя науки ИСИ: сборник материалов Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 04-10 апреля 2022 года. Том Часть 1. Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 184-185. EDN BRYHQZ.
9. Окунева Е.О. Сравнение математических моделей принятия решений в условиях определенности // Интернет-журнал Науковедение. 2016. Т. 8. № 3(34). С. 65. EDN WIRJHV.
10. Гольдштейн А.Л. Многокритериальная оценка альтернатив // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2012. № 6. С. 18-24. EDN PWNYNR.
11. Родригес В.С., Мокрова Н.В. Многокритериальная оценка альтернатив территориального планирования при строительстве плотин с использованием технологий географических информационных систем // Отходы и ресурсы. 2020. Т. 7. № 1. С. 11. DOI 10.15862/11INOR120. EDN PLBWLK.
12. Terekh M., Tretyakova D., Morozova N., Zemītis J. Cost and Energy Assessment of Buildings Thermal Protection Level // Proceedings of EECSE 2019: Energy, Environmental and Construction Engineering, St. Petersburg, Russia, 19-20 November 2019. Cham: Springer, 2020. P. 191-204. DOI 10.1007/978-3-030-42351-3\_17. EDN VCSMPV.

## ОБ АВТОРАХ

**Даниил Евгеньевич Цыпленков** – студент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: tsyplenkov.de@edu.spbstu.ru

## ABOUT THE AUTHORS

**Daniil E. Tsyplenkov** – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: tsyplenkov.de@edu.spbstu.ru