



ООО «ПирроГрупп»

Плоские кровли с теплоизоляцией из плит PIRRO®
на основе пенополиизоцианурата (PIR) с мягкими облицовками
производства компании ПирроГрупп (Россия) с применением
полимерных мембран

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
эффективности инвестиций

Аннотация

Значительная доля энергетических затрат в Российской Федерации расходуется на отопление жилых зданий. Еще 20 лет назад основное внимание уделялось минимизации капитальных затрат и недостаточно учитывались эксплуатационные затраты ввиду низкой стоимости топлива. Положение резко изменилось в результате значительного роста цен на топливо внутри страны.

Были приняты и действуют законодательные акты, в том числе закон «Об энергосбережении» (1996 г.), закон «О защите прав потребителя» (1996 г.), направленные на энергосбережение и эффективное использование энергии, Федеральный закон № 261 ФЗ «Об энергосбережении...».

В жизненном цикле здания на стоимость строительства приходится пятая часть общих затрат, остальные расходы - это затраты на эксплуатацию. Очевидно, что уменьшение расходов на эксплуатацию становится ключевым условием в решении задач энергоэффективности.

Реализовать это условие в современной архитектуре и строительстве возможно через совершенствование архитектурно-планировочных решений, применение наружных ограждающих конструкций здания с инновационными теплоизоляционными материалами, внедрением эффективных систем обеспечения микроклимата и энергосбережения, повышением качества проектирования зданий.

Технико-экономическое обоснование ориентировано на профессиональное сообщество проектировщиков, архитекторов, передовых сотрудников строительных организаций и отделов ПТО, использующих современные технологии, заказчиков, застройщиков-инвесторов.

Для наглядности в статье приведены сравнительный анализ для двух вариантов конструктивного исполнения кровли – с применением энергоэффективной теплоизоляции на основе пенополиизоцианурата и с применением минеральной ваты из базальтовых пород на синтетическом связующем, а также расчет простой (бездисконтной) окупаемости сравниваемых конструктивных решений.

В статье даются ссылки на исследования европейских институтов в области теплоизоляции, в частности, на исследование «Изменения состояния изоляционных материалов из минеральной ваты в результате воздействия влаги на примере плоской кровли» (1), подготовленное Аахенским институтом строительных браков и прикладной строительной физики совместно с Научно-исследовательским институтом теплоизоляционных материалов FIW(Германия). Данное исследование позволяет оценить воздействие влаги на прочность (долговечность) и теплопроводность минеральной изоляции.

1. Объект исследования

В качестве объекта исследования принят фрагмент кровли одноэтажного здания производственного назначения с прогонами по фермам, устройством крыши по профилированному листу марки Н75-750. Слой пароизоляции выполняется из полиэтиленовой пленки 200мкм.

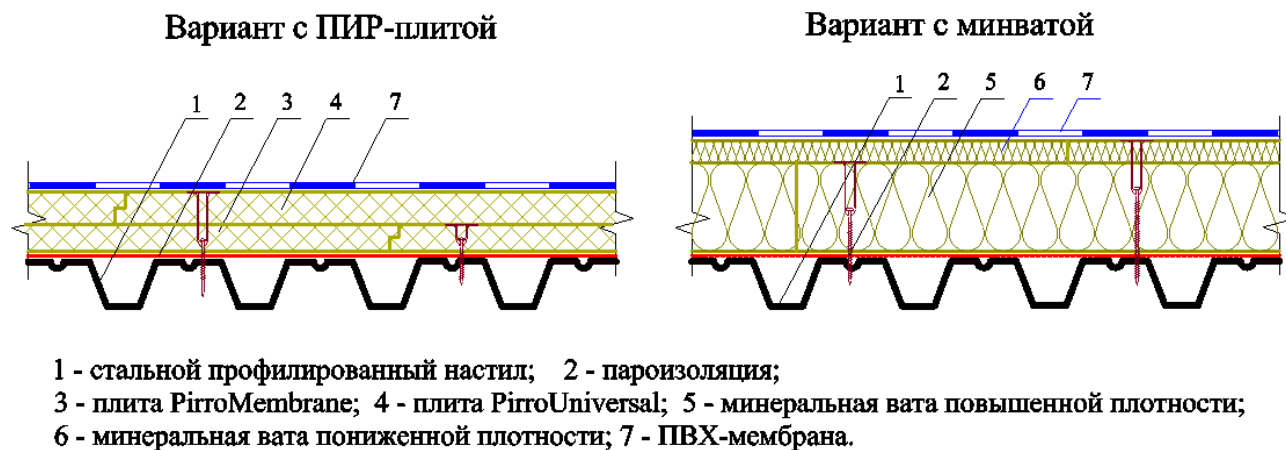
В качестве слоя теплоизоляции рассмотрены 2 варианта:

-вар.1: пенополиизоциануратные плиты на основе полиуретана – PIR-плита марки PirroMembrane, укладываемая нижним слоем и плита PirroUniversal, укладываемая верхним слоем (далее ПИР-плита, PIR-плита);

-вар.2: минеральная вата на основе базальта - плотностью 100-120 кг/м³, укладываемая нижним слоем и плотностью 180-200кг/м³, укладываемая верхним слоем.

В качестве гидроизоляции принята полимерная ПВХ-мембрана Пластфоил марки F толщиной 1,5мм.

В качестве энергоносителя для отопления в расчете принята электроэнергия.
Сечение по кровле представлено на рис.1.



1 - стальной профилированный настил; 2 - пароизоляция;
3 - плита PirroMembrane; 4 - плита PirroUniversal; 5 - минеральная вата повышенной плотности;
6 - минеральная вата пониженной плотности; 7 - ПВХ-мембрана.

Рис. 1 Варианты конструкции кровельного пирога для PIR-плиты и минеральной ваты

2. Исходные данные для расчета

В качестве исходных климатических данных для проектирования выбраны климатические условия Москвы.

Теплофизические показатели вариантов утеплителя представлены в таблице 1. Расчетные климатические и теплоэнергетические параметры приняты согласно СП131.13330 и представлены в таблице 2.

Геометрические характеристики кровли рассматриваемого производственного здания не представлены в связи с тем, что в работе рассчитываются удельные эксплуатационные потери тепловой энергии и капитальные затраты по утеплению, приведенные к 1 м² кровли.

Вариант утеплителя	Характеристика материала в сухом состоянии		Расчетное массовое отношение влаги в материале, %, при условиях эксплуатации		Расчетные коэффициенты теплопроводности, Вт/м°С при условиях эксплуатации		Прочность на сжатие верхнего слоя, кПа
	Плотность, кг/м ³	Коэф-нт теплопроводности, Вт/м°С	А	Б	А	Б	
Минвата аналог РУФ БАТТС Н	100-120	0,039	2	5	0,041	0,042	≥35
Минвата аналог РУФ БАТТС В	180-200	0,041	2	5	0,043	0,044	≥70
PIR-плита Pirro Membrane	31	0,023	1	2	0,024	0,025	≥120
PIR-плита Pirro Universal	31	0,023	1	2	0,024	0,025	≥120

Таблица 1. Теплофизические и механические показатели вариантов утеплителя

Показатель	Обозначение параметра	Единица измерения	Расчетное значение
Расчетная температура наружного воздуха	tн	°С	-25
Средняя температура наружного воздуха за отопительный период	tот	°С	-2,5
Продолжительность отопительного периода	zот	сут/год	205
Расчетная температура внутреннего воздуха	tв	°С	20
Градусо-сутки отопительного периода	ГСОП	°С·сут/год	4551

Таблица 2. Расчетные условия для производственных зданий, расположенных на территории Москвы.

3. Методика расчета эксплуатационных затрат

Исходя из данных, представленных в таблице 1, рассчитывается базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций.

Значение R_0^{mp} (см. примечание к таблице 3 СП 50.13330) рассчитывается по формуле:

$$R_0^{mp} = a \cdot \text{ГСОП} + b$$

где ГСОП – градусо-сутки отопительного периода (см. данные таблиц 1 и 2);

a, b – коэффициенты, значения которых следует принимать по данным табл. 3 СП 50.13330 для соответствующих групп зданий и конструкций:

для покрытий производственных зданий $a=0,0004, b = 1,6$;

Используя данные таблицы 1, получаем

$$R_0^{mp} = a \cdot \text{ГСОП} + b = 0,0004 \cdot 4551 + 1,6 = 3,42_{\text{м}^2 \text{ °С/Вт}}$$

Рассматривая фрагмент кровли как неоднородную конструкцию с теплопроводными включениями в виде тарельчатых крепежных элементов, понижающих сопротивление теплопередаче, назначаем коэффициент неоднородности g :

-для минваты $g=0,93$ (при размере применяемых в кровле плит 600x1200мм их крепят на 4 крепежных элемента*, то есть 5,6шт./м.кв.).

-для PIR-плиты $g=0,96$ (при размере применяемых в кровле плит 1200x2400мм их крепят на 9 крепежных элементов*, то есть 3,12шт./м.кв.).

* в обоих случаях количество назначено исходя из конструктивных соображений, при условии что рассматриваемый фрагмент кровли одинаково нагружен (ветровые нагрузки и др. внешние условия).

Толщина слоя теплоизоляции определяется по формуле Е.6 СП50.13330 с учетом коэффициента теплотехнической неоднородности g :

$$R_0^{усп} = \frac{1}{\alpha_{в}} + \sum_s R_s + \frac{1}{\alpha_{н}},$$

Где $\sum_s R_s$ - сумма термических сопротивлений всех входящих в конструкцию слоев.

При этом условием соблюдения поэлементных требований станет выполнение неравенства:

$$R_0^{усп} \geq R_0^{тп}$$

Используя данные, получаем для ПИР-плиты:

$$R_0^{ycl} = 1/8,7 + d_{\text{ПИР}}/\lambda_{\text{ПИР}} + 1/23 \geq R_0^{mp}/\gamma$$

$$d_{\text{ПИР}} \geq (3,42/0,96 - 1/8,7 - 1/23) \cdot 0,025 = 0,085 \text{ м}$$

Округляем значение толщины плиты до ближайшего типоразмера в большую сторону:

$$d_{\text{ПИР}} = 90 \text{ мм}$$

Для минваты

$$R_0^{ycl} = 1/8,7 + d_{\text{МВ}}/\lambda_{\text{МВ}} + 1/23 \geq R_0^{mp}/\gamma$$

$$d_{\text{МВ}} \geq (3,42/0,93 - 1/8,7 - 1/23) \cdot 0,042 = 0,148 \text{ м}$$

Округляем значение толщины плиты до ближайшего типоразмера в большую сторону:

$$d_{\text{МВ}} = 150 \text{ мм}$$

Корректируем фактическое значение приведенного сопротивления теплопередачи конструкции (с учетом назначенной толщины утеплителя) и коэффициента γ .

Для минваты:

$$R_{\text{пр(МВ)}} = 3,47 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт},$$

Для ПИР-плиты:

$$R_{\text{пр(ПИР)}} = 3,61 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$$

Рассчитаем значение коэффициента теплопередачи U , Вт/(м²·°C), который показывает, сколько Вт тепловой энергии проходит через покрытие площадью 1 м² при разности внутренней и наружной температур с разных сторон ограждающей конструкции 1 °C:

$$U = \frac{1}{R_{\text{пр}}}$$

Для минваты

$$U_{\text{МВ}} = 0,288 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}),$$

Для ПИР-плиты

$$U_{\text{ПИР}} = 0,277 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$$

Для расчета количества тепловой энергии (кВт·ч), проходящей через 1 м² кровли, величину U следует умножить на число часов отопительного периода и среднюю за отопительный период разность температур. Эти данные выведены в табл.1. Суммарные годовые потери тепловой энергии через 1 м² кровли выражены формулой:

$$Q_{\text{кВт}\cdot\text{ч}} = \frac{U \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{от}}) \cdot z_{\text{от}} \cdot 24}{1000},$$

где $t_{\text{в}}$ - температура внутреннего воздуха в помещениях здания, принимаемая по ГОСТ 30494 (назначена в табл.1)

$z_{\text{от}}$ – количество суток отопительного периода, принимаемой для жилых зданий, расположенных на территории Ленинградской области – 228 суток (табл. 1);

24 – количество часов в сутках;

1000 – переводной коэффициент мощности теплового потока из Вт в кВт.

Данную формулу следует применять для объектов с отоплением от электрической сети.

Если к объекту подведена тепловая энергия от городской или районной ТЭЦ, то удобнее пользоваться формулой:

$$Q_{\text{Гкал}} = \frac{U \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{от}}) \cdot z_{\text{от}} \cdot 24}{1000 \cdot 1163} \quad \text{где}$$

1163 – переводной коэффициент из кВт·ч в Гкал.

выражение $(t_b - t_{от}) \cdot Z_{от}$ - градусо-сутки отопительного периода, согласно СП 50.13330 (сокращенно - ГСОП, указано в табл. 1).

Таким образом, формулы тепловых потерь можно упростить:

$$Q_{кВт\cdotч} = \frac{U \cdot ГСОП \cdot 24}{1000} = 0,024 \cdot U \cdot ГСОП;$$

$$Q_{Гкал} = \frac{U \cdot ГСОП \cdot 24}{1000 \cdot 1163} = \frac{0,024 \cdot U \cdot ГСОП}{1163}.$$

Для варианта кровли с минватой

$$Q_{МВ} = 0,024 \cdot U_{МВ} \cdot ГСОП = 0,024 \cdot 0,288 \cdot 4551 = \mathbf{31,46 кВт\cdotч}$$

Для варианта кровли с ПИР-плитой

$$Q_{ПИР} = 0,024 \cdot U_{ПИР} \cdot ГСОП = 0,024 \cdot 0,277 \cdot 4551 = \mathbf{30,26 кВт\cdotч}$$

Следует отметить два момента:

1. величина тепловых потерь напрямую зависит от термического сопротивления конструкции $R_{пр}$, которое в свою очередь определено назначенной толщиной теплоизоляции. То есть, чем толще по результатам расчета назначен слой утеплителя, тем ниже будут теплотери.
2. рассчитанные тепловые потери через конструкцию не учитывают изменение теплосберегающих свойств утеплителя со временем, возникающее при потере начальной формы под внешними нагрузками (снеговая, эксплуатационная, потеря прочностных свойств со временем).

В связи с этим для корректности дальнейшего расчета следует принять корректировку величины теплотери через минеральную вату в соответствии с приведенным ниже обоснованием.

Вода попадает в теплоизоляционный слой через в виде протечек атмосферной влаги и через прорывы и неплотности в пароизоляционном слое.

Водяные пары в силу разницы парциальных давлений снаружи и внутри помещения стремятся выйти в зону пониженного парциального давления. Так, в зимнее время водяные пары стремятся в сторону улицы, летом – наоборот. Водяной пар внутри утеплителя находится в состоянии диффузии. Структура минеральной ваты способствует его перемещению на всю толщину. В пограничных слоях (на границе со слоем гидро- и пароизоляции), имеющих пониженную температуру, водяной пар охлаждается и конденсирует, образуя водные резервуары. В случае отрицательных температур конденсат под гидроизоляцией замерзает.

Согласно результатам исследования (1), в нем сделаны следующие выводы:

1. Минеральная вата как утеплитель способна накапливать влагу.
2. Тепловые потери через минеральную вату следует рассматривать не только по показателю теплопроводности, но и с учетом переноса тепла в результате влагопередачи во влажном материале.
3. При воздействии влаги устойчивость минераловатных изоляционных плит в условиях сжатия 10% значительно снижается (согласно проведенных испытаний, прочность образцов во влажном состоянии уменьшается на 25-50% от начальной в сухом состоянии).
4. В отличие от изоляционных пеноматериалов, структура которых терпит лишь незначительные изменения при гораздо более сильном воздействии влаги, изоляционные материалы из минеральной ваты намного более чувствительны к внешним условиям.

При сильном давлении на минеральную вату происходит разрушение ее волокон и связей между ними, что приводит к необратимому уплотнению волокнистой структуры. Ввиду этого, данный материал может выдержать лишь ограниченное количество нагрузок.

Данные выводы следует распространить на усредненные затраты на теплопотери

Для корреляции теплопотерь принимаем в расчете среднее значение теплопотерь за весь расчетный период эксплуатации при изменении теплопроводных свойств минваты до 30%:

$$Q_{\text{МВ(Ф)}} = (Q_{\text{МВ}} + Q_{\text{МВ,30}}) / 2 = 36,18 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$$

4. Методика расчета эксплуатационных затрат

Под эксплуатационными затратами в данной статье принимаем затраты на отопление здания. Для расчета стоимости эксплуатационных затрат (\mathcal{E}) через 1 м² площади кровли за один отопительный период величину теплопотерь необходимо умножить на стоимость тепловой или электрической энергии (в зависимости от принятой в здании системы отопления и используемых для отопления источников энергоснабжения):

$$\mathcal{E} = Q \cdot c_T,$$

где Q - суммарные потери тепловой энергии через 1 м² кровли;

c_T - величина тарифа, принимаемая:

- руб/Гкал – при централизованном отоплении от городской ТЭЦ;

- руб/кВт·ч – при электрическом теплоснабжении

В нашем расчете с принятой схемой электрического отопления примем среднюю величину тарифов для потребителей (производственных предприятий). По состоянию на 06.2015 года она составляет 3,20 руб/кВт·ч.

Тогда величина эксплуатационных годовых затрат на 1 м² составит:

Для варианта с ПИР-плитой – $\mathcal{E}_{\text{ПИР}} = Q_{\text{ПИР}} \cdot c_T = 30,26 \cdot 3,20 = 97$ руб. (с округлением до целого)

Для варианта с минватой – $\mathcal{E}_{\text{МВ}} = Q_{\text{МВ}} \cdot c_T = 36,18 \cdot 3,20 = 116$ руб. (с округлением до целого)

5. Анализ структуры затрат при выборе конструктивного решения

Выбор конструктивного решения проводим на основе метода приведенных затрат.

Затраты на капитализацию и эксплуатацию кровельного пирога за расчетный период эксплуатации, приведенные к 1 м² их площади, руб/м², складываются из начальных затрат на строительство K и эксплуатационных затрат \mathcal{E} :

$$П_{\text{МВ}} = K_{\text{МВ}} + \mathcal{E}_{\text{МВ}} \cdot T_{\text{МВ}}$$

$$П_{\text{ПИР}} = K_{\text{ПИР}} + \mathcal{E}_{\text{ПИР}} \cdot T_{\text{ПИР}}$$

где $\mathcal{E}_{\text{МВ}}$, $\mathcal{E}_{\text{ПИР}}$ – эксплуатационные затраты, учитывающие потери тепловой энергии через 1 м² кровли за один отопительный сезон, руб/м²·год;

$T_{\text{МВ}}$, $T_{\text{ПИР}}$ – долговечность кровли.

Здесь под долговечностью будем понимать такой срок эксплуатации, при котором потеря изначально заданных проектом расчетных параметров конструктивных слоев кровельного пирога не изменится более чем на 30% (то есть еще будет экономически целесообразно).

Ввиду того, что все прочие слои кровельного пирога в расчете взяты одинаковые, будем сравнивать долговечность материалов теплоизоляционного слоя.

Для минваты* долговечность $T_{\text{МВ}} = 10$ лет эксплуатации,

Для ПИР-плиты** $T_{\text{ПИР}} = 30$ лет эксплуатации.

Данные по сроку службы приняты на основе:

- материалов исследований (1) – для минеральной ваты

- для ПИР-плиты – немецким институтом FIW Munich в области исследований и испытаний тепловой изоляции по заказу ассоциации производителей полиуретана в Европе PU EUROPE (PU Europe – Factsheet 16 Durability of polyurethane insulation products»). Для ПИР-плит разрешается перемещение рабочих по ним в процессе укладки, а также обслуживающего персонала для ежедневной эксплуатации оборудования на крыше и пр. работ. При этом в отличие от волокнистой изоляции, ПИР-изоляция не теряет своих теплофизических и механических свойств (PU Europe – Factsheet 3 Repetitive loads on flat roofs - Requirements for the insulation layer).

Капитальные затраты на устройство кровли складываются из затрат на слои пароизоляции, теплоизоляции и гидроизоляции. Стоимости материалов в конструкции кровли представлены в табл.3 и табл.4.

Табл.3 Стоимость 1 м.кв. кровельного пирога для варианта с ПИР-плитой

Конструктивные слои кровли	Ед. изм.	Норма расхода на 1м.кв.	Стоимость, руб. за ед.изм.	Всего, руб.:
Пароизоляционная пленка 200мкм	м.кв.	1,1	17	18,7
PIR-плита марки PirroMembrane 50мм	м.кв.	1,05	470,53	494,1
PIR-плита марки PirroUniversal 40мм	м.кв.	1,05	324,13	340,3
Крепеж плиты	шт.	3,12	6,48	20,2
ПВХ-мембрана Пластфоил марки F	м.кв.	1,15	400	460,0
Крепеж мембраны	шт.	4	6,48	25,9
			Итого К _{ПИР} *:	1359

* - с округлением до целого.

Табл.4 Стоимость 1 м.кв. кровельного пирога для варианта с минватой

Конструктивные слои кровли	Ед. изм.	Норма расхода на 1м.кв.	Стоимость, руб. за ед.изм.	Всего, руб.:
Пароизоляционная пленка 200мкм	м.кв.	1,1	17	18,7
Минвата аналог РУФ БАТТС Н, 110мм	м.кв.	1,05	499,158	524,1
Минвата аналог РУФ БАТТС В, 40мм	м.кв.	1,05	320,724	336,8
Крепеж плиты	шт.	5,6	7,78	43,6
ПВХ-мембрана Пластфоил марки F	м.кв.	1,15	400	460,0
Крепеж мембраны	шт.	4	7,78	31,1
			Итого К _{МВ} *:	1414

* - с округлением до целого.

Фактическая стоимость работ с применением ПИР-изоляции будет ниже аналогичных с минеральной ватой. В запас расчета эту разницу брать не будем и исходим из условия равенства фактических расценок за единицы работ в натуральном выражении (за м.кв. утеплителя, за м.кв. пароизоляции и т.п.).

Тогда приведенные затраты составят:

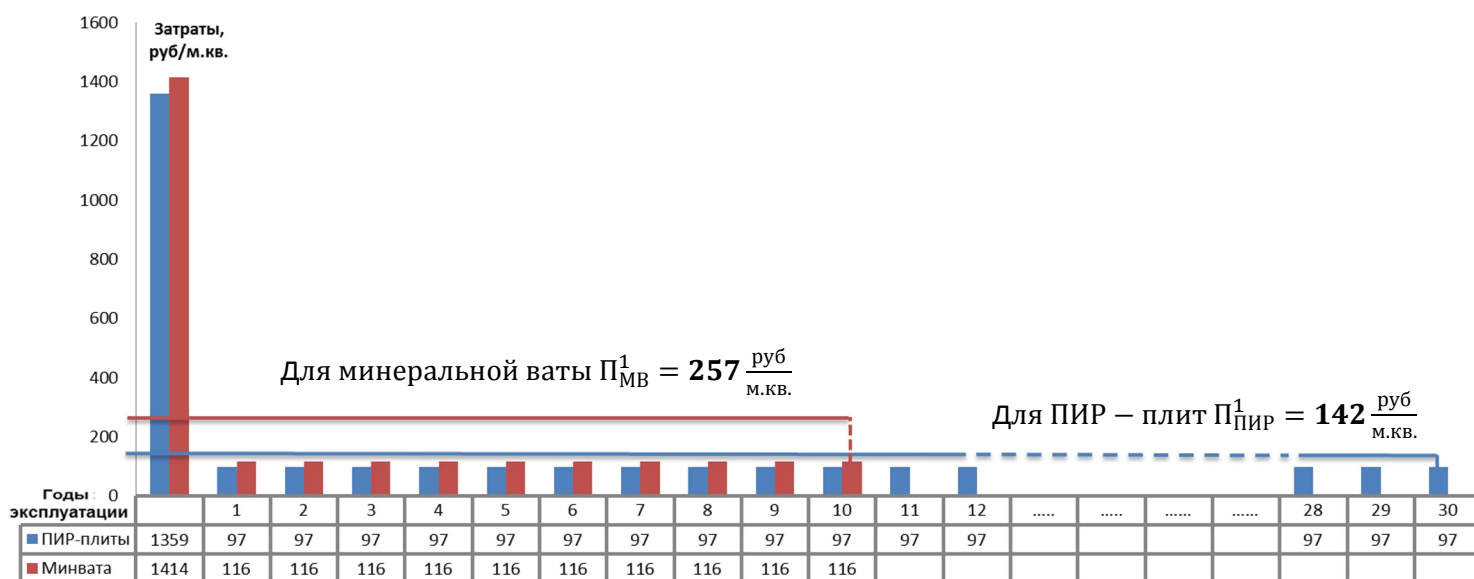
Для варианта с ПИР-плитой:

$$П_{\text{ПИР}} = К_{\text{ПИР}} + Э_{\text{ПИР}} \cdot Т_{\text{ПИР}} = 1359 + 97 \times 30 = 4269 \text{руб.}$$

Для варианта с минватой:

$$П_{\text{МВ}} = К_{\text{МВ}} + Э_{\text{МВ}} \cdot Т_{\text{МВ}} = 1414 + 116 \times 10 = 2574 \text{руб.}$$

Наглядно динамику распределения приведенных затрат на строительство и эксплуатацию конструкции при сравнении вариантов утепления ПИР-плитами и минеральной ватой можно увидеть на графике:



Для инвесторов и эксплуатирующих организаций наиболее интересным будет являться сравнение удельных показателей приведенных капитальных затрат на метр квадратный конструкции к году эксплуатации, который можно рассчитать по формуле:

$$P^1 = \frac{P}{T}, \text{руб.}$$

Тогда для решения на минеральной вате:

$$P_{\text{МВ}}^1 = \frac{P_{\text{МВ}}}{T_{\text{МВ}}} = \frac{2574}{10} = \mathbf{257} \text{ руб. (с округлением до целого)}$$

Тогда для решения на ПИР-плите:

$$P_{\text{пир}}^1 = \frac{P_{\text{пир}}}{T_{\text{пир}}} = \frac{4269}{30} = \mathbf{142} \text{ руб. (с округлением до целого)}$$

Данные значения изображены на графике горизонтальными линиями.

6. Дополнительные преимущества

ПИР-изоляция обладает рядом других преимуществ, обуславливающих экономические выгоды ее применения, но не учтенных в расчете:

-Низкая плотность материала ПИР-плит. В конструкциях крыш с профнастилом минеральная вата составляет до 55% от общего веса конструкции крыши, включая вес несущих элементов, при использовании ПИР-плиты на долю утеплителя приходится до 11%. Таким образом, применение ПИР-плит дает сокращение нагрузки на каркас здания и обеспечивает снижение металлоемкости проектируемых несущих конструкций (для минваты ее доля в весе всего здания с учетом снеговых нагрузок достигает до 9%, для ПИР-изоляции она уменьшается до 1%).

-Типоразмеры плит для крыш 2400x1200мм, низкий вес и меньшее количество точек крепления на метр квадратный увеличивают производительность и сокращают сроки строительства. Так, для кровли площадью 10тысяч м.кв. сроки устройства кровли сократятся на 2 недели.

-Данный тип изоляции рекомендуется к применению в сырое время года (влага легко удаляется с поверхности облицовки).

-Низкая теплопроводность ПИР-плит обуславливает минимальную толщину теплоизоляционного слоя, что означает меньший его объем для транспортировки, для подъема и монтажа. Так, для кровли площадью 10тысяч м.кв. для перевозки ПИР-плит потребуется на 70% меньше автомашин, нежели при перевозке минеральной ваты.

7. Заключение

В статье произведен сравнительный стоимостной анализ конструктивного решения кровельного пирога производственного здания на основе двух видов теплоизоляционных материалов – минеральной ваты и ПИР-плиты на основе полиизоцианурата; представлены расчеты, обосновывающие экономическую целесообразность при принятии решения в пользу энергоэффективной теплоизоляции.

На основе статьи можно сделать следующие выводы:

1. Эксплуатационные затраты (затраты на отопление) не привязаны к типу утеплителя при подборе толщины по нормируемой методике, при этом они зависят от его толщины.
2. Срок службы материалов, образующих ограждающую конструкцию, и заданные на этапе проектирования теплоэнергетические показатели должны быть сопоставимы. Минеральная вата не способна обеспечить достаточную долговечность и надежность конструкции для решений с кровельным ковром на основе битумно-полимерных, и особенно, более долговечных полимерных материалов.
3. Применение ПИР-изоляции в ограждающих конструкциях крыш зданий позволяет повысить качество проектных решений и минимизировать капитальные затраты для инвестора, заказчика, увеличить межремонтный интервал конструкций для эксплуатирующих организаций.