

Теплоизоляционные фасады с тонким штукатурным слоем

Температурно-влажностные воздействия и долговечность систем теплоизоляционных фасадов с тонким штукатурным слоем

Настоящая статья подготовлена доктором техн. наук, В. Г. Гагариным, на основе материалов статьи сотрудников Института строительной физики общества им. Фраунхофера «Hygrothermische Beanspruchung und Lebensdauer von Wärmedämm-Verbundsystemen», авторы Hartwig M. Künzel, H. Künzel, K. Sedlbauer, опубликованной в журнале «Bauphysik», 2006, 28, Н.3.

Температурно-влажностные воздействия существенно влияют на процессы старения и долговечность систем теплоизоляционных фасадов. Наряду с погодными условиями, температурой, солнечным излучением и влажностью воздуха на наружные стены часто воздействуют внешние или внутренние источники влаги, например, косые дожди, строительная влажность, образование конденсированной влаги. Отчасти из-за своей небольшой массы системы теплоизоляционных фасадов с тонким штукатурным слоем (далее – теплоизоляционные фасады) особенно подвержены этим воздействиям. Тем не менее, длительное исследование объектов с теплоизоляционными фасадами показывает, что применение этих фасадов не увеличивает подверженность повреждениям. Если не считать некоторых проблем эстетического характера, связанных с внешним видом, то эксплуатационные характеристики теплоизоляционных фасадов при их длительной эксплуатации следует оценивать как весьма положительные. При регулярном техническом уходе долговечность теплоизоляционных фасадов соответствует долговечности наружных стен, оштукатуренных обычным образом.

1. Введение

На протяжении примерно 40 лет системы теплоизоляционных фасадов с тонким штукатурным слоем используются в качестве наружной фасадной изоляции. Благодаря новизне этих изоляционных систем, которые поначалу выполнялись только с использованием пенопластовых плит и штукатурки на синтетических смолах, их распространение уже с начала 1970-х годов сопровождалось научными исследованиями. Из-за растущего значения этих систем внешней изоляции и их проникновения на рынок на протяжении следующих десятилетий возникали все новые вопросы, относящиеся к области строительной теплофизики, например: в 1980-е годы – влияние трещин в штукатурке; в 1990-е годы – перекрытие деформационных швов при санировании зданий с фахверковыми или бетонными конструкциями; в последнее время – проблема образования водорослей и применение теплоизоляционных фасадов в других климатических зонах.

Между тем в Германии более 700 млн. м² фасадов были теплоизолированы с применением теплоизоляционных фасадов с тонким штукатурным слоем. Говоря о таком количестве, нельзя, конечно, не отметить, что в отдельных случаях были отмечены повреждения, вызываемые некачественным монтажом, применением непригодных материалов, а также слишком интенсивными температурно-влажностными воздействиями. Применение теплоизоляционных фасадов с самого начала сопровождалось сомнениями в их работоспособности и долговечности. И сегодня по каждой системе теплоизоляционных фасадов должно предъявляться разрешение Немецкого института строительной техники, т. е. даже через 40 лет после начала их применения, не существует никакого стандарта для этих систем.

Цель данной работы заключается в реалистичной оценке срока службы теплоизоляционных фасадов с учетом климатических условий их эксплуатации. Для этого на ряде примеров анализируются температурно-влажностные воздействия и изменения во времени характеристик теплоизоляционных фасадов, на основании чего делаются практические выводы.

2. Температурно-влажностные воздействия

2.1. Климатические условия

Температурно-влажностные воздействия на теплоизоляционные фасады определяются климатическими условиями. В настоящей статье рассматриваются климатические условия поселка Хольцкирхен не далеко от Мюнхена (Германия) (680 м над уровнем моря), которые являются до известной степени репрезентативными для Центральной Европы.

На рис. 1 слева можно увидеть изменение среднемесячных значений температуры наружного воздуха, влажности наружного воздуха и атмосферных осадков (средние величины, полученные обработкой данных более чем за десятилетний период) в течение года. Справа на этом рисунке представлены изменения этих величин в течение суток, осредненные для летних (июнь, июль, август) и зимних (декабрь, январь, февраль) месяцев. Таким образом, средние зимние сутки характеризуется температурами около 0 °С (по ночам несколько ниже, а днем несколько выше этого значения). Отсюда вытекает очень частое переменное замораживание и оттаивание, которое может оказать соответствующее воздействие на отделку фасада или окраску.

Для образования конденсата на наружной поверхности конструкции имеет значение еще один параметр – абсолютная влажность воздуха. Вскоре после восхода солнца абсолютная влажность, а с ней и точка росы наружного воздуха, ощутимо возрастают, в то время как относительная влажность воздуха из-за нагревания солнцем резко падает. Этот эффект известен благодаря испарению капель тумана или росы на лугах и полях. В ноябре наблюдается самая высокая относительная влажность воздуха, тогда как максимум абсолютной влажности воздуха совпадает с максимумом температуры воздуха в июле.

В условиях континентального климата, как, например, в Хольцкирхене, наибольшее количество атмосферных осадков выпадает в летние месяцы, причем во второй половине суток идет явно больше дождей, чем в первой. Это связано с более сильной грозовой активностью во второй половине суток. Зимой не приходится наблюдать учащения атмосферных осадков в какое-либо время суток.

Наряду с параметрами климата, показанными на рис. 1, важную роль для температурного и влажностного режима конструкций фасадов играет солнечная радиация. Однако, так как действие солнечной радиации существенно определяется ориентацией фасада, то и данные о годовом изменении солнечной радиации менее информативны. Например, измеряемая суммарная солнечная радиация в летний период, естественно, наибольшая, в то время как прямое облучение южной стены достигает максимума зимой. Кроме того, отражение от снежного покрова соответствующим образом усиливает облучение.

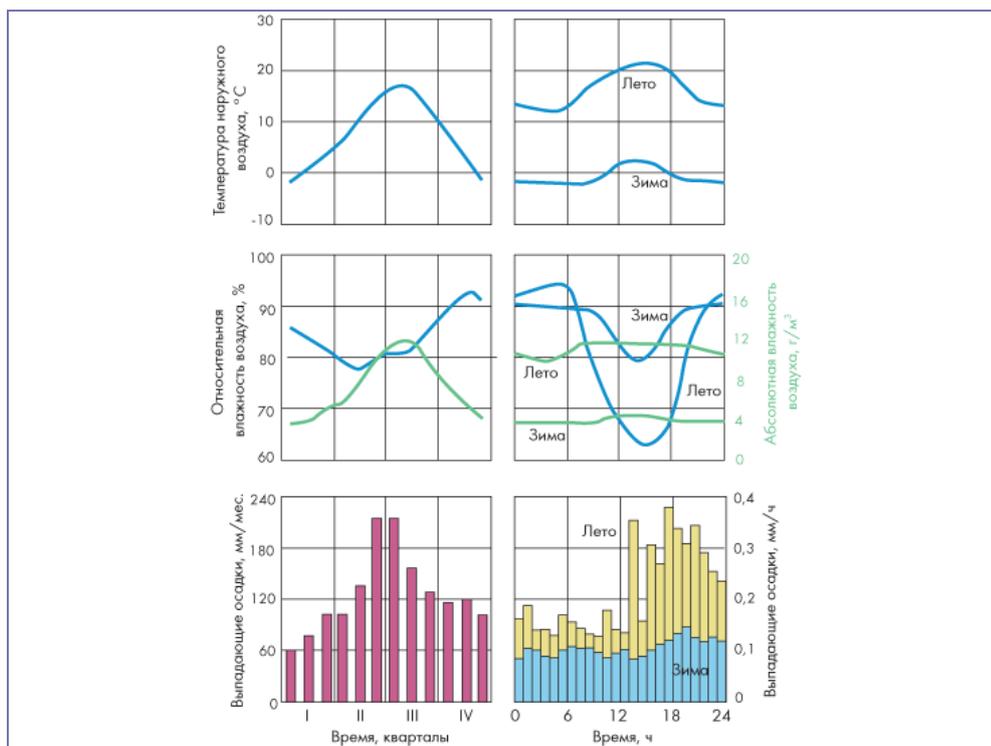


Рисунок 1.
 Годовое изменение среднемесячных значений (графики слева) и осредненные изменения в течение летних и зимних суток (графики справа) температуры, влажности наружного воздуха и атмосферных осадков в Хольцкирхене

2.2. Воздействие климатических факторов в суточном цикле (день/ночь)

Воздействие описанных климатических факторов на наружную стену с теплоизоляционными фасадами применительно к типичному суточному циклу схематически изображено на рис. 2.

В солнечный день штукатурка и теплоизоляция, а также находящаяся за ними конструкция стены нагреваются солнечной радиацией. Связанное с этим увеличение парциального давления пара ведет к высыханию поверхности штукатурки из-за влагоотдачи в наружный воздух, а также из-за диффузии пара в теплоизоляции к поверхности несущей стены. Последнее обстоятельство имеет силу почти исключительно для теплоизоляционных фасадов с минераловатной теплоизоляцией. При использовании в качестве теплоизоляции плитного пенополистирола диффузия пара внутрь конструкции пренебрежимо мала.

Скорость высыхания слоя штукатурки зависит от температуры поверхности. Эта температура получается из баланса теплопоступлений и теплоотдачи:

- коротковолнового облучения солнечной радиацией;
- длинноволнового излучения конструкции;
- теплоотдачи на границе с наружным воздухом в результате конвекции и испарения пара;
- теплопереноса посредством теплопроводности внутрь конструкции.

Ночью, когда солнечное облучение отсутствует, доминирует длинноволновое излучение конструкции. Обусловленное этим обстоятельством охлаждение

поверхности конструкции может привести к охлаждению штукатурки до температуры, которая даже ниже точки росы наружного воздуха. В этом случае конденсированная вода (роса) осадается на штукатурку или краску, где, в зависимости от поверхностных свойств, она всасывается или остается в форме капель.

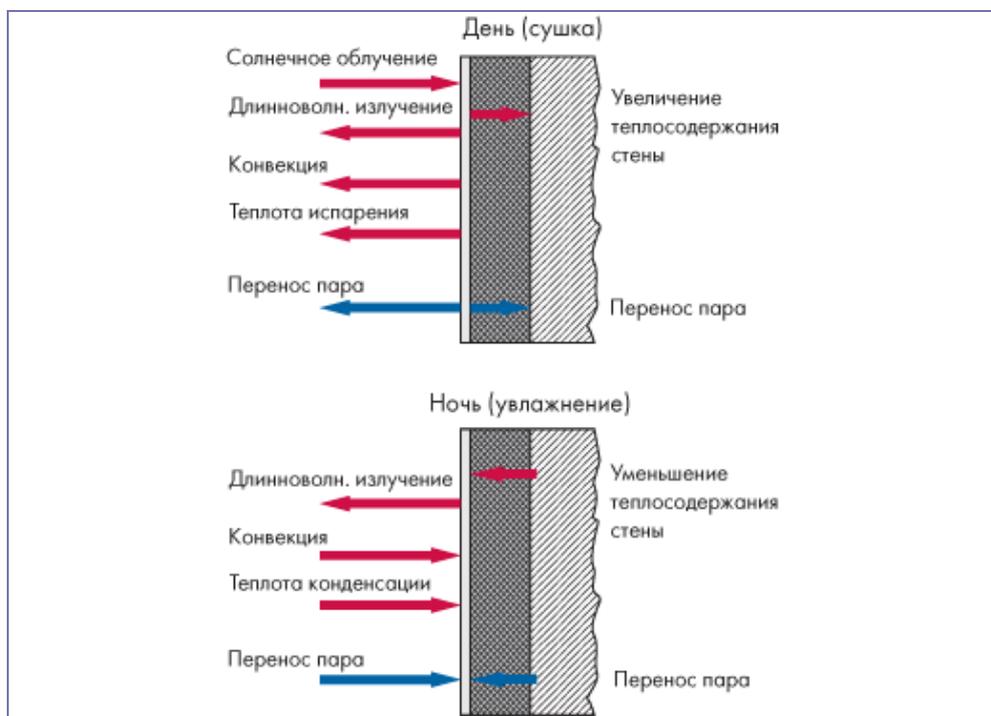


Рисунок 2.
Схематическое изображение температурных (красный) и влажностных (синий) воздействий на наружную штукатурку в дневное и ночное время

В случае использования в качестве теплоизоляции минеральной ваты внутренняя сторона штукатурного слоя может дополнительно увлажняться вследствие диффузионного переноса водяного пара из более теплой толщи конструкции к наружному слою.

Знакопеременные климатические воздействия на нестационарный температурно-влажностный режим теплоизоляционных фасадов могут быть показаны точнее на основе данных непрерывных измерений температуры поверхности фрагментов конструкции на полигоне для натуральных испытаний.

На рис. 3 (вверху) представлены для летних и зимних месяцев осредненные кривые изменения в течение суток температуры поверхности штукатурки теплоизоляционного фасада, ориентированного на запад и покрашенного белой и черной краской, а также кривые изменения температуры наружного воздуха. На этом же рисунке внизу представлены кривые изменения в течение суток влажности поверхности штукатурки, рассчитанные на основании изменения температуры поверхности и условий окружающей среды. При этих расчетах пренебрегалось влагоемкостью поверхностного слоя штукатурки, что представляется оправданным, если речь идет о системах с тонким штукатурным слоем.

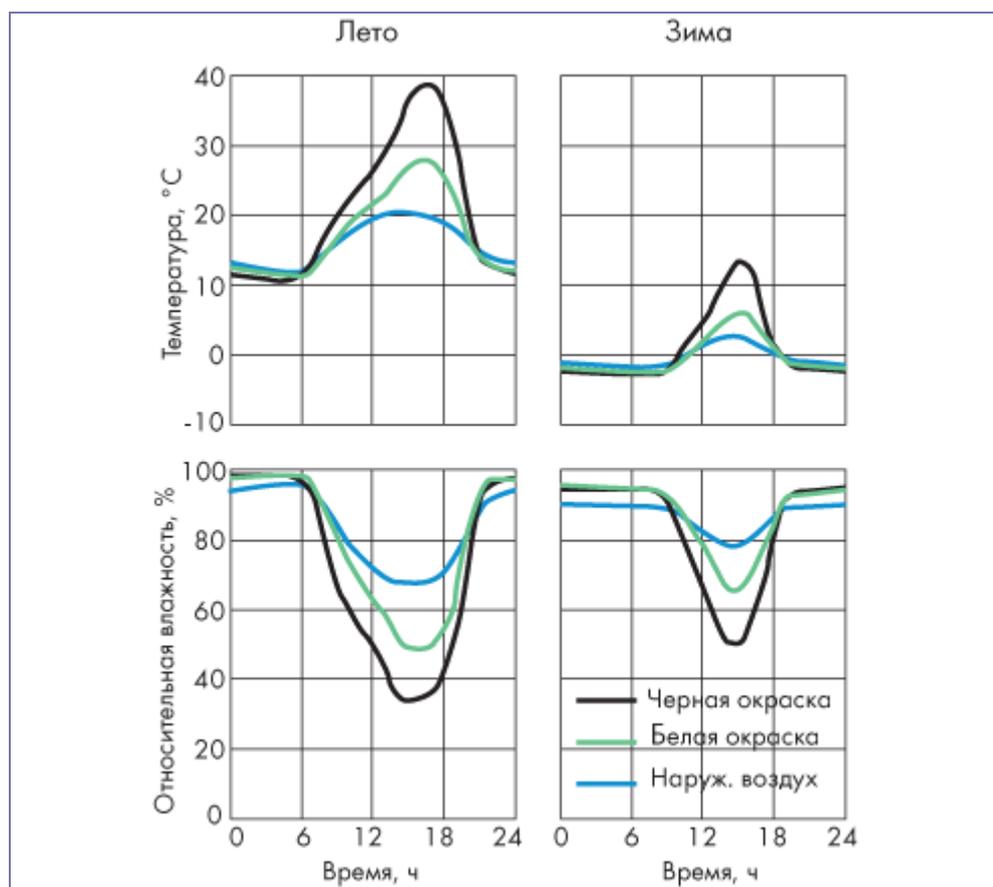


Рисунок 3.

Кривые изменения в течение суток осредненных температур поверхностей штукатурки фрагментов конструкций с теплоизоляционным фасадом, измеренных в летние и зимние месяцы, а также кривые изменения в течение суток влажности поверхности штукатурки, рассчитанные на основании изменения температуры, для стены с теплоизоляционным фасадом, ориентированной на запад и покрытой белой и черной краской, в сравнении с температурой наружного воздуха (голубой цвет линии)

Независимо от окрашивания средняя температура поверхности экспериментального фрагмента конструкции в ночное время ниже температуры наружного воздуха. Соответственно, высока и средняя влажность на поверхности фасада. В дневное время черная поверхность нагревается, естественно, сильнее, чем белая. Средний подъем температуры за день составляет зимой до 9–17 °С (в зависимости от окраски поверхности), а летом до 18–28 °С. В то же время изменение значений относительной влажности при осредненном суточном ходе составляет от 30 до 45 % зимой и от 50 до 65 % летом. С этими суточными колебаниями температуры и влажности связаны температурные и влажностные деформации и соответствующие внутренние напряжения, если основание противодействует перемещению поверхностного слоя.

В ходе лабораторных измерений 24 видов штукатурки для теплоизоляционных фасадов, изготовленных различными производителями, при сохранении свободной подвижности исследованных образцов штукатурки, получены значения коэффициента температурного расширения, которые находятся в диапазоне от 0,007 до 0,013 мм/(м • °С). Измеренные величины усадки при высыхании образцов штукатурки – от полного насыщения водой до их равновесной влажности при 65 % относительной влажности воздуха – показывают существенно более широкий диапазон от 0,1 до 1,1 мм/м.

На рис. 4 представлены обусловленные климатом температурно-влажностные деформации для всех исследуемых видов штукатурки.

Отсюда можно сделать вывод о том, что ежедневно повторяющееся повышение температуры на 28 °С, которое было измерено, например, летом на черной поверхности экспериментального фрагмента конструкции с теплоизоляционными фасадами, имеет следствием расширение слоя штукатурки почти на 0,3 мм/м и соответствующие внутренние напряжения.

В результате наступающего одновременно изменения влажности поверхности штукатурки от соответствующей 98 % до соответствующей 33 % относительной влажности воздуха потенциальное влажностное изменение размеров составляет ровно двойную величину от температурного изменения, достигая 0,6 мм/м. Так как изменение температуры происходит быстрее, чем изменение влажности из-за высыхания поверхностного слоя, то и соответствующие напряжения, как правило, возникают с временным смещением. Трещины возникают в тех случаях, если результирующие температурно-влажностные внутренние напряжения превосходят прочность армированной штукатурной системы.

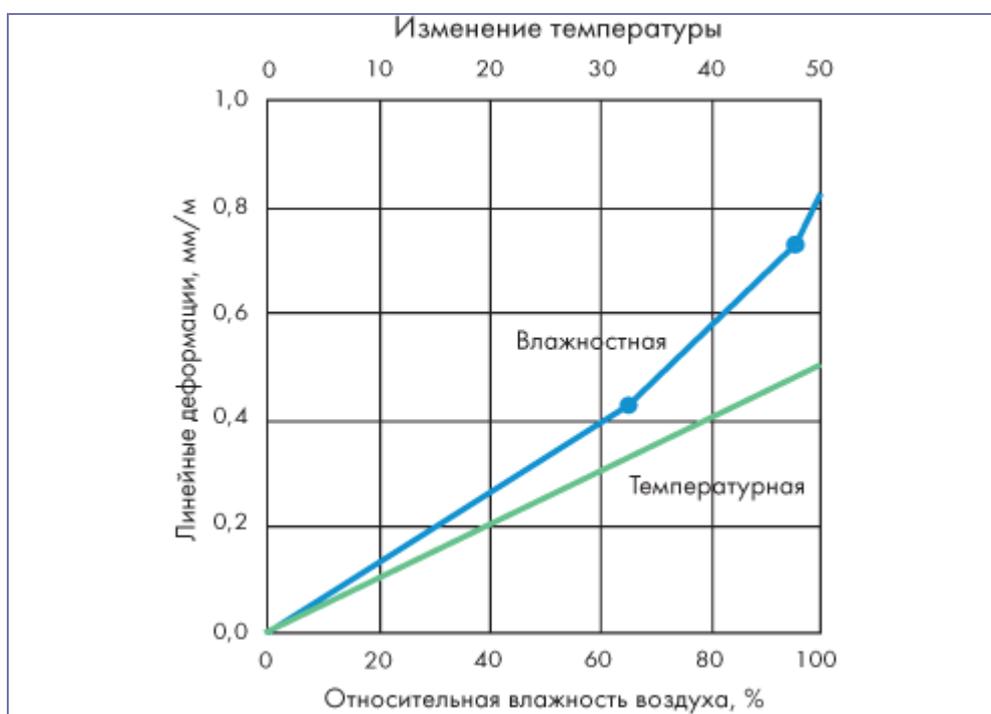


Рисунок 4.

Средние влажностные и температурные деформации штукатурки для теплоизоляционных фасадов, рассчитанные исходя из измерений 24 различных штукатурных систем, изготовленных разными производителями. Образцы штукатурки размерами 5 x 20 см отбирались из фрагментов конструкций при натуральных испытаниях теплоизоляционных фасадов, которые перед этим в течение шести месяцев подвергались воздействию погодных условий на испытательном полигоне в Хольцкирхене. Температурное расширение измерялось в области изменения температуры от 20 до 80 °С при постоянной относительной влажности воздуха в 35 %. Влажностные растяжения определялись при температуре 20 °С, исходя из сухого состояния штукатурки и последующего увлажнения до влажности, соответствующей относительной влажности воздуха 65 или 95 %, а также влажности при свободном насыщении материала водой

2.3. Источники влаги

Наряду с циклической нагрузкой на конструкции с теплоизоляционными фасадами под действием изменения температуры воздуха и влажности в суточном цикле, дополнительную нагрузку представляют собой спорадически возникающие источники влаги. Такие источники влаги могут воздействовать на фасад как извне, так и изнутри.

В качестве внутренних источников влаги здесь имеются в виду те источники, которые подводят влагу к теплоизоляционным фасадам изнутри. К ним относятся

диффузия пара из воздуха в помещении в наружный воздух, однако воздействие этого явления часто переоценивается, как правило, оно не составляет проблемы¹. Совершенно по-другому обстоят дела со строительной влажностью².

Влага из возведенной несущей стены перемещается по направлению температурного градиента через теплоизоляционный фасад к наружной штукатурке. В случае когда фасад смонтирован с теплоизоляцией из минеральной ваты, водяной пар перемещается из кирпичной кладки через слой теплоизоляции с малым сопротивлением паропрооницанию и конденсируется на границе с наружным отделочным слоем, так что зимой существует опасность морозного повреждения штукатурки. Строительная влажность может и без мороза вызвать неприятные побочные последствия, что доказывается появлением грибковой плесени черного цвета на теплоизоляционных фасадах вновь построенных жилых зданий. С помощью более точного исследования показано, что микробное поражение объяснялось увлажненностью теплоизоляционных фасадов из-за строительной влажности конструкции.

Косые дожди, потоки воды или брызги, а в ясные ночи и роса – это примеры внешних источников влажности. Количество дождевой воды, попадающей на поверхность конструкции, зависит от ориентации и наклона поверхности, а также от окружающей застройки. Это относится и к росе, которая образуется на поверхности фасада, если ее температура ниже точки росы воздуха. В обоих случаях соответствующий свес крыши уменьшает источник влажности. Водяные брызги большей частью появляются в области цоколя, которая поэтому часто должна иметь особенно стойкую штукатурку.

¹ Диффузия пара из внутреннего воздуха к наружной поверхности конструкции оказывает существенное влияние в случае большого перепада между температурой и влажностью внутреннего и наружного воздуха, большой паропрооницаемости стены, на которую монтируется теплоизоляционный фасад и в некоторых других случаях.

² Строительной влажностью называется влажность материалов в конструкции, обусловленная выполнением строительных работ.

2.4. Косые дожди

Воздействие, вызываемое косыми дождями, как правило, оказывается наиболее интенсивным с наветренной стороны. Особенно сильно затрагиваются высоко находящиеся поверхности фасадов и поверхности в области углов и кромок здания. Эркер и другие выступающие из стен конструкции также подвержены повышенному воздействию от косых дождей. Часто недооценивается влияние наклона поверхности фасада. Наклонное положение фасада, вызванное выпуклостью участка стены, а также при утолщающейся книзу каменной кладке, может привести к увеличению воздействия осадков, так как в этом случае дождь попадает на фасад даже при безветренной погоде.

Чтобы иметь возможность более точно исследовать данные обстоятельства, обычные измерения воздействия косых дождей на вертикальные поверхности фасадов были дополнены измерениями воздействий на наклонную поверхность (при наклоне в 5°); исследования проводились в климатическом зале полигона натуральных испытаний в Хольцкирхене осенью 2004 года. Для этого дождемер, встроенный в фасад зала, был расположен так, чтобы нижняя часть его приемного сосуда на несколько сантиметров выступала от наружной поверхности стены.

Результаты этих измерений в сравнении с обычными измерениями косо дождя на том же фасаде в течение двухмесячного периода представлены в нижней части на рис. 5. Можно вполне ясно увидеть, что относительно малое отклонение приемной поверхности дождемера (всего на 5°) приводит к повышению нагрузки от косо дождя примерно в четыре раза по сравнению с нагрузкой на вертикальный фасад.

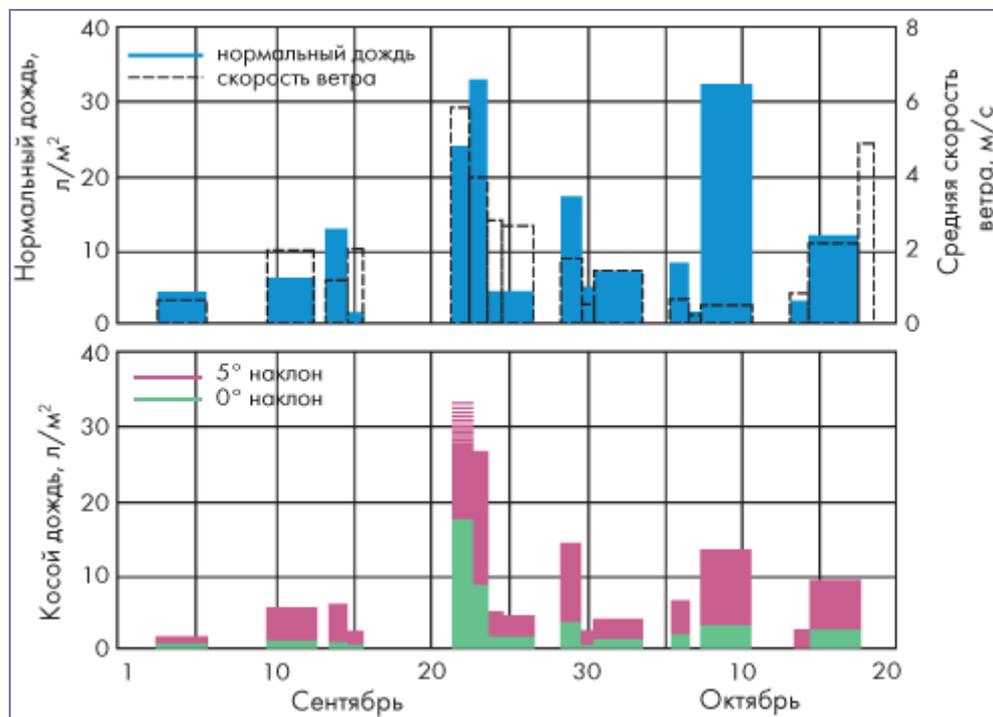


Рисунок 5. Воздействие от косо дождя (внизу), измеренное как дневные суммы (или трехдневные суммы в конце недели) на вертикальные и наклоненные на 5° к вертикали фасадные элементы в середине фасада испытательного зала высотой 4 м, ориентированного на запад, с плоской крышей. Для сравнения приведено количество осадков на горизонтальную поверхность и скорость ветра западного направления (вверху)

Сопоставление этих результатов с представленными на верхней части рис. 5 измеренными количествами нормального дождя (количество осадков, выпавших на горизонтальную поверхности в открытом поле) и скоростью ветра, направление которого перпендикулярно поверхности испытываемого фасада, показывает, что количество осадков, попадающих от косо дождя на вертикальную поверхность, при некотором ветре почти достигает нормального количества дождя.

Маловероятно, что непропорционально высокое увеличение воздействия от косо дождя при малом отклонении от вертикали вызывается только дополнительно уловленным компонентом нормального дождя. Скорее приходится предположить, что из-за наклона улавливается и часть брызг, происходящих от попадания косо дождя на области фасада над дождемером. Часть (около 30 %) количества дождевой воды, сталкивающейся с фасадом, отражается от него в виде брызг.

В какой мере эти брызги вызывают сильное повышение воздействия атмосферных осадков на немного наклоненные части фасада – еще следует выяснить при дальнейших исследованиях. В целом, однако, можно констатировать, что наклонные поверхности подвержены существенно более высокому воздействию косо дождя, чем вертикальные поверхности фасада. Даже современные водоотталкивающие виды штукатурки не выдерживают столь интенсивного воздействия в течение длительного времени, как это показали

испытания на полигоне наклонно расположенных фрагментов теплоизоляционных фасадов (рис. 6). Поэтому в испытаниях, проводимых в настоящее время, обращается внимание на строго вертикальное расположение фрагментов.



Рисунок 6. Экспериментальный фрагмент теплоизоляционного фасада, установленный с отклонением от вертикали примерно на 30°, ориентированный на запад, через 12 лет после установки. Значительно более высокое воздействие выпадающих осадков вследствие наклона поверхности привело к полному разрушению поверхностного слоя штукатурки и, как следствие, к сильному разрастанию мха на поверхности фасада.

2.5. Конденсация влаги из наружного воздуха (роса)

В то время как воздействие косых дождей на фасад зависит от его ориентации, но не зависит от его теплотехнических свойств, теплоемкость и теплопроводность наружной стены определяют количество конденсированной влаги (росы) на ее наружной поверхности в безоблачные ночи. Как уже было разъяснено с использованием рис. 2, поверхность теплоизоляционного фасада пребывает в состоянии лучистого теплообмена (обмена длинноволновым излучением) с окружающей ее средой. Так как ночью отсутствует облучение солнечной радиацией, а излучение атмосферы при ясной погоде (отсутствие облаков) гораздо меньше излучения поверхности фасада, то наружная поверхность фасада лишается теплоты. Охлаждение ниже точки росы наружного воздуха является предпосылкой для образования конденсата на поверхности, однако, выпадение конденсата (росы) может наступить лишь в том случае, если теплота будет добавляться изнутри в очень малой степени, а внешний поверхностный слой будет обладать относительно малой теплоемкостью. Поэтому теплоизоляционные фасады, как правило, сильнее подвержены образованию на поверхности конденсата (росы) в течение ночи, чем большинство других конструкций стен. Правда, образование конденсата отнюдь не ограничивается конструкциями с теплоизоляционными фасадами.

До сих пор нет свидетельств по поводу повреждений наружных стен в связи с ночным охлаждением. Однако несомненно, что связанное с этим образование конденсата на поверхности теплоизоляционного фасада может привести к биологическому обрастанию фасада, которое можно видеть на рис. 7. Показанный на рисунке узор при обрастании теплоизоляционного фасада, часто называемый «эффектом леопарда», представляет собой однозначный признак микробиологического роста (например, водорослей, грибов и т. д.) из-за образования конденсированной воды. Уже в конце 1990-х годов это явление было

исследовано в Швейцарском институте по проверке и исследованию материалов. В процессе исследования выяснилось, что указанное явление характерно, прежде всего, для наиболее новых систем теплоизоляционных фасадов. Точный анализ с помощью инфракрасной термографии показал, что ночная температура поверхности представляет собой индикатор обрастания. В областях, где по сравнению с обросшими поверхностями наблюдалась более высокая температура, не обнаруживалось обрастания, как, например, на поверхности штукатурки над дюбелями, являющимися тепловыми мостиками. Подобное явление (отсутствие обрастания) имеет силу и для систем теплоизоляционных фасадов старого типа с меньшей толщиной теплоизоляционного слоя (около 40 мм), так как температуры на их поверхностях из-за более значительного теплопереноса изнутри конструкции к штукатурке остаются выше точки росы наружного воздуха. Тем самым наблюдавшийся узор обрастания мог быть однозначно объяснен ночным образованием конденсированной воды (росы).

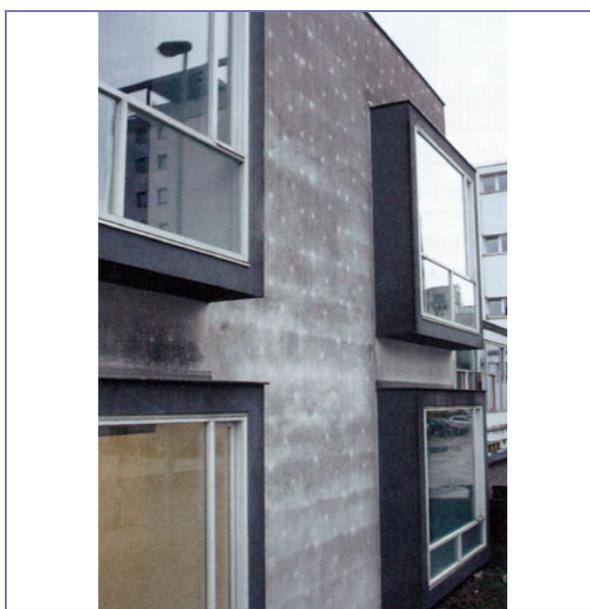


Рисунок 7.
«Эффект леопарда» – узор на фасаде здания –
однозначный признак микробиологического
обрастания из-за образования конденсированной
воды на поверхности фасада

В соответствии с исследованиями, начало и продолжение микробиологического роста сильно зависят от того, как долго сохраняются соответствующие условия роста. Сравнение внешних влажностных воздействий, обусловленных косым дождем и росой, изображено на рис. 8, применительно к теплоизоляционным фасадам западной ориентации на испытательном полигоне в Хольцкирхене. Очевидно, месячная продолжительность образования конденсированной воды на поверхности фасада явно больше соответствующей продолжительности косых дождей. Это, однако, еще не означает, что и средняя влажность поверхности фасада, обусловленная косым дождем, должна быть всегда меньше. Так как интенсивность ливня на наветренной стороне далеко превосходит интенсивность образования росы – ежегодное количество ливня в Хольцкирхене примерно в десять раз больше ежегодного количества конденсированной воды на высоко теплоизолированных фасадах, – то условия возникновения влажности на фасаде решающим образом зависят от влагоемкости фасадного поверхностного слоя. Поэтому теплофизические свойства материалов поверхностных слоев (штукатурки и краски) и находящегося за ними изоляционного материала

являются в настоящее время предметом интенсивной исследовательской и технологической деятельности.

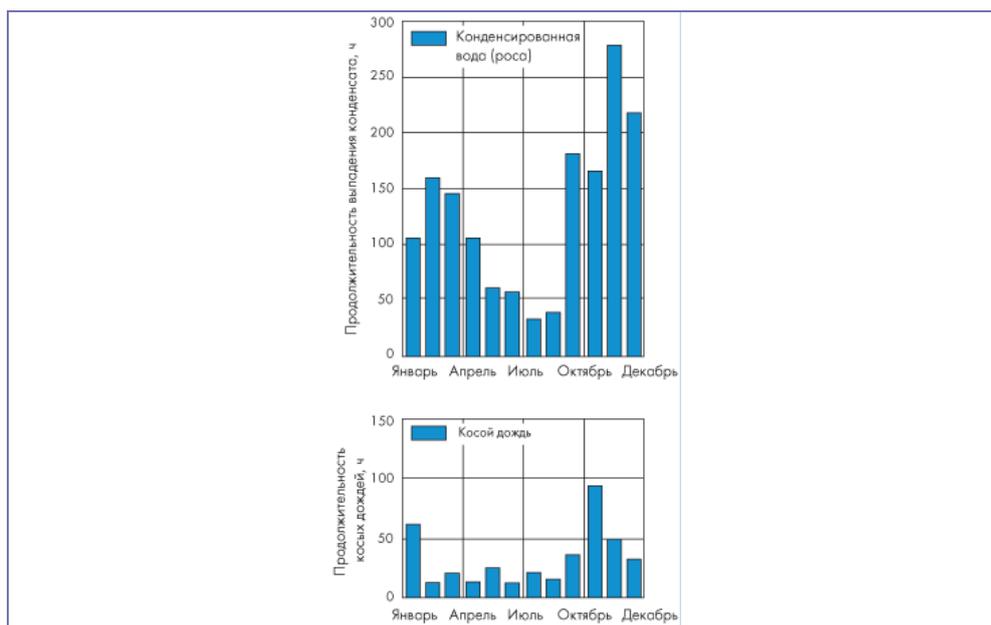


Рисунок 8.
Длительность образования росы (температур поверхности ниже точки росы) в сравнении с продолжительностью косых дождей, измеренной на теплоизоляционном фасаде западной ориентации ($U = 0,26 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ с белой окраской)