



Воздействие солнечного излучения на температуру теплоизоляционных материалов в кровельных конструкциях

НАУЧНЫЙ ПАРТНЕР:

DCA IUAV (ВЕНЕЦИАНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРХИТЕКТУРЫ)
ПРОФ. ПЬЕРКАРЛО РОМАНЬОНИ
ПРОФ. ФАБИО ПЕРОН

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

Эффективность теплоизоляционных материалов, которые применяются для изоляции крыши, зависит от теплового воздействия солнечной радиации. В особенности это касается плоских крыш, в которых теплоизоляция располагается непосредственно под гидроизоляционной мембраной.

Двумя наиболее важными аспектами данной области применения являются:

- высокие уровни температуры вследствие солнечной радиации;
- значительные колебания температуры в разное время суток и года.

Данное исследование было посвящено изучению распределения температуры внутри кровельного пирога и особенно изучению максимальных температур, которые могут достигаться в теплоизоляционном слое.

Исследование состояло из двух стадий:

- Моделирование: с помощью расчетной модели, для всех слоев кровельного пирога был рассчитан температурный градиент, моделирующий возможные изменения нескольких климатических параметров.

- Практическая валидация: для валидации данной модели были проведены измерения в реальных условиях на двух различных крышах.

Результаты исследования показали, что теплоизоляционный слой, контактирующий с наружной гидроизоляционной мембраной плоских крыш, может достигать температуры более 70°C во время периода самой интенсивной солнечной радиации. В жарком средиземноморском климате южной Европы температура теплоизоляции может достигать 80°C. Максимальные температуры на арочных крышах в более умеренных климатических зонах могут достигать 67°C. Исследование показало, что суточные колебания температуры составляют около 40°K внутри теплоизоляционного материала и около 50°K на поверхности.

Эти температурные показатели превышают максимальные функциональные температуры некоторых теплоизоляционных материалов. С целью обеспечения качества и долговечности кровельных систем, инженеры и архитекторы должны знать о том, как высокие температуры в зонах интенсивного солнечного излучения, влияют на стабильность размеров теплоизоляционного материала.

СТАДИЯ 1: ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Для данного анализа была использована модель вычислений «HEAT 2». Программное обеспечение для этого моделирования было разработано



Лундским университетом (Гётеборгская группа по вычислительной строительной физике совместно с Департаментом строительной физики), а также Строительной технологической группой Массачусетского технологического института (США).

Данный метод вычислений позволяет моделировать составные конструкции из различных материалов (в данном случае кровельный пирог), а также имитировать теплообмен для определения точной температуры в каждом из слоев.

После создания модели и введения данных, относящихся к материалам кровельного пирога (например, толщина теплоизоляционного слоя, теплопроводность, плотность и удельная теплоемкость мембран и т.п.), в модель были введены климатические условия (интенсивность солнечного излучения, температура воздуха, влажность и т.п.). Модель обеспечила получение подробного описания температурного градиента в каждом отдельном слое.

Модель учитывает конвективный теплообмен и теплообмен излучением как по направлению внутрь кровельного комплекта, так и наружу. Эти параметры могут быть причиной значительной разницы между реальными и расчетными данными.

В ходе моделирования были проанализированы климатические условия различных европейских регионов с учетом июльского температурного пика, который представляет собой период с наибольшей солнечной радиацией.

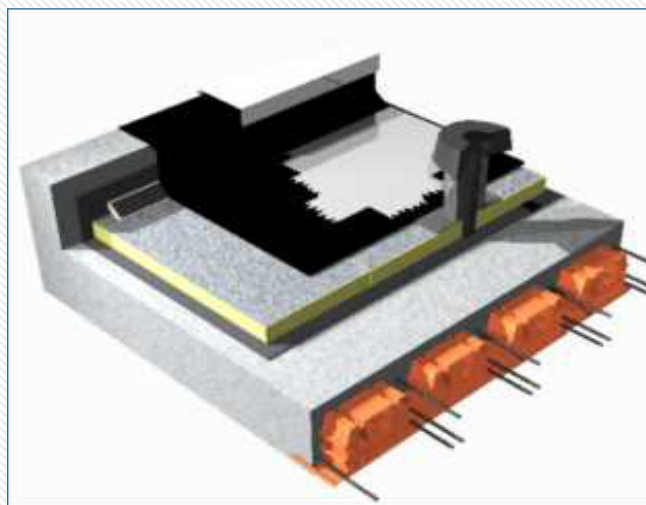
Из документальных источников были взяты средние показатели для Трапани (Италия - 38°01'), Рима (Италия - 41°53'), Венеции (Италия - 45°26' с.ш.) и Лондона (Великобритания - 52° с.ш.).

Также можно было определить точные статистические данные за июль 2003 г. для Венеции и за июль 1984 г. для Цюриха (Швейцария - 47°48' с.ш.).

При анализе теплового потока учитывались семидневные временные

рамки, чтобы оценить прогрессирующий нагрев крыши. При моделировании оценивались различные изоляционные материалы. Было установлено, что при одном и том же значении сопротивления теплопередаче (разные толщины), различия в температурных уровнях были незначительными.

При моделировании был проведен анализ различных типов кровли. Наиболее критической, с точки зрения полученных температурных уровней, была плоская крыша с внешней битумной гидроизоляцией.



Анализ был проведен с учетом используемых материалов, указанных в **Таблице 1**.

СТАДИЯ 1: ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Плоская крыша с внешней водонепроницаемой мембраной подвергается значительному разогреву, а теплоизоляционный слой, находящийся в контакте с верхней гидроизоляционной мембраной, может достигать температуры выше 70°C даже в климатических зонах с умеренным уровнем солнечной радиации.

Наружный слой (водонепроницаемая мембрана) имеет относительно небольшую массу и толщину, но обладает относительно высоким коэффициентом поглощения ($\alpha = 0,95$), что может привести к разогреву теплоизоляционного слоя до температуры 90°C в «очень горячих» климатических зонах (Трапани).

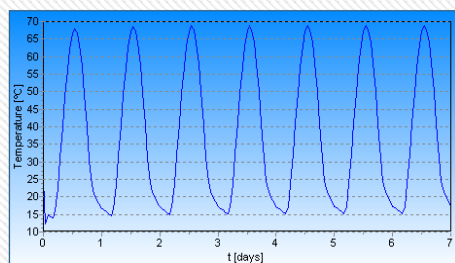
Слой	Описание	Толщина [м]	Плотность [кг/м³]	Теплопроводность, λ [Вт/(м·К)]	Удельная теплоемкость [кДж/(кг·К)]
Базовая опора	Предварительно напряженные железобетонные плиты	0.25	1800	0.90	0.90
Грунтовочное покрытие	Битумная эмульсия	0.001	600	0.17	1.80
Пароизоляция	Битумная мембрана, упрочненная алюминиевой фольгой	0.003	1300	0.26	0.88
Слой расплавленного окисленного битума (1,5 кг/м²), холодная плавка, полиуретановая однокомпонентная пена (30 г/м²)		0.004	1300	0.26	0.88
Теплоизоляция	Плита пенополиуретана/полиизоцианурата (облицовка: стекловолокно)	0.060	35	0.03	1.40
Битумная мембрана	Битумная мембрана, армированная волокнами полиэстера	0.004	1125	0.17	1.47
Битумная мембрана, отделанная асбестоцементной крошкой	Битумная мембрана, отделанная асбестоцементной крошкой и армированная волокнами полиэстера	0.004	1000	0.15	1.20

Таблица 1

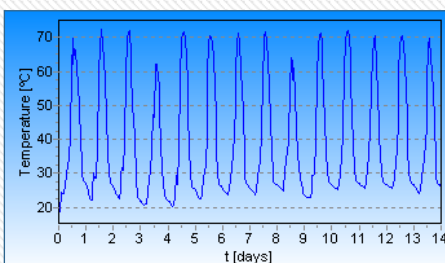
Значения температур внутри теплоизоляционного слоя (около 3-х мм от верхней поверхности теплоизоляции), полученные с помощью математической модели, приведены на нижеследующих графиках.

Расчетные значения температур, особенно в более жарких климатических

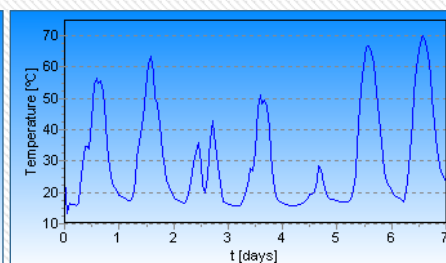
зонах и в суточный период максимальной солнечной радиации, очень часто превышают самые высокие функциональные температуры ряда теплоизоляционных материалов и, как следствие, несут в себе большие риски для целостности и размерной стабильности всего кровельного пирога.



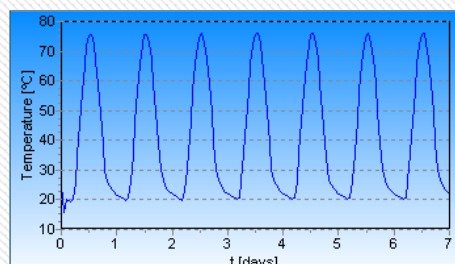
Лондон: средние климатические данные



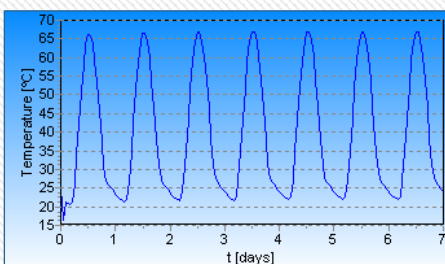
Венеция: реальные климатические данные (июль 2003)



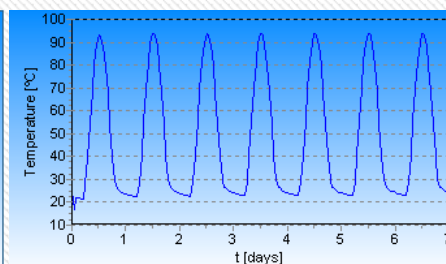
Цюрих: реальные климатические данные (июль 1984)



Рим: средние климатические данные



Венеция: средние климатические данные



Трапани: средние климатические данные

СТАДИЯ 2: ПРАКТИЧЕСКАЯ ВАЛИДАЦИЯ МОДЕЛИ

После процесса моделирования «HEAT 2» в исследовательском проекте следует практическая валидация модели, включая проверку следующих аспектов:

- воздействие особых факторов, влияющих на состояние кровли в каждом местоположении (вентиляция крыши, факторы затенения);
- воздействие параметров, участвующих в расчете (коэффициент поглощения, коэффициента излучения и т.п.) в реальных условиях эксплуатации.

МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ И ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗОВАННОЕ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СТАДИИ

Экспериментальные измерения проводились на офисном здании, расположенном в промышленной зоне города Падуи (45°19').

Под наблюдением находились две различные конструкции крыши:

- Плоская крыша (1): кровельный пирог с внешней битумной гидроизоляцией (максимально приближенный к проанализированному варианту при моделировании);
- Арочная крыша (2): изогнутые сэндвич-панели (наружная поверхность: листовый алюминий, толщина 0,7 мм, окрашенный в красный цвет; изоляционный слой: жесткий пенополиуретан, толщина 40 мм; внутренняя поверхность: оцинкованный гофрированный листовый металл, толщина 0,4 мм).

ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Для того, чтобы измерить температуру на внешней поверхности, а также на внутреннем слое (теплоизоляционный

материал), были установлены девять термопар (4 на плоской крыше и 5 на арочной). Значения температуры непрерывно регистрировались и собирались многоканальным устройством автоматической регистрации данных, непосредственно подключенным к термопарам. Параллельно с этим в непосредственной близости к термопарам была установлена метеорологическая станция для регистрации солнечной радиации, температуры и влажности воздуха, а также скорости и направления ветра. Все данные, поступавшие от метеорологической станции, также собирались непрерывно.

ПЕРИОД НАБЛЮДЕНИЙ

Замеры проводились в течение нескольких месяцев 2005 года и весь 2006 год.



ПОЛУЧЕННЫЕ ДАННЫЕ

На следующих графиках и в таблицах представлены средние показатели, зарегистрированные термопарами в течение июля 2006 г. Кроме того, чтобы подчеркнуть максимальную зарегистрированную температуру, приведены данные, полученные 21 июля.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

Плоская крыша:

- Термопара 1: температура поверхности (правая сторона);
- Термопара 2: внутренняя температура теплоизоляционного слоя (правая сторона, глубина 3 см);
- Термопара 3: температура поверхности (левая сторона)
- Термопара 4: внутренняя температура теплоизоляционного слоя (левая сторона, глубина 3 см).

Термопара				
Июль 2006 г.	3	1	2	4
Макс.	70.87	69.91	54.27	46.31
Мин.	12.86	12.64	20.07	24.88
Среднее	35.54	35.49	34.23	34.87
Δ	58.01	57.27	34.20	21.43

Таблица 2: Плоская крыша

Термопара				
21 июля 2006 г.	3	1	2	4
Макс.	70.87	69.91	54.27	45.78
Мин.	16.41	16.24	23.27	23.25
Среднее	54.46	53.67	30.91	16.41
Δ	39.17	38.74	36.92	36.76

Таблица 3: Плоская крыша 21-го июля

Июль 2006 г.	ТС 8	ТС 5	ТС 6	ТС 7	ТС 9
Макс.	67.93	65.53	57.82	55.55	52.90
Мин.	12.09	11.92	15.29	17.64	18.91
Среднее	33.58	33.94	33.16	33.21	33.22
Δ	55.84	53.61	42.54	37.90	33.99

Таблица 4: Арочная крыша

21 июля 2006 г.	ТС 8	ТС 5	ТС 6	ТС 7	ТС 9
Макс.	67.93	65.53	57.82	55.55	52.90
Мин.	12.09	11.92	15.29	17.64	18.91
Среднее	33.58	33.94	33.16	33.21	33.22
Δ	55.84	53.61	42.54	37.90	33.99

Таблица 5: Арочная крыша 21-го июля

Арочная крыша:

- Т5: температура поверхности (низ);
- Т6: внутренняя температура теплоизоляционного слоя, глубина 3 см (низ);
- Т7: внутренняя температура теплоизоляционного слоя, глубина 3 см (верх);
- Т8: температура поверхности (верх крыши);
- Т9: внутренняя температура теплоизоляционного слоя, глубина 3 см (низ, восточная сторона).

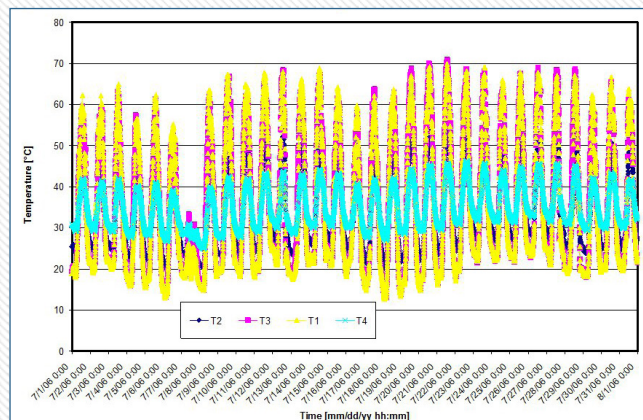


График 1: Плоская крыша

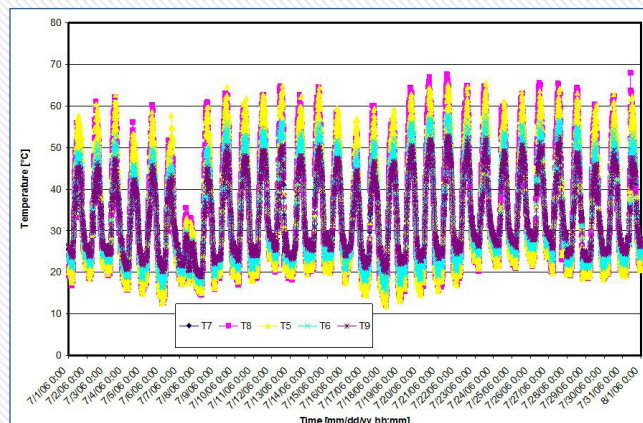
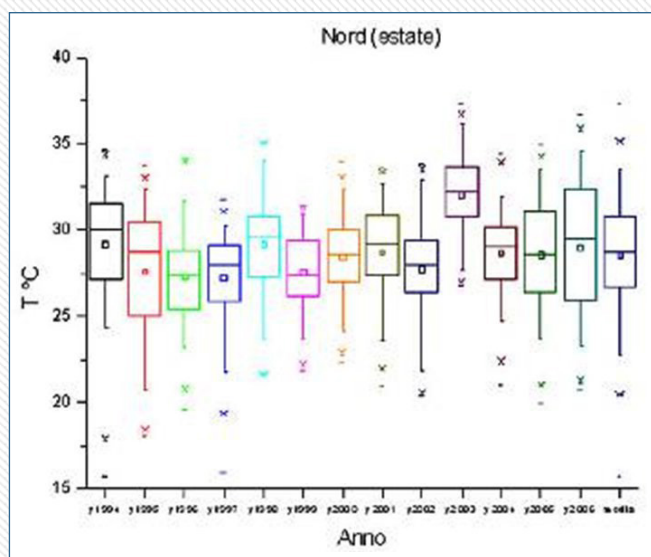


График 2: Арочная крыша

АНАЛИЗ ДАННЫХ

- Лето 2006 года характеризовалось относительно высокой изменчивостью погодных условий. Жаркие периоды были короче, чем летом 2003 года, даже если максимальное значение было близким к типичному среднему (см. ниже сравнение максимальных летних температур в Венеции, 45°26').

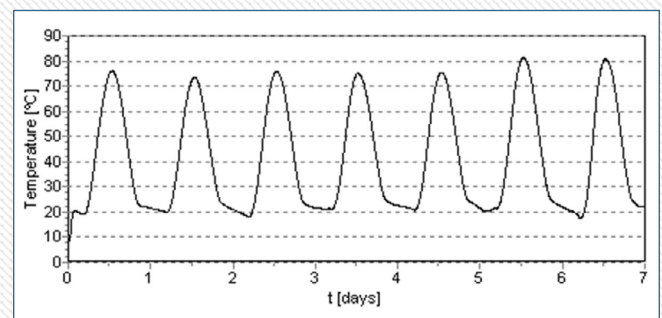


- Данные показывают сильные колебания температуры не только в течение летних месяцев, но и в течение всего периода измерений: внутри изоляционного материала был зарегистрирован диапазон температур, близких к 40°C, в то время как на поверхности температуры достигали 50°C.
- Максимальная температура плоских крыш достигала 70°C и оставалась неизменной в течение 3-х часов.
- Максимальная температура арочных крыш (для которых угол наклона солнечных лучей был разным) достигала 67°C и оставалась неизменной в течение 3-х часов.

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДАННЫХ С ПОЛУЧЕННЫМИ ДАННЫМИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ

Сравнение данных, полученных для двух различных конструкций крыши, и данных, рассчитанных для модели «HEAT 2», показало высокую степень сходимости. Главным образом, это объясняется точной настройкой показателей поглощения и излучения для обеих поверхностей крыш.

Используя данные, полученные косвенно в ходе исследования, было проведено повторное моделирование для города Трапани, как показано на следующем рисунке.



Согласно этому моделированию максимальные значения были примерно на 8-10°C ниже, чем при моделировании, проводимого с использованием предыдущих коэффициентов поглощения и излучения. Тем не менее, анализ температур поверхности крыши приводит к выводу, что в течение ограниченного промежутка времени достигаются значения температур, равные 80°C.

ВЫВОДЫ

Благодаря исследованию были выявлены несколько важных аспектов, которые следует учитывать проектировщикам при выборе теплоизоляционного материала для кровельных конструкций:

- В регионах, характеризующихся теплым климатом, температура крыши с внешней гидроизоляционной мембраной может превышать 80°C.

- Следует отметить, что коэффициент поглощения, используемый при моделировании (а также при испытании на реальной крыше), соответствует битумной мембране с шиферно-серой отделкой. Если использовать мембраны более темного цвета, то будут достигаться более высокие температуры.
- Это особенно подчеркивает важность выбора изоляционного материала, гарантирующего полную функциональность при температурах, значительно превышающих максимальные температуры, которые следует ожидать в условиях конечного применения такого материала.
- Для всех применений и в любых климатических условиях были зарегистрированы сильные изменения температуры за относительно короткий промежуток времени. Таким образом, при выборе наиболее подходящего теплоизоляционного материала необходимо рассчитывать размерную стабильность на основании диапазона температур, близких к конечным условиям применения изоляционного материала.
- Кроме того, очень важно оценить уровень стабильности и связности всего кровельного пирога, чтобы избежать деформации материала или появления небольших трещин, вызванных температурным напряжением, особенно в швах.
- Как показывают испытания, проведенные в соответствии с Европейским гармонизированным стандартом EN 13165, физические и механические характеристики жесткого пенополиуретана/пенополиизоцианурата гарантируют пригодность к эксплуатации даже в самых суровых климатических условиях.

Стандартный рабочий температурный диапазон полиуретана/полиизоцианурата:	100-140 °C
Температура при испытании на размерную стабильность согласно EN 13165:	48 часов - 20°C 8 часов + 70°C, отн. влажность 90%

Информация, содержащаяся в данной публикации, является, насколько нам известно, достоверной и точной, но мы не предоставляем каких-либо гарантий на рекомендации или предположения, которые могут возникнуть, так как условия использования и состав исходных материалов выходят за рамки нашего контроля. Более того, ничто из содержащегося в настоящем документе не должно толковаться как рекомендация к использованию какого-либо продукта, которое противоречит существующим патентам на какой-либо материал или его использование.