

Влажностный режим конструкции вентилируемого штукатурного фасада

Генеральный директор С.С. Солощенко*,
ООО «Стакковент»

Постоянный рост цен на тепловую и электрическую энергию, наблюдаемый в последние годы, делает особенно актуальной проблему эффективной теплозащиты ограждающих конструкций зданий с целью экономии энергетических ресурсов. В последнее время наибольшую популярность получили навесные фасадные системы. Наиболее распространенные среди них – вентилируемые фасады с облицовкой на отnose и штукатурные фасады. У каждого вида фасадных систем имеются как положительные, так и отрицательные особенности.

Основной проблемой систем наружного утепления фасадов является вопрос долговечности. Главным фактором, влияющим на указанный показатель, является влажностный режим конструкции, а точнее способность многослойной конструкции противостоять чрезмерному увлажнению материалов, входящих в нее. Благоприятный влажностный режим определяет способность многослойной конструкции эффективно удалять влагу, проникающую в виде водяного пара из помещения наружу, предотвращая переувлажнение всех слоев конструкции. В современных системах утепления фасадов зданий с применением тонкослойной штукатурки используются специальные паропроницаемые штукатурные составы, которые частично решают проблему выведения влаги. Тем не менее, наружный защитно-декоративный штукатурный слой имеет относительно высокий коэффициент сопротивления паропроницанию, поэтому поток пара, проходящий через утеплитель, не может полностью покинуть конструкцию и будет накапливаться на границе штукатурного и теплоизоляционного слоев.

При повышенной влажности материала ухудшается ряд его характеристик. Под воздействием погодных условий, с повышением влажности снижается его устойчивость к трещинообразованию, возникающему в результате замораживания-оттаивания материала. Это происходит вследствие изменения геометрических размеров материала при его увлажнении и замораживании, что приводит к избыточным напряжениям в штукатурном слое. Ухудшение перечисленных характеристик в целом приводит к снижению долговечности и теплозащитных функций традиционной фасадной конструкции с применением тонкослойной штукатурки [1].

В рамках представленной статьи рассматривается новая для российского рынка технология утепления и отделки фасадов зданий – навесной вентилируемый штукатурный фасад. Суть технологии заключается в применении в штукатурной системе наряду с традиционными материалами (минеральной ватой, тонкослойной штукатуркой и пр.) инновационного материала – фасадного мата «Стаккодрейн», который обеспечивает непрерывный вентилируемый воздушный зазор под защитно-декоративным слоем штукатурки.

В статье рассматривается влияние воздухопроницаемости создаваемой прослойки на влажностный режим конструкции. Полученная при расчете влажность материалов оцениваемой конструкции сравнивается с влажностью материалов обыкновенного штукатурного фасада.

Расчетные характеристики климата и микроклимата помещений здания

Основными параметрами климатического района строительства являются средняя температура и относительная влажность воздуха наиболее холодного месяца. В данной работе рассматривается не конкретное строящееся здание, а экспериментальная конструкция фасада, поэтому климатические параметры района строительства выбираются из соображений наибольшей общности. Все расчеты проводятся для климатических параметров Москвы и схожих по климатическим параметрам областей. В основном это области европейской части РФ, отличающиеся наиболее плотным заселением (Владимирская обл., Волгоградская обл., Республика Карелия, Ленинградская обл., Московская обл., Мурманская обл., Нижегородская обл., Новгородская обл., Псковская обл., Тверская обл. и другие).

В расчетах климатические параметры района строительства принимаются по СНиП 23-01-99 [2] для Москвы. Эти параметры имеют следующие значения:

- средняя температура наиболее холодного месяца $t_n = -10,2$ °С;
- средняя относительная влажность наиболее холодного месяца $\phi_n = 87\%$;
- средняя температура отопительного периода $t_{от} = -3,1$ °С;
- продолжительность отопительного периода $z_{от} = 214$ сут.

Основными расчетными параметрами микроклимата помещения являются температура и относительная влажность внутреннего воздуха. В помещениях исследуемого здания по проекту принимается $t_{в} = 20$ °С, $\phi_{в} = 55\%$. Точка росы для данных параметров внутреннего воздуха составляет $t_{т.р.} = 10,7$ °С.

На основании климатических характеристик района строительства и микроклимата помещения рассчитывается величина градусо-сутки отопительного периода:

$$ГСОП=(t_b-t_{от})\times z_{от} = 23,1\times 214=4943 \text{ }^\circ\text{C}\times\text{сут.}$$

Описание исследуемых ограждающих конструкций

В качестве базовой конструкции определена традиционная система утепления фасадов с применением тонкослойной штукатурки, отличающаяся от оцениваемой конструкции отсутствием вентилируемой прослойки под штукатурным слоем. Характеристики материалов (табл. 1) приняты по СП 23-101-2004 (Приложение Д) [3].

Таблица 1. Состав стены изнутри наружу

№ слоя	Материал	Толщина слоя, δ , м	Теплопроводность, λ , Вт/м \cdot °С
1	Штукатурка цементно-песчаным раствором	0,02	0,93
2	Кирпичная кладка	0,25	0,81
3	Минераловатная плита	0,15	0,045
4	Фасадный мат «Стаккодрейн» (оцениваемая конструкция)	0,04	-
5	Наружная штукатурка сложным раствором	0,009	0,87

Расчет влажностного режима исследуемых конструкций

Расчет влажностного режима конструкций по стационарным условиям является ориентировочным и не отражает действительной картины изменения влажности материала в ограждении вследствие того, что процессы диффузии водяного пара протекают медленно. Метод, изложенный в СНиП 31-02-2003 «Тепловая защита зданий» [4], учитывает только перенос пара из помещений и не учитывает возможность накопления и перераспределения пара в конструкции. Для адекватного исследования влажностного режима конструкций применен метод последовательного увлажнения, основанный на численном решении уравнения влагопереноса, учитывающего перенос как пара, так и жидкой влаги, а также инерционность конструкции.

Для систем наружного утепления и отделки фасадов зданий с применением тонкослойных штукатурок основным критерием качества влажностного режима является влажность наружного штукатурного слоя. Для оцениваемой конструкции с вентилируемой прослойкой влажность штукатурного слоя определяется более сложно, так как на ней сказывается влияние переноса влаги в зазоре.

В качестве критерия допустимого увлажнения штукатурного слоя выбрана влажность, равная сумме расчетной влажности для условий эксплуатации Б (W_B) и предельно допустимого приращения расчетного массового отношения влаги в материале ΔW_{cp} . Для штукатурки $W_B=4\%$, $\Delta W_{cp}=5\%$ (СНиП II-3-79, Приложение 3. Таблица 14) [5]. Таким образом, критической далее считается влажность штукатурки, равная 9% по массе.

При расчете нестационарного влажностного режима для обеих конструкций внутреннее сопротивление влагообмену было принято $0,02 \text{ м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}/\text{мг}$. При расчете базовой конструкции наружное сопротивление влагоотдаче с учетом штукатурного слоя и его окраски было принято равным $0,3 \text{ м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}/\text{мг}$.

Квазистационарный влажностный режим для базовой конструкции устанавливается через 2 года после начала эксплуатации здания. Максимальная влажность достигается слоем штукатурки в феврале и составляет 7,2% влажности по массе (при относительной влажности воздуха в порах материала, равной 100%). Максимальная влажность утеплителя составляет 2,8% влажности по массе (относительная влажность воздуха – 100%).

Максимальная влажность штукатурного слоя в базовой конструкции на 80% превышает максимальную сорбционную. Полученная влажность штукатурного слоя меньше критической влажности в 9% по массе. Такая конструкция формально удовлетворяет требованиям к влажностному режиму для данного класса ограждающих конструкций.

Для стены с наружным тонким штукатурным слоем и вентилируемой прослойкой расчет проводится до воздушной прослойки. Влияние вентилируемого зазора на конструкцию моделируется граничными условиями. В частности предполагается, что влажность воздуха в прослойке близка к 100% относительной влажности наружного воздуха. Поверхность утеплителя теплее наружного воздуха за счет влияния мата. Наружное сопротивление влагоотдаче (из утеплителя в прослойку) принято равным $0,04 \text{ м}^2\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}/\text{мг}$. Квазистационарный влажностный режим конструкции устанавливается менее чем за 2 года после начала эксплуатации здания. Максимальная влажность достигается наружным слоем утеплителя в феврале и составляет 0,73% влажности по массе (относительная влажность воздуха 87%). Максимальная влажность меньше максимальной сорбционной. Влагонакопление в годовом периоде эксплуатации отсутствует. Поток водяного пара, приходящий в зимний период из конструкции к штукатурному слою, составляет $q_{вп}=450 \text{ мг}/(\text{м}^2\cdot\text{ч})$.

Солощенко С.С. Влажностный режим конструкции вентилируемого штукатурного фасада

Влажностный режим исследуемых конструкций отличается лишь в зоне расположения вентилируемого зазора и штукатурного слоя. В остальном показатели влажностей материалов и удельные потоки водяного пара для обеих конструкций близки. [6]

Расчет воздухообмена в вентилируемой прослойке

В поперечном сечении фасадный мат «Стаккодрейн» представляет собой V-образный трехмерный профиль из полимерного материала, который образует вертикально ориентированные вентиляционные каналы. С наружной и внутренней стороны к нему прикреплены стеклотканевая мелкоячеистая сетка. Образующий профиль материал имеет определенную толщину, поэтому в расчетах принимаем прослойку неоднородной и с частичным заполнением.

Основной характеристикой воздухообмена в воздушной прослойке для расчета влагоудаления из прослойки является скорость движения воздуха. Поэтому методика по нахождению воздухообмена в прослойке при известных характеристиках геометрии и заполнении прослойки будет сводиться к нахождению скорости движения воздуха.

Расчет температуры и скорости движения воздуха в прослойке

Чтобы оценить характер движения воздуха в прослойке и диапазон проницаемостей, рассматривается два случая: первый – прослойка ничем не заполнена; второй – прослойка заполнена наиболее проницаемой минеральной ватой. Очевидно, что проницаемость не может быть выше, чем у незаполненной прослойки. Для второго случая хорошо известно (как из опыта, так и из расчетов), что проницаемость заполненной минеральной ватой прослойки недостаточна для вентилируемых фасадов.

Связь между скоростью движения воздуха в прослойке и перепадом давления отражает характер движения воздуха. Она описывается общей формулой:

$$\Delta P = kv^n \quad (1)$$

ΔP – перепад давления, Па;

k – коэффициент пропорциональности, связанный с сопротивлением движению воздуха;

v – скорость движения воздуха, м/с.

Для незаполненной прослойки показатель степени $n=2$, для фильтрации воздуха через минеральную вату $n=1$. Только для самых проницаемых видов минеральной ваты показатель степени начинает увеличиваться. Так как проницаемости минеральной ваты совершенно недостаточно, а любые, пусть и малые сквозные каналы имеют показатель степени $n=2$, далее в расчете принимается, что $n=2$.

Для исследуемого случая движения воздуха по прослойке в зимний период под действием перепада температуры за счет подогрева прослойки теплом, пришедшим через стену, характерны небольшие градиенты давления. В расчетах для января такой градиент составит примерно 0,1 Па/м. Для наиболее проницаемых видов минеральной ваты, прошедших испытание в НИИСФ, скорость движения воздуха при градиенте давления 0,1 Па/м составит 0,0001 м/с. Для незаполненной прослойки описанной выше геометрии характерная скорость движения воздуха составляет 0,2 м/с. Дополнительные расчеты позволяют сузить диапазон проницаемостей прослойки для построения графиков. Диапазон выбирается таким образом, чтобы средняя скорость движения воздуха в прослойке составляла от 0,04 м/с до 0,2 м/с.

Проницаемость заполнения прослойки на графиках будет характеризоваться безразмерным коэффициентом m . Далее он называется коэффициентом сопротивления прослойки и определяется как отношение аэродинамического сопротивления заполненной и незаполненной прослоек.

Методики расчета температуры и скорости движения воздуха в вентилируемых воздушных прослойках с неперфорированным экраном на данный момент широко известны и применяются при расчетах навесных фасадов с облицовкой на отnose. Расчет проводится методом последовательных приближений по формулам (2) и (3).

Скорость движения воздуха в воздушной прослойке определяется по формуле:

$$V_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{0,08h(t_{\text{ср}} - t_{\text{н}})}{m\xi_{\text{пр}} + \xi_{\text{гр}}}} \quad (2),$$

где h – разность высот от входа воздуха в зазор до ее выхода из него, м;

$t_{\text{ср}}, t_{\text{н}}$ – средняя температура воздуха в зазоре и температура наружного воздуха, °С;

ξ_i – коэффициенты местных сопротивлений.

Средняя температура воздуха в воздушной прослойке определяется по формуле:

$$t_{\text{ср}} = t_0 - (t_0 - t_{\text{н}}) \cdot \frac{x_0}{h} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{x_0}\right) \right] \quad (3),$$

где t_0 – предельная температура воздуха в прослойке, °С;

x_0 – условная высота, на которой температура воздуха в прослойке отличается от предельной температуры t_0 в e раз ($e \approx 2,7$) меньше, чем отличалась при входе в прослойку, м;

$t_{в}$ – температура внутреннего воздуха, °С.

Для выбранной геометрии прослойки и климатических параметров района строительства (средняя январская температура $-10,2^\circ\text{C}$) по приведенной методике проведена серия расчетов вариантов с различной проницаемостью прослойки. Связь между коэффициентом сопротивления прослойки и скоростью движения воздуха приведена на графике (рис. 1).

Средняя температура воздуха в прослойке для большей части рассмотренного диапазона составила $-8,2^\circ\text{C}$.

Так как проницаемость прослойки обеспечена созданием регулярных каналов в материале, заполняющем прослойку, расчет характеристик заполнения производится по графику на рис. 2. Под относительной площадью каналов понимается площадь каналов, приходящаяся на 1 квадратный метр сечения прослойки, измеренная в м^2 [6].

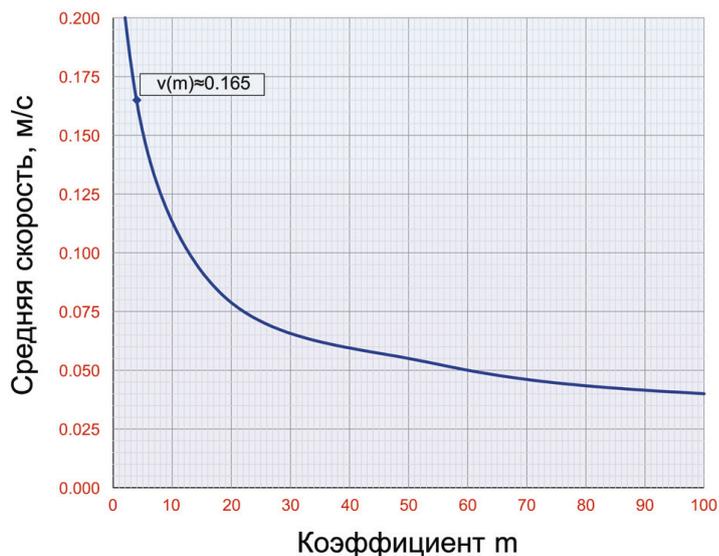


Рисунок 1. Связь между коэффициентом сопротивления прослойки и скоростью движения воздуха

Расчет площади вентиляционных каналов

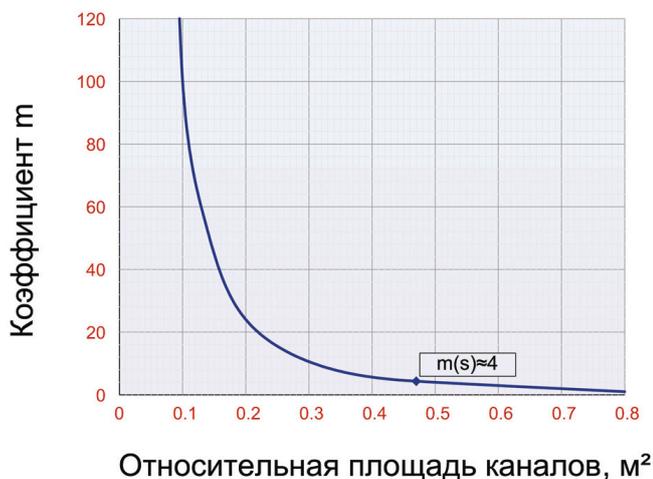


Рисунок 2. Связь между относительной площадью каналов и коэффициентом сопротивления прослойки

Для расчета относительной площади вентиляционных каналов примем, что на всей непрерывности прослойки высотой 10 м ни один из рядов матов не совпадает друг с другом, то есть на всем протяжении прослойки каналы располагаются с некоторым смещением по отношению друг к другу. Таким образом, зная среднюю толщину заполнения ($\approx 0,5$ мм), рассчитаем площадь каналов, которые при самом худшем стечении обстоятельств (несовпадении всех 10 рядов) будут оставаться открытыми.

Геометрия мата имеет следующие параметры: высота 1,0 м, ширина 1,0 м, толщина 0,04 м. Рассмотрим сегмент сечения мата площадью равной $0,04\text{м} \times 0,04\text{м} = 0,0016\text{м}^2$. Площадь заполнения в нем с учетом наложения рядов составляет $0,165\text{м} \cdot 0,0005\text{м} \cdot 10 = 0,000825\text{м}^2$. Чистая площадь каналов составила $0,000775\text{м}^2$. При пересчете чистой площади на 1м^2 сечения прослойки, получаем $0,000775\text{м}^2 \cdot 625 = 0,48\text{м}^2$. Определим коэффициент m согласно полученному значению на графике на рис.2. и получим $m=4$.

Проверка насыщения воздуха в прослойке водяным паром

Влажность воздуха в воздушной прослойке, так же как и температура, распределены по высоте прослойки неравномерно. Поднимаясь, воздух постепенно насыщается водяным паром, и, начиная с некоторой высоты, возможно, не будет обеспечивать требуемого влагоудаления из утеплителя. Для предотвращения этого явления проводится расчет влажности воздуха на выходе из воздушного зазора в наиболее холодном месяце. Парциальное давление водяного пара на выходе из воздушной прослойки описывается формулой, аналогичной формуле (3):

$$e_{\text{пр}} = e_0 - (e_0 - e_n) \cdot \exp\left(-\frac{H}{x_1}\right) \quad (4),$$

где e_0 – давление водяного пара, к которому стремится воздух в прослойке, Па;
 e_n – парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па;
 x_1 – условная высота влагонасыщения воздуха в воздушной прослойке, м.

По формуле (4) построен график зависимости парциального давления водяного пара на выходе из прослойки от коэффициента сопротивления прослойки (рис. 3). Данная величина является расчетной. Если она превышает давление насыщенного водяного пара, то в прослойке начинается выпадение конденсата, а давление пара равняется насыщенному.

Основным критерием качества влажностного режима прослойки является высота начала выпадения конденсата $x_{\text{крит}}$. Она определяется по формуле:

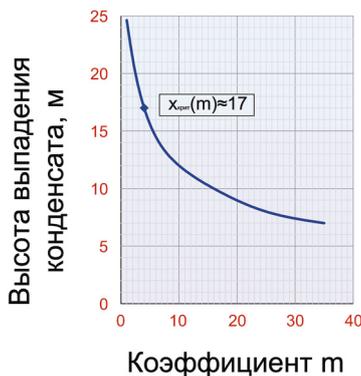


Рисунок 4. Зависимость высоты начала выпадения конденсата от коэффициента сопротивления прослойки

До этой высоты влажность штукатурного слоя в оцениваемой конструкции не должна превышать 4% влажности по массе, что обеспечивает намного более благоприятные условия эксплуатации, чем у обыкновенного штукатурного фасада (базовой конструкции), для которого максимальная влажность штукатурного слоя составила 7,2% влажности по массе.

По формуле (5) построен график (рис. 4) зависимости высоты начала выпадения конденсата от сопротивления прослойки.

Распределение влажности штукатурного слоя по высоте прослойки

На основании проведенных выше расчетов парциального давления водяного пара можно найти среднюю влажность штукатурного слоя. Влажность находится исходя из следующих предположений:

- 1) при давлении водяного пара в прослойке меньшем, чем давление насыщенного водяного пара, влажность штукатурного слоя определяется по кривой сорбции [7];
- 2) при давлении водяного пара в прослойке большем, чем давление насыщенного водяного пара, и потоке пара из прослойки в штукатурный слой, равном 435 Па, влажность штукатурного слоя принимается равной 7,2% – значению, полученному расчетом нестационарного влажностного режима для стены без вентилируемой прослойки;
- 3) промежуточные точки находятся аппроксимацией.

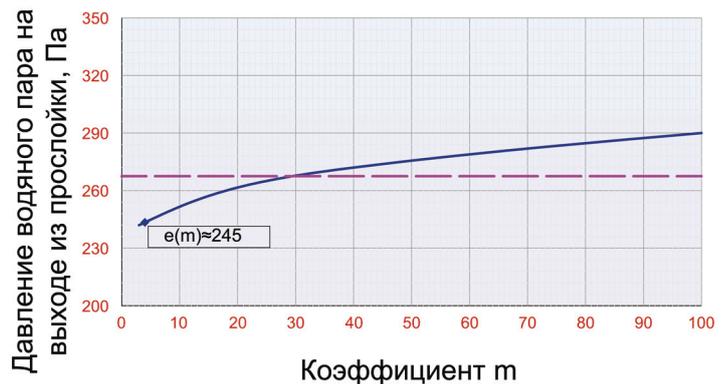


Рисунок 3. Зависимость расчетного парциального давления водяного пара на выходе из прослойки от коэффициента сопротивления прослойки. Пунктирной линией показано давление, при котором начинается выпадение конденсата

$$x_{\text{крит}} \approx 28573 \cdot \frac{v \cdot d}{1 + \frac{t_{\text{пр}}}{273}} \cdot \frac{E_n(1 - \varphi_n)}{-k \cdot e_n + q_0^n} \quad (5),$$

где k – удельный поток водяного пара из конструкции в прослойку;
 v – скорость движения воздуха в прослойке;
 d – толщина прослойки;
 $t_{\text{пр}}$ – температура воздуха в прослойке;
 E_n – максимальное давление водяного пара;
 φ_n – относительная влажность наружного воздуха;
 e_n – парциальное давление водяного пара наружного воздуха;
 q_0^n – поток пара.

На рис. 5 показано распределение влажности штукатурного слоя по высоте прослойки. Из графика видно, что на всей протяженности непрерывной вентилируемой прослойки влажность штукатурного слоя не превышает максимальную сорбционную влажность.

Заключение

В работе рассмотрено влияние вентилируемой воздушной прослойки на свойства фасада с тонким штукатурным слоем. Такую прослойку обеспечивает инновационный материал – фасадный мат «Стаккодрейн» [8].

Проведен анализ влияния вентилируемой воздушной прослойки на влажностный режим стен со штукатурным фасадом. На примере стены с основанием из кирпичной кладки толщиной 250 мм и утеплением МВП 150 мм исследован нестационарный влажностный режим с вентилируемой прослойкой и без таковой.

По результатам расчетов было выявлено, что при использовании фасадных матов влажность штукатурного слоя значительно снижается по сравнению с базовой конструкцией (обыкновенным штукатурным фасадом).

Снижение влажности наружного штукатурного слоя приводит к повышению долговечности всей фасадной системы. На участках прослойки с влажностью штукатурного слоя, меньшей максимальной сорбционной, замораживание-оттаивание штукатурки в процессе эксплуатации практически не будет приводить к ее разрушению.

Создание вентилируемой прослойки под штукатуркой в штукатурном фасаде является новой и многообещающей технологией, которая позволит существенно повысить надежность и эксплуатационные качества фасадных систем с тонким штукатурным слоем.

Литература

1. Гагарин В. Г. Теплоизоляционные фасады с тонким штукатурным слоем. Температурно-влажностные воздействия и долговечность систем с тонким штукатурным слоем (По материалам статьи Н. М. Künzel, Н. Künzel, K. Sedelbauer «Hygrothermische Beanspruchung und Lebensdauer von Wärmedämm-Verbundsystemen», Bauphysik, 2006, Bd. 28, N. 3) // АВОК. 2007. №6. С. 82–90; №7 С. 66–74.
2. СНиП 23-01-99. Строительная климатология М., 2000.
3. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. М., 2004.
4. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита здания. М., 2004.
5. СНиП II-3-79*. Строительная теплотехника. – М., 1998.
6. Гагарин В.Г., Козлов В.В. Расчет влияния фасадных матов «Стаккодрейн» на теплофизические характеристики стен с теплоизоляционной фасадной системой с тонким штукатурным слоем : Научно-технический отчет / НИИСФ РААСН. М., 2010.
7. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей здания / Изд. 4-е, перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1973. 287 с.
8. Stuccovent. Компоненты системы. Фасадный мат STUCCODRAIN MF20PA [Электронный ресурс]. URL: http://stuccovent.ru/?page_id=113 (дата обращения: 07.12.2010).

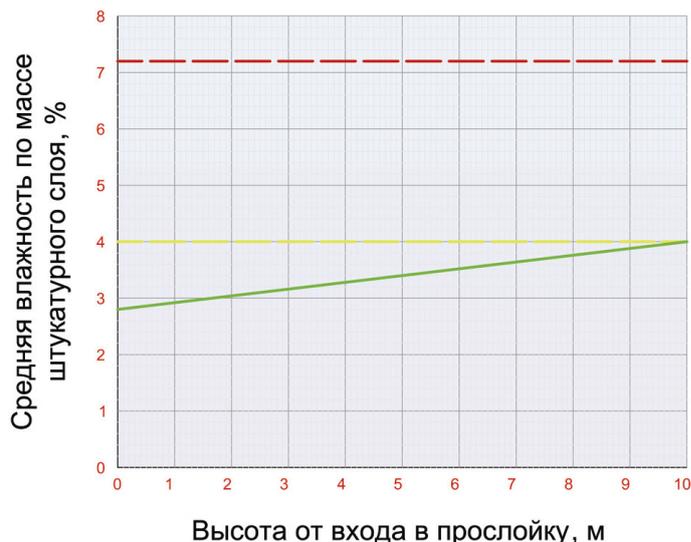


Рисунок 5. Зависимость средней влажности штукатурного слоя от высоты в прослойке. Желтая пунктирная линия показывает максимальную сорбционную влажность штукатурки, красная пунктирная линия показывает влажность штукатурки для базовой конструкции (без вентилируемого зазора)

* Сергей Сергеевич Солощенко, Санкт-Петербург, Россия

Тел. раб.: +7 (812) 334-79-43; эл. почта: sergey.soloschenko@stuccovent.ru