

Езерский В.А., член-корр. МИА, д.т.н. (г.Белосток, РП)

Монастырев П.В., к.т.н. (г.Тамбов, РФ)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ НАРУЖНОЙ СТЕНЫ В УЗЛАХ КРЕПЛЕНИЯ КАРКАСА ВЕНТИЛИРУЕМОГО ФАСАДА

Основу вентилируемых фасадов составляет крепежный каркас, который при помощи анкерных болтов закрепляется на несущей части стены здания. В большинстве случаев такие элементы крепежного каркаса, как анкеры, кронштейны и направляющие, выполняются из металла – материала обладающего большой теплопроводностью, а вся конструкция каркаса в целом проходит через теплоизолирующую часть стены. Это приводит к тому, что вентилируемый фасад вносит существенные элементы теплотехнической неоднородности в конструкцию стен. Наличие неоднородных участков изменяет температурное поле стены и вызывает понижение температуры внутренней ее поверхности. Неравномерное распределение температуры на внутренней поверхности стены может привести к образованию конденсата на некоторых ее участках, что ухудшает микроклимат помещений и снижает их санитарно-гигиенические условия. Кроме того, образование конденсата может быть причиной порчи отделки внутренней поверхности ограждения.

Изучение распределения температурных полей в зоне примыкания крепежного каркаса вентилируемого фасада к стене можно проводить двумя путями. Первый – основан на определении температурных полей экспериментально. Такой подход является не рациональным, потому что связан с большими затратами средств и времени.

Второй путь является наиболее рациональным, он заключается в исследовании температурных полей численными методами с помощью математического моделирования температурного поля на электронно-вычислительных машинах. В настоящее время существует множество

программ, позволяющих с высокой точностью строить температурные поля в неоднородных конструкциях различной сложности, но наш выбор остановился на программе моделирования двухмерных температурных полей ELCUT версии 4.2T [2] (со студенческой версией данной программы читатели могут ознакомиться на сайте www.tor.ru).

В исследованиях изучалось распределение температур по сечению стены, а так же на внутренней поверхности стены в точке находящейся на одной оси с анкером (τ_b^* , °C). Величина τ_b^* вычислялась для всех вариантов конструктивного решения крепежного узла и принята нами как основной параметр в исследовании, так как является наиболее характерным параметром, отражающим реальное снижение теплозащитных свойств стены в месте установки анкера.

В связи с тем, что существуют различные конструкции вентилируемых фасадов, перед началом исследования был произведен анализ решений, используемых в России. Результаты анализа показали, что наиболее широкое распространение получила конструкция вентилируемого фасада с вертикальным расположением направляющих. Это связано с тем, что:

- во-первых, нагрузка от облицовочных панелей передается вдоль направляющих, а не поперек, что позволяет снизить металлоемкость крепежного каркаса в целом за счет снижения числа кронштейнов или толщины направляющей по сравнению с горизонтальным расположением направляющих;
- во-вторых, вертикальная направляющая является общей для двух соседних панелей, что уменьшает число направляющих и делает закрытым вертикальный шов от проникновения атмосферных осадков;
- в-третьих, вертикальное расположение направляющих делает возможным организовать потоки воздуха в вертикальном направлении, что невозможно при горизонтальном расположении направляющих.

Данные достоинства вертикального расположения направляющих и послужили основой их выбора для дальнейших исследований.

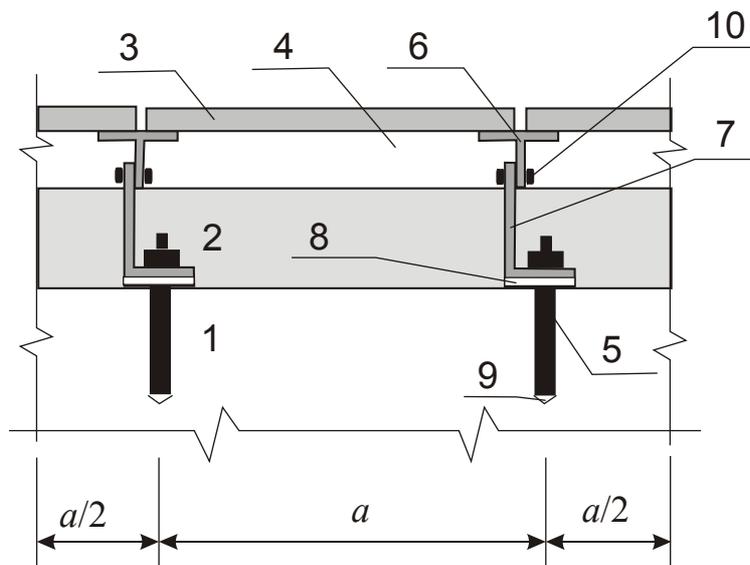


Рис.1. Исследуемая конструкция вентилируемого фасада с вертикальным расположением направляющих:

1 – несущая часть стены; 2 – теплоизоляционный материал; 3 – облицовочная панель; 4 – воздушная прослойка; 5 – анкерный болт распорного типа; 6 – направляющая крепежного каркаса; 7 – кронштейн крепежного каркаса; 8 – теплоизолирующая прокладка; 9 – воздушная полость; 10 – болт для крепления направляющей к кронштейну

Узел крепления каркаса представляет собой фрагмент вентилируемого фасада (рис.1), состоящий из двух кронштейнов (7), закрепленных на несущей части стены (1) через теплоизолирующие прокладки (8) с помощью стальных анкерных болтов (5).

Анкерные болты устанавливаются в стене в заранее просверленные отверстия, в нижней части которых имеется коническая воздушная полость (9), образованная заточенной частью сверла.

Перед установкой направляющих (6) к несущей части стены с помощью пластмассовых дюбелей крепятся минераловатные плиты (2), которые вплотную прижимаются к стене, друг к другу и кронштейну каркаса.

Направляющие крепежного каркаса имеют Т-образное сечение и крепятся к кронштейнам с помощью стальных болтов (10). Узел крепления

направляющих и кронштейнов находится в зоне вентилируемой воздушной прослойки (4).

Защитно-декоративные панели (3) устанавливаются на направляющие крепежного каркаса с зазором равным 8 мм.

Для наглядного сравнения температурных полей были выбраны два варианта значений параметров (табл.1), характеризующих конструктивное решение крепежного узла, для которых представлялось возможным получить наилучшие (I вариант) и наихудшие (II вариант) распределения температур.

Граничные условия для исследуемых узлов во всех расчетах принимались следующими:

- для наружной поверхности стены - температура наружного воздуха -28°C , коэффициент теплоотдачи наружной поверхности стены для зимних условий эксплуатации $\alpha_n = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$;
- для поверхности элементов узла находящихся в зоне воздушной прослойки - температура наружного воздуха -28°C , коэффициент теплоотдачи поверхности для зимних условий $\alpha_n = 12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$;
- для внутренней поверхности стены - температура внутреннего воздуха 18°C , коэффициент теплоотдачи $\alpha_v = 8.7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$;
- для торцевых частей узла (секущие плоскости узла) – тепловой поток $q = 0 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Таблица 1

Исходные данные для построения экстремальных температурных полей в узле крепления вентилируемого фасада

№ п/п	Наименование фактора	Значение	
		I вариант	II вариант
Защитно-декоративная облицовочная панель			
1	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	0,3	3,49
2	Толщина, м	0,008	0,030
Вентилируемая воздушная прослойка			
3	Размер, м	0,08	0,02
Теплоизоляционный материал			
4	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	0,035	0,09
5	Толщина, м	0,15	0,05
Несущая конструкция стены			
6	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	0,33	0,81
7	Толщина, м	0,51	0,25
Крепежный каркас			
8	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	58	221
9	Толщина, м	0,0015	0,004
10	Размет основания кронштейна, м	0,04x0,04	0,10x0,10
Теплоизолирующая прокладка			
11	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	0,05	-
12	Толщина, м	0,009	0,0
Анкерный болт крепежного каркаса (коэффициент теплопроводности 58 Вт/(м·°С))			
13	Диаметр, м	0,008	0,024
14	Глубина заложения, м	0,05	0,15
15	Расстояние между анкерами, м	0,80	0,80

Результаты расчета температурного поля выполнены для варианта I и II (рис.2) показали, что температуры в сечении и на внутренней поверхности наружной стены в местах крепления вентилируемого фасада изменяются в значительных пределах.

В слое утеплителя вблизи кронштейна находится зона отрицательной температуры с отклонением изолиний температур к наружной и внутренней поверхности теплоизоляционной плиты, что связано с большой разницей теплопроводности утеплителя и кронштейна.

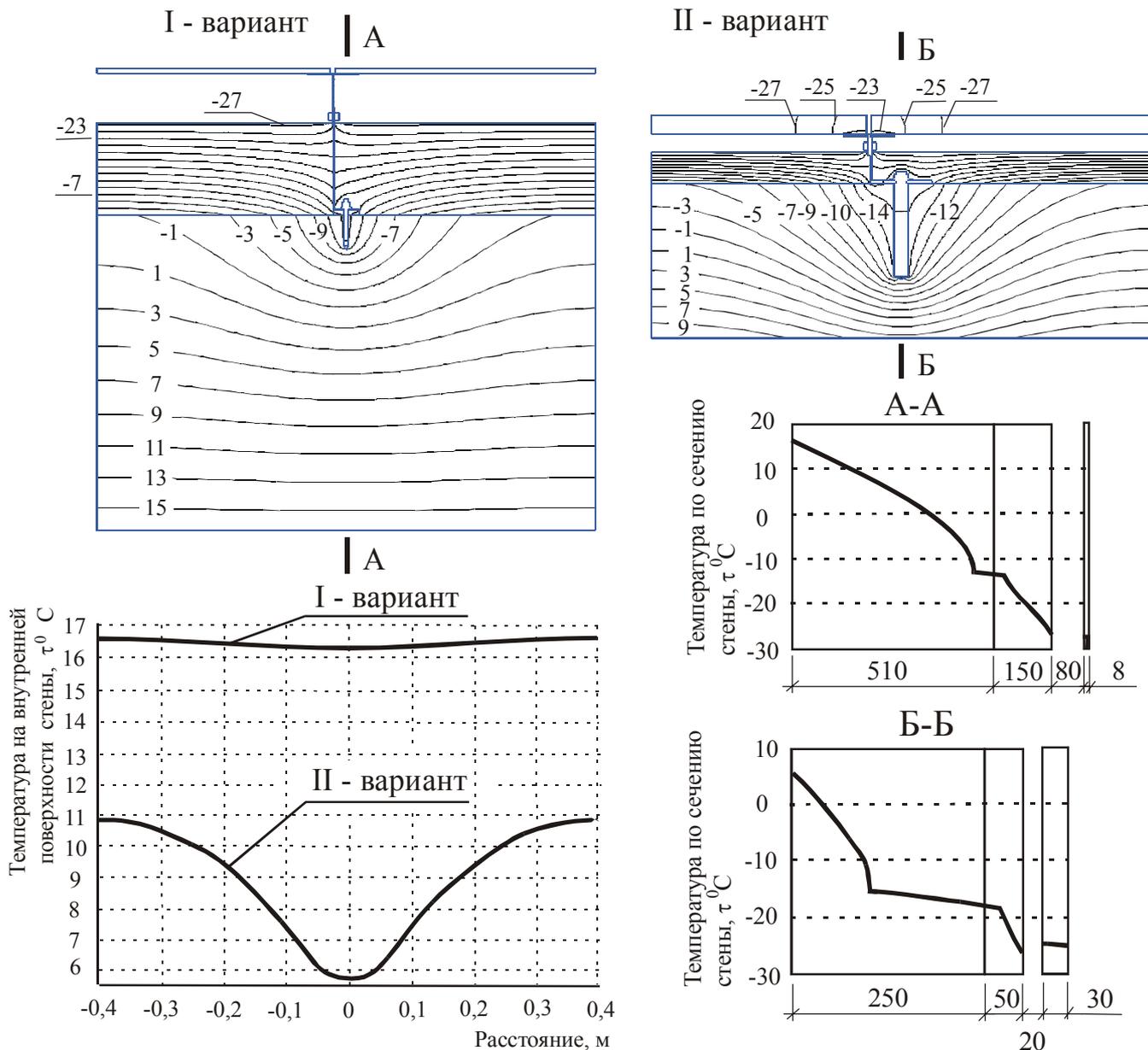


Рис.2. Распределение температур в сечении наружной стены с вентилируемым утеплителем при наилучшем (I вариант) и наихудшем (II вариант) сочетании параметров крепежного узла характеризующих элементы

Вокруг анкерного болта образуется симметричное температурное поле с отрицательной температурой, расходящиеся концентрическими линиями по сечению стены. Под нижней частью анкера изолинии приобретают воронкообразный характер, что связано с технологической воздушной полостью.

Сравнивая температурные поля двух вариантов можно заметить, что в первом случае температура на поверхности облицовочных панелей и на внутренней поверхности стены близка к постоянной и равна, соответственно, -28 и 16,4 °С. Во втором случае наблюдается, наоборот, значительное колебание температур, которое для панели составляет -28...-23 °С, а для внутренней поверхности стены 5,7...10,9 °С. Такая разница температур говорит о том, что во втором варианте влияние узла на температурное поле стены значительно больше, чем в первом.

В слое теплоизоляционного материала в обоих случаях температурные поля имеют подобный характер. Однако в слое несущей стены в варианте II наблюдается большая зависимость температурного поля от геометрических и теплофизических параметров стены и анкера.

Установлено, что теплопроводное включение в виде анкера, кронштейна и направляющей способствуют интенсификации теплового потока через теплоизоляционный слой, в результате чего в месте примыкания облицовочных панелей к направляющим наблюдается повышение температуры на 0,5 ...5 °С, а на внутренней поверхности снижение на 1...10 °С.

Сложный вид изолиний температурных полей и многоэлементность крепежных узлов предопределили выбор всех факторов, характеризующих, как геометрический так и теплофизические параметры входящих в узел элементов, для проведения дальнейших исследований их влияния на температурное поле.

В связи с тем, что результаты намеченного исследования находятся в прямой зависимости от предельных значений каждого фактора, очень важным является выбор уровней варьирования. Поэтому ниже остановимся на обосновании минимальных и максимальных значений каждого фактора в отдельности.

В соответствие с этим принципом толщина несущей части стены изменялась от 0,25 до 0,51 м в предположении, что она могла быть выполнена из материалов с коэффициентом теплопроводности λ от 0,33 (легкий бетон) до

0,81 Вт/(м·°С) (кладка из сплошного глиняного кирпича на цементном растворе).

Толщина утепляющей части стены принималась от 0,05 до 0,15 м. Предполагалось, что она может быть выполнена из минераловатных плит, коэффициент теплопроводности λ которых колеблется в зависимости от плотности материала в пределах от 0,035 до 0,090 Вт/(м·°С).

Крепежный каркас для вентилируемых фасадов изготавливается из стали ($\lambda=58$ Вт/(м·°С)) или алюминия ($\lambda=221$ Вт/(м·°С)), что и принято равным минимальному и максимальному значению коэффициента теплопроводности элементов крепежного узла. Толщины элементов каркаса варьировались в допустимых с точки зрения конструирования пределах: от 0,0015 до 0,0040 м.

Облицовочные панели вентилируемых фасадов могут изготавливаться из материалов, обладающих различными теплофизическими свойствами (бетона, полимербетона, натурального камня, керамики, стекла, металла, композитных материалов и т.д.). Поэтому коэффициент теплопроводности материала панелей в эксперименте изменялся в значительных пределах от 0,3 до 3,49 Вт/(м·°С). В этот предел варьирования попадали почти все используемые материалы. Толщина защитно-декоративных панелей зависит в первую очередь от ее прочностных характеристик при условии минимальной массы облицовочной панели. В большинстве случаев она колеблется в пределах от 0,008 до 0,030 м, что и принято в качестве уровней данного фактора.

Размер вентилируемой воздушной прослойки принимался исходя из минимально рекомендуемой (0,02 м) и максимально целесообразной (0,08 м) ее величины из условия работы воздушной прослойки.

Кронштейны крепежного каркаса в вентилируемых фасадах чаще всего имеют размеры от минимального 0,04 x 0,04 м до максимального 0,10 x 0,10 м.

В работе [3] рекомендуется устраивать теплоизолирующие прокладки между стеной и кронштейном с коэффициентом теплопроводности от 0,05 до 0,20 Вт/(м·°С). В связи с тем, что под кронштейн крепежного каркаса может

устанавливаться, а может и не устанавливаться теплоизолирующая прокладка, нижний уровень варьирования толщины прокладки принимался равным 0,0 м, а верхний - 0,009 м.

Диаметр и глубина заложения анкерных болтов, а также расстояние между ними, принимались исходя из возможных пределов их варьирования. Приняты: диаметр - от 0,008 до 0,024 м; глубина заложения - от 0,05 до 0,15 м; расстояние - от 0,40 до 1,20 м. Постоянным оставался только коэффициент теплопроводности анкерного болта ($\lambda=58 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$), так как он изготавливается только из стали.

Перечисленные факторы и уровни их варьирования приведены в табл.2.

При проведении численных эксперимента значения всех факторов принимались на среднем уровне, а один из них варьировался от нижнего до верхнего. Постоянным оставался только коэффициент теплопроводности анкерного болта ($58 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$), так как он изготавливается для вентилируемых фасадов только из стали.

Необходимо отметить, что граничные условия для расчетов были одинаковы для обоих вариантов.

Таблица 2

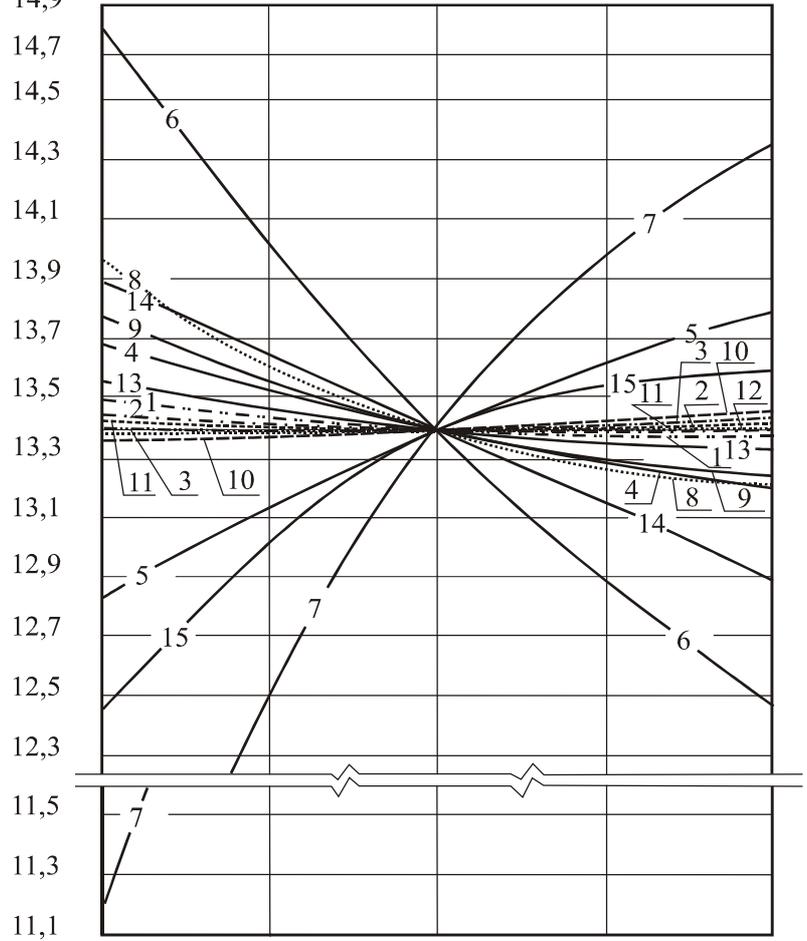
Исследуемые факторы и границы их варьирования

№ п/п	Наименование фактора	Уровни варьирования		
		мин.	сред.	макс.
Защитно-декоративная облицовочная панель				
1	Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$	0,3	1,895	3,49
2	Толщина, м	0,008	0,019	0,030
Вентилируемая воздушная прослойка				
3	Размер, м	0,02	0,05	0,08
Теплоизоляционный материал				
4	Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$	0,035	0,0625	0,09
5	Толщина, м	0,05	0,10	0,15
Несущая конструкция стены				
6	Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$	0,33	0,57	0,81
7	Толщина, м	0,25	0,38	0,51

Крепежный каркас				
8	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	58	139,5	221
9	Толщина, м	0,0015	0,00275	0,004
10	Размет основания кронштейна, м	0,04х	0,07х	0,10х
		0,04	0,07	0,10
Теплоизолирующая прокладка				
11	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	0,05	0,125	0,2
12	Толщина, м	0,0	0,0045	0,009
Анкерный болт крепежного каркаса				
13	Диаметр, м	0,008	0,016	0,024
14	Глубина заложения, м	0,05	0,10	0,15
15	Расстояние между анкерами, м	0,40	0,80	1,20

Анализ температуры на внутренней поверхности стены в зоне крепежного узла (рис.3) показал, что практически все факторы проявили влияние на величину температуры внутренней поверхности наружной стены в месте крепежного узла $\tau_{в}^*$, °С. Характер этого влияния оказался разным. Так факторы 3, 5, 7, 10, 12 и 15 проявили положительный квадратичный (часто близкий к линейному) эффект, то есть с их возрастанием величина $\tau_{в}^*$ возрастала. Факторы 1, 2, 4, 6, 8, 9, 11, 13 и 14 выявили отрицательные квадратичные или линейные эффекты, то есть с их возрастанием величина $\tau_{в}^*$ уменьшалась.

Температура (τ_B^* , °C) 14,9



1 - Коэф. теплопроводности облицовочной панели, Вт/(м ⁰ С)	0,300	1,098	1,895	2,693	3,490
2 - Толщина облицовочной панели, м	0,008	0,0135	0,019	0,0245	0,030
3 - Размер вентилируемой воздушной прослойки, м	0,020	0,035	0,050	0,065	0,080
4 - Коэф. теплопроводности теплоизоляционного материала, Вт/(м ⁰ С)	0,035	0,0488	0,0625	0,0763	0,090
5 - Толщина теплоизоляционного материала, м	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150
6 - Коэф. теплопроводности несущей конструкции стены, Вт/(м ⁰ С)	0,330	0,450	0,570	0,690	0,810
7 - Толщина несущей конструкции стены, м	0,250	0,315	0,380	0,445	0,510
8 - Коэф. теплопроводности крепежного каркаса, Вт/(м ⁰ С)	58	98,75	139,5	180,25	221
9 - Толщина крепежного каркаса, м	0,0015	0,00213	0,00275	0,00338	0,0040
10 - Размер основания кронштейна, м	0,04 x 0,04	0,055 x 0,055	0,07 x 0,07	0,085 x 0,085	0,10 x 0,10
11 - Коэф. теплопроводности теплоизолирующей прокладки, Вт/(м ⁰ С)	0,05	0,0875	0,125	0,1625	0,200
12 - Толщина теплоизолирующей прокладки, м	0,000	0,00225	0,0045	0,00675	0,009
13 - Диаметр анкера, м	0,008	0,012	0,016	0,020	0,024
14 - Глубина заложения анкера, м	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150
15 - Расстояние между анкерами, м	0,400	0,600	0,800	1,000	1,200

Рис.3. Зависимость температуры внутренней поверхности наружных стен в местах устройства крепежного узла τ_B^* , °C от исследуемых факторов (1...15)

Степень влияния исследованных факторов на τ_v^* также существенно различалась. Наибольшее влияние оказывают факторы 6, 14, 8, 5, 15 и 7 изменение их значений от нижнего до верхнего уровня дает изменение τ_v^* на, соответственно, - 15,4; - 7,2; - 5,3; + 7,5; + 9,1 и + 28,2 %.

Меньшее влияние из исследованных факторов оказали 9, 4 и 13. Изменение их значений от нижнего до верхнего уровня дает изменение τ_v^* на, соответственно, - 3,9; - 3,5; и - 1,6 %.

Совсем слабое влияние, не превышающее 1%, оказали влияние факторы 1, 2, 3, 10, 11 и 12.

Выявленные характер и степень влияния факторов неоднозначны и в некоторых случаях не согласуются с классическими теплотехническими принципами. Из этих соображений они не могут использоваться для формулировки практических рекомендаций по проектированию крепежных узлов и каркасов вентилируемых фасадов. Поэтому было признано, что для подготовки таких рекомендаций требуется выбрать значимые из числа рассматриваемых факторов на основе строгой математической процедуры.

Одним из методов, на наш взгляд наиболее подходящим для данной задачи, является планирование эксперимента с использованием плана Плакетта-Бермана [1], использование которого в данных исследованиях позволило выявить существенное влияние на τ_v^* следующих факторов: толщины теплоизоляции; коэффициента теплопроводности материала наружной стены; толщины наружной стены; коэффициента теплопроводности материала крепежного каркаса; толщины крепежного каркаса; глубины заложения анкерного болта крепежного каркаса; расстояния между анкерами.

Проведенные исследования позволили разработать следующие практические рекомендации по устройству крепежного узла вентилируемого фасада с позиции улучшения теплотехнических качеств наружной стены:

- толщина и коэффициент теплопроводности материала облицовочной панели не оказывают существенного влияния на температуру внутренней

поверхности стены, что согласуется с общеизвестным теплотехническим принципом о недопустимости учета в теплотехнических расчетах слоев, находящихся за вентилируемой воздушной прослойкой. Следовательно, при проектировании облицовочных панелей их толщину необходимо принимать из конструктивно-технологических соображений, а выбор материала осуществлять на основе сравнения показателей их атмосферо- и морозостойкости;

- толщина воздушной прослойки также не оказывает существенного влияния на температуру внутренней поверхности стены. В связи с этим можно рекомендовать принимать минимально допустимую толщину воздушной прослойки из условия влагонепроницаемости открытых межпанельных стыков;

- коэффициент теплопроводности материала дополнительной теплоизоляции в рассмотренном интервале значений (0,0035...0,09 Вт/(м⁰С) также не выявил существенного влияния. Из этого следует, что по теплотехническим соображениям для дополнительного утепления могут использоваться все виды минераловатных плит. Выбор конкретных марок плит должен осуществляться исключительно на основе данных о их долговечности, прочности и усадке;

- сопротивление теплопередаче наружных стен с дополнительной теплоизоляцией, которое должно подбираться и сравниваться с требуемыми величинами по условиям санитарно-гигиеническим, комфортным и энергосбережения, зависит, прежде всего, от толщины дополнительной теплоизоляции и толщины несущей части стены, а также коэффициента теплопроводности материала последней;

- при проектировании и устройстве крепежного каркаса его кронштейны наиболее целесообразно устраивать из оцинкованной или нержавеющей стали с минимально допустимой по условию прочности толщиной. Выбор размера основания кронштейна осуществляется исходя из конструктивных соображений;

- установка теплоизолирующих прокладок под кронштейн не обязательна, так как их влияние на температурное поле практически отсутствует;

- при подборе анкерных болтов для крепежного каркаса необходимо стремиться к сокращению их глубины заложения. Условия прочности заделки анкера необходимо обеспечивать изменением его диаметра. Необходимо стремиться к увеличению расстояния между анкерами.

Работа выполнена в рамках Договора о творческом сотрудничестве между Тамбовским государственным техническим университетом и Белостокским политехническим институтом.

Литература:

1. Планирование эксперимента в исследованиях технологических процессов / Хартман Л., Лецкий Э., Шефер В. и др./Под ред. Лецкого Э.К. – М.:Мир, 1987. – 522с.
2. Программа моделирования двумерных полей ELCUT. - <http://www.tor.ru/elcut>
3. Батинич Радивое. Вентилируемые фасады зданий. - <http://www.know-house.ru/avtor/batinich.html>