



Research Article

Received: September 2, 2025

Accepted: October 18, 2025

ISSN 2304-6295

Published: November 29, 2025

Moisture accumulation in the assembly joint of the window block abutment to the wall opening

Kotliarskaia, Irina Leonidovna^{1*}  Ulanov, Aleksandr Vadimovich²  Vatin, Nikolai Ivanovich¹  Korniyenko, Sergey Valeryevich³  

¹ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg, Russian Federation;
iravassilek@mail.ru (K.I.L.); vatin@mail.ru (V.N.I.)

² VEKA Rus, Moscow, Russian Federation; aulanov@veka.ru (U.A.V.)

³Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation; skorn73@mail.ru (K.S.V.)
 Correspondence: * email iravassilek@mail.ru; contact phone [+79095863919](tel:+79095863919)

Keywords:

Assembly Joint; Vapor Permeability; Vapor Permeability Resistance; Moisture; Moisture Calculation; Moisture Accumulation; Condensation; Maximum Wetting Plane; Maximum Wetting Temperature

Abstract:

The object of research is a typical assembly joint of the window block junction with the wall opening. **Methodology.** The moisture regime of the typical assembly joint is calculated in a similar manner as for the enclosing structures. The study used the method of determining the maximum wetting plane; the graph-analytical method; an approximate analytical method for determining the position of the plane of possible condensation; an assessment of annual moisture accumulation and a test for compliance with the Rogers principle. **Results.** The calculation of the typical assembly joint using the maximum wetting plane revealed limitations in the tabular data. The analysis of the studies also revealed a high error in the formula for determining the partial pressure of saturated vapor at sub-zero temperatures. The approximate analytical method for determining the position of the plane of possible condensation also revealed limitations of the tabular data. The graph-analytical method did not reveal any intersection of the curves e and E at a temperature of -6.5°C (the average January temperature), which indicates the absence of condensation at higher temperatures. An assessment of annual moisture accumulation showed that no moisture accumulation occurs throughout the year. The calculation identified a plane of maximum condensation at the outer boundary of the assembly joint. A rapid inspection using Rogers' principle confirmed the correct execution of the assembly joint. The identified deficiencies in the methods indicate the need for additional research to assess the moisture conditions of assembly joints, as the methods used form the basis of current regulatory documents.

1 Введение / Introduction

Основными источниками влаги (moisture) в ограждающих конструкциях здания согласно являются атмосферные осадки, строительная влага, технологическая влага, грунтовая влага, гигроскопическая влага и конденсация влаги из воздуха [1]. Содержание влаги в ограждающих конструкциях оказывает воздействие на их теплоизоляционные свойства и санитарно-гигиенические показатели. Кроме того, влага играет значительную роль в процессах коррозии материалов, циклах замораживания-оттаивания и, как следствие, в общей долговечности сооружений [2].

Влажностный режим (moisture conditions) ограждающих конструкций был рассмотрен научным сообществом не единожды. Например, проведенное натурное исследование [3]

Kotliarskaia, I.; Vatin, N.; Ulanov A.; Korniyenko, S.

Moisture accumulation in the assembly joint of the window block abutment to the wall opening;
 2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 119 Article No 11906. doi: 10.4123/CUBS.119.6

влажностного состояния стеновых ограждающих конструкций холодильных складов показало их неудовлетворительное состояние. Исследование [3] показало, что в ограждающих конструкциях холодильных складов происходит постоянное круглогодичное накопление влаги в отличие от ограждающих конструкций жилых и общественных зданий, где зимний период накопления влаги сменяется летним периодом выхода влаги. Статья [4] описывает определение наличия конденсации и толщины слоя увлажнения ограждающей конструкции методом цветовой индикации на основе хлорида железа и роданида калия. Каждому цвету датчика соответствует определённая относительная влажность воздуха. Представленный метод исключает локальность и позволяет получить представление о распределении влажности по сечению или в объеме всей конструкции. Работа [5] сравнивает коэффициенты паропроницаемости минеральной ваты для образцов, расположенных горизонтально и вертикально. Дополнительного уточняющего коэффициента при переводе коэффициента паропроницаемости минеральной ваты в горизонтальном состоянии в коэффициент паропроницаемости минеральной ваты в вертикальном состоянии не требуется. Полученный результат распространяется и на другие строительные материалы с коэффициентами паропроницаемости меньшими, чем у минеральной ваты. Работа [6] представляет оценку влажностного режима трехслойной стеновой конструкции с наружным слоем из лицевого керамического кирпича, с использованием теплоизоляционных изделий из стеклянного штапельного волокна марки TS 034-Aquastatik производства ООО "КНАУФ Инсулейшн" (Российская Федерация, Московская область, г. Красногорск). Статья [6] сообщает, что использование в конструкциях наружных стен хорошо вентилируемой воздушной прослойки позволяет значительно улучшить влажностный режим ограждающих конструкций. Результаты расчетов тепловлажностного состояния кирпичной стены, утепленной панелями с вентилируемыми каналами [7] показали, что в утепляющем материале панели наблюдаются два характерных пика относительного влагосодержания. Один из них соответствует концу лета - началу осени, второй пик соответствует зиме - началу весны. Сезоны, соответствующие этим пикам, являются характерными для намокания минераловатной панели. Исследование [7] основано на совместном решении системы нестационарных дифференциальных уравнений тепловлагообмена в многослойных пористых материалах с учетом процессов адсорбции и фазовых переходов.

Инженерными методами расчета влажностного режима являются методы, основывающиеся на аналитических и численных моделях, не требующие мощных вычислительных средств [8]. Инженерные методы расчета применяются, как правило, для многослойных ограждающих конструкций и ограничиваются стационарными условиями тепловлагопереноса.

Одним из таких методов является графоаналитический метод расчета влажностного режима, разработанный К. Ф. Фокиным. Впервые метод был описан в 1934-1935-м году, актуальная версия представлена в [9]. Метод Фокина К.Ф. основан на модели диффузии водяного пара за счет разности парциального давления пара по обе стороны ограждения. Метод Фокина К.Ф. позволяет определить зону возможной конденсации влаги в конструкции, произвести расчет влажностного режима для годового периода и рассчитать годовой баланс влаги [10].

Метод защиты от переувлажнения ограждающих конструкций с помощью определения плоскости максимального увлажнения (maximum wetting plane) основан на исследованиях Гагарина В.Г. и Козлова В.В. [9]–[11] (материалы также обобщены в диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Козлова В.В. [12]). Идея метода заключается в том, что относительно плоскости максимального увлажнения составляются уравнения баланса влаги и проверяется необходимость по устройству дополнительной пароизоляции в конструкции. Уравнения баланса влаги сводятся к тому, что одновременно должно выполняться условие недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации и условие ограничения влаги в ограждающей конструкции за период влагонакопления [13], [14]. Авторским коллективом НИИСФ РААСН (г. Москва, Российская Федерация) также разработан второй метод нахождения плоскости максимального увлажнения, в основу которого легла классификация ограждающих конструкций по взаимному расположению слоев [15]. Слои конструкции подразделяют на два типа: проницаемые и плотные. Исходя из взаимного расположения плотных и проницаемых слоев находится плоскость максимального увлажнения. Работа [16] наглядно представляет классификацию слоев, приводит примеры взаимного расположения проницаемых и плотных слоев. Метод защиты от переувлажнения ограждающих конструкций с помощью определения плоскости максимального увлажнения стал базовым расчетным методом нормативных документов [15], [17].

Kotliarskaia, I.; Vatin, N.; Ulanov A.; Korniyenko, S.

Moisture accumulation in the assembly joint of the window block abutment to the wall opening;
2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 119 Article No 11906. doi: 10.4123/CUBS.119.6

Вытчиков Ю.С. и Беляков И.Г. разработали приближенный аналитический метод определения положения плоскости возможной конденсации. Впервые метод был изложен в публикации 1998-го года [18], далее метод был включен в стандарт [19]. Новизна метода заключается в исследовании функции, представляющей собой разность парциальных давлений водяного пара в рассматриваемом сечении ограждающей конструкции и парциального давления насыщенного водяного пара на экстремум [20]. Работы [21], [22] приводят примеры расчетов ограждающих конструкций с использованием указанного метода.

Использование потенциала влажности позволяет рассчитать влажностный режим многослойных ограждающих конструкций при сверхсорбционной влажности в широком диапазоне изменения температуры [23], [24]. Основоположником теории потенциала влажности является академик НИИСФ РААСН В.Н. Богословский [25]. Потенциал влажности F учитывает совместный перенос пара и жидкой влаги. Потенциал влажности F рассчитывается по характеристикам строительных материалов и, содержащихся в справочной литературе: коэффициентам паропроницаемости, влагопроводности и изотермам сорбции (десорбции). Результатом расчета является профиль влагосодержания по толщине ограждающей конструкции, который строится по известной зависимости $F(w,t)$. Полученные расчетом результаты оценивают влагонакопление в ограждающей конструкции. Статья [26] описывает распределение влаги в многослойных ограждающих конструкциях зданий для неизотермических квазистационарных условий эксплуатации на основе потенциала влажности. Также на основе теории потенциала влажности Корниенко С.В. предложил оценку влагонакопления в годовом цикле эксплуатации ограждающих конструкций [6], [27].

Rogers T. [28] сформулировал главный принцип проектирования ограждающих конструкций с позиции диффузии парообразной влаги: отдельные слои в многослойных ограждениях следует располагать в такой последовательности, чтобы паропроницаемость каждого слоя (G) нарастала от внутренней поверхности к наружной. При указанном расположении слоев водяной пар будет проходить через все слои ограждения и удаляться с наружной поверхности. Rogers T. [29] показал что ограждение будет нормально функционировать, если при соблюдении сформулированного принципа паропроницаемость наружного слоя, как минимум, в 5 раз будет превышать паропроницаемость внутреннего слоя [30].

Ответственным элементом ограждающей конструкции является монтажный шов (assembly joint) узла примыкания оконного блока к стековому проему. Монтажный шов представляет собой многослойную конструкцию, обеспечивающую герметизацию, тепло- и звукоизоляцию зазора между стеной и устанавливаемым элементом. Некачественно выполненный монтажный шов приводит к образованию конденсата [31], плесени [32], промерзанию [33], и, как следствие, разрушению строительных конструкций.

Проведено значительное количество исследований по расчету влажностного режима ограждающих конструкций и лишь несколько работ посвящено монтажным швам. Работы по монтажным швам в основном сосредоточены на их герметичности и водонепроницаемости. Например, работа [34] на примере 11-ти этажного здания отмечает более 400 потенциальных путей протечек через швы, заделанные строительным герметиком. Работа [35] также устанавливает, что просачивание атмосферных осадков в стыках между компонентами ограждающих конструкций в большинстве случаев происходит вследствие нарушения функциональности герметика, а самым уязвимым местом по водопроницаемости является стык окна и стены. Функциональность герметиков утрачивается из-за перемены погодных условий и особенно из-за воздействия ультрафиолетового излучения, приводящего к расслоению и, как следствие, к протечке воды через шов [38]. Результаты испытаний [39] показали невозможность обеспечения водонепроницаемости стыков окон и стен с лицевой герметизацией без дополнительного воздухонепроницаемого слоя или дренажа. Лицевая герметизация заключается в нанесении всего одного слоя герметика для препятствия проникновению дождевой воды в ограждающие конструкции. Наиболее слабым местом в ходе испытаний на водонепроницаемость швов [40] оказалось пересечение горизонтальных и вертикальных стыков.

Научная группа под руководством Olsson L. провела ряд исследований по воздействию дождевой воды на фасад здания, в том числе и на герметичность швов примыканий оконных блоков к стене. Например, работа [37] описывает исследование домов с деревянным каркасом и системой изоляции ETICS (External Thermal Insulation Composite System) на предмет повреждения от влаги. В ходе полевых исследований непрерывно (раз в час) контролировались условия относительной влажности, температуры и влажности в жилых зданиях с использованием Kotliarskaia, I.; Vatin, N.; Ulanov A.; Korniyenko, S.



беспроводных датчиков. В пяти из семи домов были обнаружены протечки от дождя в наружных стенах через швы. Работа [37] установила, что протечки в исследуемых зданиях возникали из-за направления ветра в сторону фасада, значительного количества осадков (2.5 мм в час или более) и скорости ветра (5 м/с или более).

Статья [41] при сравнении действующих международных стандартов испытаний на водонепроницаемость выявила отсутствие единого критерия для моделирования условий воздействия влаги в процедурах испытаний. Работы [42], [43] искали более реалистичные параметры испытаний на водонепроницаемость. Статья [42] на основе байесовского метода представила вариант оценки водонепроницаемости для любых условий эксплуатации и местоположения здания. Байесовский метод, основанный на теореме Байеса, позволяет обновлять априорное распределение вероятностей параметра на основе наблюдаемых данных, т.е. учитывать неопределенности, связанные с измерительными ошибками и ограниченным количеством экспериментальных данных [44]. Результатом работы [43] является коэффициент корреляции между стандартизованными параметрами любого испытания на водонепроницаемость и фактическим воздействием на фасад в условиях эксплуатации с учетом микроклиматических особенностей.

Только одна работа [45] среди изученных содержит расчет влажности монтажного шва на основе метода, разработанного Вытчиковым Ю.С. и Беляковым И.Г. [20]. Исследуемый монтажный шов состоял из трех слоев: пароизоляционный состав (5 мм), теплоизоляция (70 мм) и гидроизоляционный состав (5 мм). Расчет [45] показал, что плоскость возможной конденсации находится на расстоянии 0.0584 м от внутренней поверхности пароизоляционного состава. Проверка на возможность накопления влаги в оконном шве показала на отсутствие накопления влаги за годовой период эксплуатации здания. Влагонакопление за холодный период не выходило за пределы сорбционного увлажнения. Более работ по оценке и расчету влажностного режима монтажного шва в научных базах Scopus, Web of Science, The Lens и Elibrary авторами настоящей статьи не найдено. Недостаток эмпирических данных и теоретических исследований влажностного режима монтажных швов обосновывает актуальность проведения расчета влажностного состояния шва инженерными методами. Планируемый расчет ликвидирует пробел в существующих знаниях и обеспечит качественную защиту строительных конструкций от негативного воздействия влаги.

Статья нацелена на оценку влажностного состояния многослойного монтажного шва узла примыкания оконного блока к стековому проему на основе существующих методов расчета влажностного режима для ограждающих конструкций.

Объектом исследования является монтажный шов узла примыкания оконного блока к стековому проему.

Предметом исследования является влажностный режим монтажного шва узла примыкания оконного блока к стековому проему.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Провести влажностный расчет типового монтажного шва узла примыкания оконного блока к стековому проему с использованием метода определения плоскости максимального увлажнения [13], [17];
2. Сравнить полученные результаты с расчетом влажностного режима по графоаналитическому методу, предложенному Фокиным К.Ф. [9];
3. Провести влажностный расчет типового монтажного узла примыкания оконного блока к стековому проему с помощью приближенного аналитического метода определения положения плоскости возможной конденсации [20], [21];
4. Провести влажностный расчет типового монтажного узла примыкания оконного блока к стековому проему по методу, предложенному Корниенко С.В. [6], [29];
5. Провести экспресс-проверку типового монтажного шва узла примыкания оконного блока к стековому проему по принципу Rogers T. [31].

2 Materials and Methods / Материалы и методы

2.1 Materials / Материалы

Был рассмотрен стандартный узел крепления окна к стековому проему (рис 1а.), который был взят из руководства по монтажу окон из пвх-профилей VEKA [46], разработанных ООО "Века Рус" (г. Москва, Российская Федерация).

Kotliarskaia, I.; Vatin, N.; Ulanov A.; Korniyenko, S.

Moisture accumulation in the assembly joint of the window block abutment to the wall opening;
2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 119 Article No 11906. doi: 10.4123/CUBS.119.6

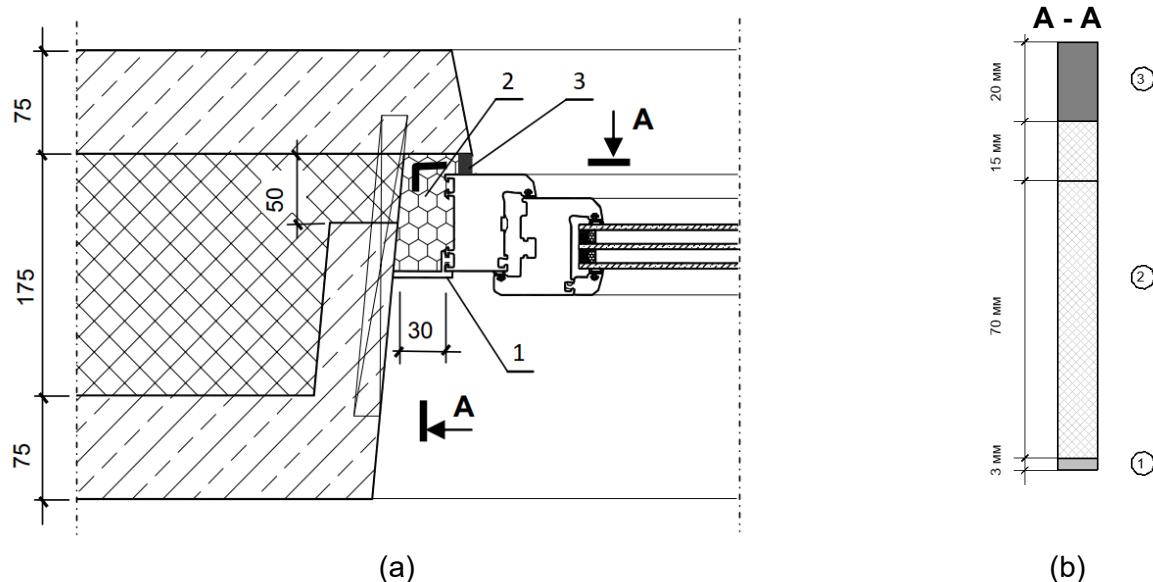


Рис.1 - Боковой узел крепления окна к стеновому проему: (а) узел, (б) развертка
Fig. 1 - Side window fastening unit to wall opening: (a) assembly, (b) development

Распределение температуры и влажности в представленной неоднородной конструкции двумерно. В виде допущения сечение А-А рассмотрено в виде “развертки”. Под разверткой понимается развернутая на плоскости поверхность геометрического тела. Данное допущение позволяет перейти от неоднородного участка конструкции к эквивалентной многослойной конструкции (рис. 1б). Таблица 1 представляет теплофизические характеристики используемых материалов.

Таблица 1. Теплотехнические характеристики материалов монтажного шва (от внутреннего слоя к внешнему)
Table 1. Thermal characteristics of assembly joint materials (from inner to outer layer)

№	Название материала	μ паропроницаемость мг/(м·ч·Па)	λ теплопроводность, условия эксплуатации Б, Вт/(м·°C)
1	Нащельник из ПВХ (Поливинилхлорид)	0.00065	0.16
2	Пена монтажная	0.05	0.05
3	Саморасширяющаяся уплотнительная лента (ПСУЛ) illbruck – ILLMOD 2D (ООО "Тремко ильбрюк", г. Климовск, Российская Федерация)	0.21	0.05

2.2 Методы / Methods

2.2.1 Исходные данные / Initial data

Объектом исследования является монтажный шов узла примыкания оконного блока к стеновому проему. Окно, для которого рассматривается монтажный узел, располагается в жилой комнате, г. Санкт-Петербург (Российская Федерация). Влажностный режим помещения нормальный. Таблица 2 описывает параметры микроклимата.

Таблица 2. Параметры микроклимата жилой комнаты
Table 2. Parameters of the microclimate of a living room

Параметр	Обозначение, ед. изм.	Значение	Источник литературы
Температура внутреннего воздуха	t_{in} , °C	20	[47,48]

Относительная влажность внутреннего воздуха	φ_{in} , %	45	[47,48]
---	--------------------	----	---------

Относительная влажность внутреннего воздуха 45% является комфортной для жилых комнат в холодный период [18], [49]. К параметрам микроклимата также относится парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха e_{in} , Па, которое будет определяться дальше.

Санкт-Петербург (Российская Федерация) относится к климату класса Dfb по классификации Кёппена [50], что соответствует влажному континентальному климату с теплым летом или boreальном с равномерным увлажнением. Работа [51] представляет оценку изменений климата в г. Санкт-Петербурге в период с 1743 по 2018 годы. Работа [6] содержит таблицы с климатическими данными г. Санкт-Петербурга. Таким образом, работы [6], [51] описывают все необходимые для дальнейших расчетов климатические данные г. Санкт-Петербурга. Также климатические данные содержатся в нормативных документах [52], [53]. Таблица 3 описывает климатические данные по месяцам для г. Санкт-Петербург.

Таблица 3. Климатические данные по месяцам для г. Санкт-Петербург
Table 3. Climate data by month for Saint Petersburg

Месяц	Среднемесячная температура, °C	Среднее давление водяного пара, гПа	Продолжительность месяца, сут	Относительная влажность наружного воздуха
Январь	-6.5	3.7	31	0.86
Февраль	-6.1	3.6	28*	0.84
Март	-1.4	4.5	31	0.78
Апрель	4.6	6.0	30	0.73
Май	11.3	8.5	31	0.66
Июнь	15.8	12.0	30	0.68
Июль	18.6	15.1	31	0.71
Август	16.9	14.4	31	0.77
Сентябрь	11.6	11.1	30	0.81
Октябрь	5.8	7.9	31	0.84
Ноябрь	0.5	5.7	30	0.87
Декабрь	-3.6	4.4	31	0.88

*В расчете не учитывается, что год может быть високосным.

На основе Таблицы 3 рассчитывается продолжительность периода влагонакопления z_0 (moisture accumulation). За период влагонакопления принимается период с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха [18]. Согласно Таблице 3 месяцами с отрицательными среднемесячными температурами наружного воздуха являются январь, февраль, март и декабрь. Продолжительность периода влагонакопления z_0 составляет 121 сут.

Для дальнейших расчетов потребуется средняя температура наружного воздуха периода влагонакопления $t_{m.accum.}$, которая составляет -4.4°C . Значение рассчитывается, как среднее арифметическое значение среднемесячных температур января, февраля, марта и декабря. Так как количество дней в месяцах разное, то среднее арифметическое из средних будет незначительно отличаться от общего среднего значения. Аналогичная погрешность возникает у среднего парциального давления водяного пара наружного воздуха периода влагонакопления $e_{m.accum.}$, составляющего 4.05 гПа (среднее арифметическое значение для января, февраля, марта и декабря).

Продолжительность зимнего периода z_1 , определяется по месяцам со средними температурами наружного воздуха ниже -5°C [18]. Для г. Санкт-Петербург такими месяцами являются январь, февраль, и, соответственно, продолжительность зимнего периода z_1 составляет 2 мес. (59 сут.). Средняя температура наружного воздуха зимнего периода t_{z1} равна -6.3°C .

К весенне-осеннему периоду относятся месяцы со средними температурами наружного воздуха от -5°C до $+5^{\circ}\text{C}$. Для г. Санкт-Петербург такими месяцами являются март, апрель,

ноябрь, декабрь и, соответственно, продолжительность весенне-осеннего периода z_2 составляет 4 мес. (122 сут.). Средняя температура наружного воздуха весенне-осеннего периода t_{z_2} равна 0.02°C .

К летнему периоду относятся месяцы со средними температурами воздуха выше $+5^{\circ}\text{C}$. Для г. Санкт-Петербург такими месяцами являются май, июнь, июль, август, сентябрь, октябрь и, соответственно, продолжительность летнего периода z_3 составляет 6 мес. (184 сут.). Средняя температура наружного воздуха летнего периода t_{z_3} равна 13.3°C .

Таблица 4 описывает дополнительные параметры наружного климата для г. Санкт-Петербург, необходимые для дальнейших расчетов.

Таблица 4. Параметры наружного климата для г. Санкт-Петербург
Table 4. Outdoor climate parameters for St. Petersburg

Параметр	Обозначение, ед. изм.	Значение
Средняя годовая температура воздуха	$t_{\text{av. an.}}, ^{\circ}\text{C}$	5.6
Среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха за годовой период	$e_{\text{out}}, \text{гПа}$	8.1

Таблица 5 приводит граничные условия теплообмена поверхностей ограждающей конструкции с окружающей средой.

Таблица 5. Граничные условия теплообмена
Table 5. Boundary conditions of heat exchange

Параметр	Обозначение, ед. изм.	Значение
Коэффициент теплообмена внутренней поверхности ограждающей конструкции	$\alpha_{\text{in}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$	8.7
Коэффициент теплообмена наружной поверхности ограждающей конструкции	$\alpha_{\text{out}}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$	23

2.2.2 Определение плоскости максимального увлажнения в типовом монтажном шве / Determination of the maximum wetting plane in a typical assembly seam

Задача от переувлажнения ограждающих конструкций обеспечивается путем проектирования ограждающих конструкций с сопротивлением паропроницанию (vapor permeability resistance) внутренних слоев не менее требуемого значения. Работа [54] подробно описывает метод определения плоскости максимального увлажнения для фасадной конструкции с теплоизоляционной композиционной системой, по аналогии ниже рассчитывается типовой монтажный узел.

Проектирование ограждающей конструкции с учетом защиты от переувлажнения заключается в обеспечении сопротивления паропроницанию $R_{v.p.}^0$ в пределах от внутренней поверхности до плоскости максимального увлажнения не менее наибольшего из следующих требуемых сопротивлений паропроницанию:

- требуемого сопротивления паропроницанию $R_{n1}^{\text{req}}, (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$ (условие недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации);
- требуемого сопротивления паропроницанию $R_{n2}^{\text{req}}, (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$ (условие ограничения влаги в ограждающей конструкции за период с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха).

Формула (1) определяет требуемое сопротивление паропроницанию R_{n1}^{req} :

$$R_{n1}^{\text{req}} = \frac{(e_{\text{in}} - E) \cdot R_{v.p.}}{E - e_{\text{out}}}, \quad (1)$$

где e_{in} это парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха; E это парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости максимального увлажнения за годовой период эксплуатации; $R_{v.p.}$ обозначает сопротивление паропроницанию, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$, части ограждающей конструкции, расположенной между наружной поверхностью ограждающей конструкции и

плоскостью максимального увлажнения; e_{out} это среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха за годовой период.

Формула (2) определяет требуемое сопротивление паропроницанию R_{n2}^{req} :

$$R_{n2}^{req} = \frac{0.0024 \cdot z_0 \cdot (e_{in} - E_0)}{\rho_w \cdot \delta_w \cdot \Delta w + \eta}, \quad (2)$$

где z_0 это продолжительность периода влагонакопления; e_{in} это парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха; E_0 это парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости максимального увлажнения; ρ_w означает плотность материала увлажняемого слоя; δ_w означает толщину увлажняемого слоя ограждающей конструкции, принимаемую равной 2/3 толщины однородной (однослойной) стены или толщине слоя многослойной ограждающей конструкции, в котором располагается плоскость максимального увлажнения; Δw означает предельно допустимое приращение влажности в материале увлажняемого слоя, % по массе, за период влагонакопления z_0 , принимаемое из [18]; η это безразмерный коэффициент. В случае, когда плоскость максимального увлажнения приходится на стык между двумя слоями $\rho_w \cdot \delta_w \cdot \Delta w$ в формуле (2) принимают равным сумме соответствующих произведений, в качестве δ_w принимаются половины толщин стыкующихся слоев.

Формула (3) определяет парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха e_{in} при расчетных температуре и относительной влажности воздуха в помещении:

$$e_{in} = (\varphi_{in} / 100) \cdot E_{in}, \quad (3)$$

где E_{in} обозначает парциальное давление насыщенного водяного пара; φ_{in} это относительная влажность внутреннего воздуха. E_{in} определяется в соответствии с формулой (4):

$$E_{in} = 1.84 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(-\frac{5330}{273 + t_{in}}\right), \quad (4)$$

где t_{in} это температура внутреннего воздуха.

Формула (5) определяет сопротивление паропроницанию $R_{v.p.}$ части ограждающей конструкции, расположенной между наружной поверхностью ограждающей конструкции и плоскостью максимального увлажнения, состоящей из нескольких слоев:

$$R_{v.p.} = \sum R_{ni}, \quad (5)$$

где R_{ni} это сопротивление паропроницанию i -го слоя ограждающей конструкции. R_{ni} определяется по формуле (6):

$$R_{ni} = \frac{\delta_i}{\mu_i}. \quad (6)$$

В формуле (6) δ_i это толщина слоя ограждающей конструкции; μ_i это расчетная паропроницаемость материала слоя ограждающей конструкции, мг/(м·ч·Па).

Для определения $R_{v.p.}$ необходимо точное понимание, в каком слое находится плоскость максимального увлажнения. Плоскость максимального увлажнения определяется для периода влагонакопления z_0 [18]. Для каждого слоя многослойной ограждающей конструкции вычисляется значение комплекса $f(t_{m.w.})$ по формуле (7), полученной Козловым В.В. [14]. Формула (7) характеризует температуру в плоскости максимального увлажнения (maximum wetting temperature):

$$f(t_{m.w.}) = 5330 \cdot \frac{R_{v.p.}^{gen} \cdot (t_{in} - t_{m.accum.})}{R_0^{conv} \cdot (e_{in} - e_{m.accum.})} \cdot \frac{\mu_i}{\lambda_i}, \quad (7)$$

где $t_{m.w.}$ это температура в плоскости максимального увлажнения; t_{in} это температура внутреннего воздуха; $t_{m.accum.}$ это средняя температура наружного воздуха для периода с отрицательными среднемесечными температурами; $R_{v.p.}^{gen}$ это общее сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции; R_0^{conv} это условное сопротивление теплопередаче однородной

многослойной ограждающей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$; e_{in} парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха; $e_{m.accum}$ это среднее парциальное давления водяного пара наружного воздуха периода влагонакопления; μ_i это расчетная паропроницаемость материала слоя ограждающей конструкции, $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$; λ_i это расчетная теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Формула (8) с учетом (9) определяет условное сопротивление теплопередаче однородной многослойной ограждающей конструкции R_0^{conv} :

$$R_0^{conv} = \frac{1}{\alpha_{in}} + \sum_i R_i + \frac{1}{\alpha_{out}}, \quad (8)$$

где α_{in} означает коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, α_{out} означает коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. R_i означает термическое сопротивление слоя однородной части фрагмента, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$, для материальных слоев по формуле (9):

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i}, \quad (9)$$

где δ_i это толщина слоя; λ_i это теплопроводность материала слоя, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

На основании данных [18] определяются значения температур в плоскости максимального увлажнения $t_{m.w.}$ по вычисленным значениям комплекса $f_i(t_{m.w.})$ для каждого слоя многослойной конструкции. Формула (10) определяет температуры t_x на границах слоя:

$$t_x = t_{in} - \frac{t_{in} - t_{m.accum}}{R_0^{conv}} \cdot R_x, \quad (10)$$

в которой R_x означает сопротивление теплопередаче части многослойной ограждающей конструкции от внутренней поверхности до плоскости, отстоящей от внутренней поверхности на расстоянии x , $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$; t_{in} это температура внутреннего воздуха; $t_{m.accum}$ это средняя температура наружного воздуха для периода с отрицательными среднемесячными температурами; R_0^{conv} это условное сопротивление теплопередаче однородной многослойной ограждающей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$.

Формула (11) определяет сопротивление теплопередаче R_x части многослойной ограждающей конструкции от внутренней поверхности до плоскости, отстоящей от внутренней поверхности на расстоянии x :

$$R_x = \frac{1}{\alpha_{in}} + \sum_{\substack{\text{before} \\ \text{section} \\ x}} \frac{\delta_i}{\lambda_i}. \quad (11)$$

В формуле (11) α_{in} это коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающей конструкции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; δ_i это толщина слоя; λ_i это теплопроводность материала слоя, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

Документ [18] сообщает, что одновременное выполнение условий (12)-(14) для многослойных ограждающих конструкций означает, что плоскость максимального увлажнения располагается на наружной границе утеплителя:

$$\frac{\delta_{ins}}{\lambda_{ins}} > \frac{2}{3} R_0^{conv}, \quad (12)$$

$$\mu_{\text{outer layer}} < \mu_{ins}, \quad (13)$$

$$\frac{\mu_{ins}}{\lambda_{ins}} > 2, \quad (14)$$

где за δ_{ins} , λ_{ins} , μ_{ins} принимается толщина, расчетная теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, и паропроницаемость, $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$, материала теплоизоляционного слоя; $\mu_{\text{outer layer}}$ это паропроницаемость, $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$, наружного защитного слоя.

Формула (15) определяет парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости максимального увлажнения за годовой период эксплуатации E :

$$E = (E_1 z_1 + E_2 z_2 + E_3 z_3) / 12, \quad (15)$$

где E_1, E_2, E_3 это парциальные давления насыщенного водяного пара в плоскости максимального увлажнения, соответственно зимнего, весенне-осеннего и летнего периодов, определяемые по (4), по температуре в плоскости максимального увлажнения (определяется согласно (10)), при средней температуре наружного воздуха соответствующего периода; z_1, z_2, z_3 это продолжительность зимнего, весенне-осеннего и летнего периодов года.

Формула (16) определяет коэффициент η :

$$\eta = \frac{0.0024 \cdot (E_0 - e_{m.accum}) \cdot z_0}{R_{v.p.}}, \quad (16)$$

где E_0 это парциальное давление насыщенного водяного пара в плоскости максимального увлажнения; $e_{m.accum}$ это среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха периода месяцев с отрицательными среднемесячными температурами; z_0 это продолжительность периода влагонакопления; $R_{v.p.}$ это сопротивление паропроницанию, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$.

Работа [17] также приводит пример нахождения плоскости максимального увлажнения упрощенным методом с использованием классификации слоев. Работы [17,19] считают слой проницаемым, если выполняется условие (17):

$$\frac{\mu_i}{\lambda_i} \geq 1, \quad (17)$$

где μ_i это расчетная паропроницаемость материала слоя ограждающей конструкции, $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$; λ_i это расчетная теплопроводность материала слоя ограждающей конструкции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$. Если условие (17) не выполняется, то слой считается плотным.

Ограждающие конструкции по количеству и взаимному расположению слоев (паропроницаемые, плотные) делятся на пять классов [17]:

1. однослоиная;
2. двухслойная с плотным слоем со стороны помещения (наружное утепление);
3. двухслойная с проницаемым слоем со стороны помещения (внутреннее утепление);
4. трехслойная с проницаемым слоем в середине;
5. трехслойная с плотным слоем в середине.

Если отношение паропроницаемости к расчетной теплопроводности между всеми слоями конструкции не превышает 30 %, то статья [17] и нормативный документ [19] считают ее однослоиной. Для каждой конструкции определяется место расположения плоскости максимального увлажнения согласно приведенным примерам в работе [17]. Температура в плоскости максимального увлажнения $t_{m.w.}$ определяется, основываясь на климатическом факторе (18) и конструкционном факторе (19). Формула для нахождения климатического фактора (18) имеет вид:

$$\text{Climate factor} = \frac{t_{in} - t_{m.accum}}{e_{in} - e_{m.accum}}, \quad (18)$$

где t_{in} это температура внутреннего воздуха; $t_{m.accum}$ это средняя температура наружного воздуха периода влагонакопления; e_{in} это расчетное парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха помещений здания; $e_{m.accum}$ это среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха периода влагонакопления. Формула для нахождения конструкционного фактора имеет вид (19):

$$\text{Structural factor} = \frac{R_{v.p.}^{gen}}{R_0^{conv}} \cdot \frac{\mu_i}{\lambda_i}, \quad (19)$$

где $R_{v.p.}^{gen}$ это общее сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$; R_0^{conv} это условное сопротивление теплопередаче однородной многослойной ограждающей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$; μ_i это расчетная паропроницаемость материала слоя ограждающей конструкции, в котором располагается плоскость максимального увлажнения, $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$; λ_i это

расчетная теплопроводность материала слоя ограждающей конструкции, в котором располагается плоскость максимального увлажнения, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$. Формула (20) находит координату x плоскости максимального увлажнения, отсчитываемую от наружной границы слоя:

$$x = \left(R_0^{\text{conv}} \cdot \frac{t_{m.w.} - t_{out}}{t_{in} - t_{out}} - R_0^x \right) \cdot \lambda_i, \quad (20)$$

где R_0^{conv} это условное сопротивление теплопередаче однородной многослойной ограждающей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$; $t_{m.w.}$ это найденная температура плоскости максимального увлажнения; t_{out} это температура наружного воздуха, принимаемая равной $t_{m.accum}$; t_{in} это температура внутреннего воздуха; λ_i это расчетный коэффициент теплопроводности слоя, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$, материала соответствующего слоя; R_0^x это термическое сопротивление от наружного воздуха до наружной границы рассматриваемого слоя, $(\text{м}^2 \cdot \text{°C})/\text{Вт}$. Если формула (20) дает отрицательную координату, то это означает, что плоскость максимального увлажнения расположена на наружной границе слоя.

2.2.3 Расчет влажностного режима типового монтажного шва графоаналитическим методом / Calculation of the humidity regime of a typical assembly joint using the graphic-analytical method

Графоаналитический метод был впервые предложен Фокиным К.Ф. [9]. Уравнение (21) характеризует условие конденсации влаги в ограждающей конструкции:

$$e \geq E, \quad (21)$$

где, за e принимается парциальное давление водяного пара в порах материалов, а за E принимается парциальное давление насыщенного водяного пара.

Метод заключается в построении распределений по сечению изучаемой конструкции: давления насыщенного водяного пара E_x , парциального давления водяного пара e_x на основе температур t_x на границах слоев шва. Пересечение распределений e и E указывает на конденсацию водяного пара и местоположение плоскости конденсации на сечении ограждения.

Формула (10) определяет температуры t_x . Формула для нахождения парциального давления водяного пара e_x имеет вид (22):

$$e_x = e_{in} - \frac{e_{in} - e_{out}}{R_{v.p.}^{\text{gen}}} \cdot R_{nx}, \quad (22)$$

где $R_{v.p.}^{\text{gen}}$ является общим сопротивлением паропроницанию всей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$; R_{nx} это сопротивление паропроницанию слоя от внутренней поверхности монтажного шва до сечения x , $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$; e_{in} это парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха; e_{out} это среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха за наиболее холодный месяц в году (январь), Па. Давление насыщения водяного пара по расчетным сечениям E_x определяется по формуле (4). За t_{out} и e_{out} принимаются соответственно средняя температура и среднее парциальное давление самого холодного месяца в году (январь).

Работа [55] представляет пример расчета ограждающей стены с помощью метода Фокина, изложенного в другой интерпретации, где также строятся кривые распределения e и E , отличительной чертой является то, что по оси абсцисс откладываются в масштабе сопротивления паропроницанию материальных слоев. Распределение e будет представлять прямую линию от e_{out} до e_{in} , а распределение E будет выглядеть как линия с изломами на границах материальных слоев. Работа [55] строит распределения e и E при трех температурах наружного воздуха t_{out} (среднегодовая, среднемесячная за самый холодный месяц и за самый холодный месяц с учетом максимальной суточной амплитуды). Построение при трех температурах способствует определению сечения, в котором e и E окажутся в непосредственной близости или равны. Пересечение e и E указывает на расположение плоскости максимального увлажнения. При наличии плоскости максимального увлажнения графически определяется температура начала конденсации $t_{condens}$. По величине $t_{condens}$ определяется продолжительность периода влагонакопления z_0 .

2.2.4 Расчет влажностного режима типового монтажного шва приближенным аналитическим методом определения положения плоскости возможной конденсации / Calculation of the humidity regime of a typical assembly joint using an approximate analytical method for determining the position of the plane of possible condensation

Работа [45] представила подробный пример расчета влажностного режима с использованием приближенного аналитического метода определения положения плоскости возможной конденсации. Документ [45] также находит сопротивление паропроницанию монтажного шва и сравнивает найденное значение с требуемым. К исследуемому монтажному шву применяется аналогичный метод. Формула (23) вычисляется комплекс $F(t_{k_i})$, необходимый для последующего определения сопротивления паропроницанию:

$$F(t_{k_i}) = 4049 \cdot \frac{R_{v.p.}^{gen} \cdot (t_{in} - t_{out})}{R_0^{conv} \cdot (e_{in} - e_{out})} \cdot \frac{\mu_i}{\lambda_i}, \quad (23)$$

где t_{k_i} это температура в плоскости максимальной конденсации; t_{in} это температура внутреннего воздуха; t_{out} это температура наружного воздуха, принимаемая равной средней температуре наиболее холодного месяца; $R_{v.p.}^{gen}$ это общее сопротивление паропроницанию ограждающей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$; R_0^{conv} это условное сопротивление теплопередаче однородной многослойной ограждающей конструкции, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$; e_{out} это среднее парциальное давление водяного пара наружного воздуха за годовой период; e_{in} это парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха; μ_i это расчетная паропроницаемость материала слоя ограждающей конструкции, $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$; λ_i это расчетная теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Статья [45] называет $F(t_{k_i})$ вспомогательной функцией для решения алгебраического трансцендентного уравнения относительно температуры в плоскости возможной конденсации. Формула (23) по составляющим компонентам похожа на формулу (7), различие в том, что в качестве t_{out} и e_{out} используются средние арифметические значения температуры и парциального давления наружного воздуха месяцев с отрицательными среднемесячными температурами. Температуры t_{k_i} находятся в соответствие с таблицей из документа [21]. По найденным температурам t_{k_i} определяется координата расположения плоскости возможной конденсации по формуле (20) от внутренней границы.

2.2.5 Оценка влагонакопления в типовом монтажном шве в годовом цикле эксплуатации / Evaluation of moisture accumulation in a typical assembly joint during the annual operating cycle

Документ [56] описывает зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры (в интервале температур от -20°C до $+40^\circ\text{C}$) системой уравнений (24):

$$E = \begin{cases} 610.5 \cdot e^{\frac{17.269 \cdot t_x}{237.3 + t_x}} & \text{при } t \geq 0^\circ\text{C}, \\ 610.5 \cdot e^{\frac{21.875 \cdot t_x}{265.5 + t_x}} & \text{при } t < 0^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (24)$$

Документ [57] определяет температуру внутреннего воздуха t_{in} и относительную влажность внутреннего воздуха φ_{in} для жилых и общественных зданий в зависимости от температуры наружного воздуха t_{out} . Система для нахождения t_{in} имеет вид (25):

$$t_{in} = \begin{cases} 20 & -20 \leq t_{out} \leq 10 \\ 15 + 0.5 \cdot t_{out}, & 10 < t_{out} \leq 20 \\ 25 & 20 < t_{out} \leq 30 \end{cases}, \quad (25)$$

где t_{out} это температура наружного воздуха. Система для нахождения φ_{in} имеет вид (26):

$$\varphi_{in} = \begin{cases} 0.30 & -20 \leq t_{out} \leq 10 \\ 0.4 + 0.01 \cdot t_{out}, & 10 < t_{out} \leq 20 \\ 0.6 & 20 < t_{out} \leq 30 \end{cases}, \quad (26)$$

где t_{out} это температура наружного воздуха. В соответствии с [56] сопротивление влагообмену у внутренней и наружной поверхностей ограждений принимается равным нулю. Условие конденсации влаги в ограждающей конструкции имеет вид (21). Плоскость конденсации влаги в наиболее холодный месяц года для монтажного шва определяется путем построения профилей $e(x)$ и $E(x)$ с учетом условия (21). Профиль $E(x)$ строится по профилю температуры (формула (10)). Профиль парциального давления водяного пара $e(x)$ по сечению ограждающей конструкции производится по формуле (22). При найденной плоскости конденсации оценивается влагонакопление за год. Рис.2 представляет схему потоков влаги в плоскости конденсации для определения приращения влаги в конструкции за месяц при наличии одной плоскости конденсации.

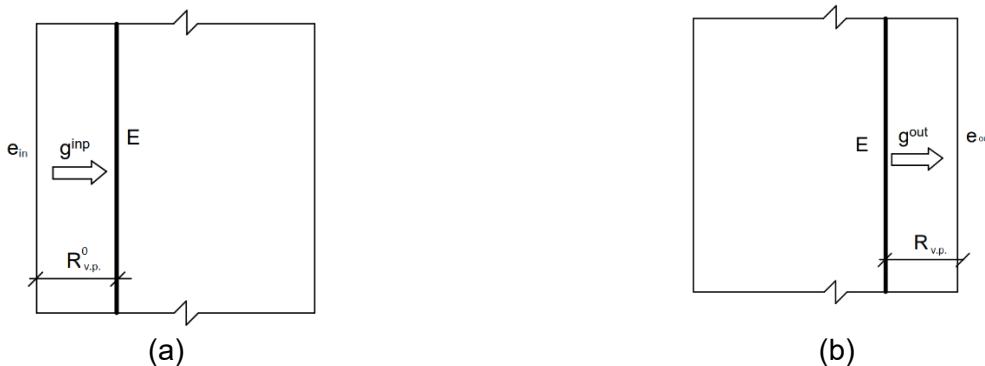


Рис.2 - Схема потоков влаги в плоскости конденсации для определения приращения влаги в конструкции за месяц при наличии одной плоскости конденсации (а) поток, приходящий к плоскости конденсации (б) поток, выходящий из плоскости конденсации

Fig. 2 - Moisture flow diagram in the condensation plane for determining the moisture increment in a structure per month in the presence of one condensation plane (a) flow arriving at the condensation plane (b) flow leaving the condensation plane

Формула (27) определяет плотность потока парообразной влаги через ограждающую конструкцию g , мг/(м²·ч):

$$g = \frac{e_{in} - e_{out}}{R_{v.p.}}, \quad (27)$$

где e_{in} это среднемесячное парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, определяемое по формуле (3) с использованием (24) и (26); e_{out} это парциальное давление водяного пара наружного воздуха, Па; $R_{v.p.}$ это сопротивление паропроницанию в границах от плоскости конденсации до внутренней поверхности конструкции, (м²·ч·Па)/мг. Формула (28) определяет плотность потока влаги g^{inp} , мг/(м²·ч), приходящей к плоскости конденсации:

$$g^{inp} = \frac{e_{in} - E_i}{R_{v.p.}^0}, \quad (28)$$

где e_{in} это среднемесячное парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха, определяемое по формуле (3) с использованием (24) и (26); E_i это давление насыщенного водяного пара в плоскости конденсации, Па; $R_{v.p.}^0$ это сопротивление паропроницанию в границах от внутреннего воздуха до плоскости конденсации, (м²·ч·Па)/мг. Формула (29) определяет плотность потока влаги g^{out} , выходящего из плоскости конденсации:

$$g^{out} = \frac{E_i - e_{out}}{R_{v.p.}}, \quad (29)$$

где E_i это давление насыщенного водяного пара в плоскости конденсации; e_{out} это парциальное давление водяного пара наружного воздуха; $R_{v.p.}$ это сопротивление паропроницанию в границах от плоскости конденсации до внешней границы конструкции, $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$. В формулах (28) и (29) e_{out} рассчитывается по формуле (30):

$$e_{out} = \varphi_{out} \cdot E(t_{out}). \quad (30)$$

Приращение влаги Δg , $\text{кг}/\text{м}^2$, в плоскости конденсации в текущем месяце определяется по разности плотностей потока влаги, входящего в эту плоскость, и выходящего из нее (31):

$$\Delta g = 24 \cdot 10^{-6} \cdot (g^{inp} - g^{out}) \cdot z_m, \quad (31)$$

где z_m это количество суток в месяце. При $\Delta g > 0$ в плоскости конденсации происходит накопление влаги, при $\Delta g < 0$ происходит сушка.

Формула (32) характеризует количество влаги G , $\text{кг}/\text{м}^2$, накопленной в монтажном шве в плоскости конденсаций с начала расчета:

$$G = G^* + \Delta g, \quad (32)$$

где G^* это количество влаги, накопленной в плоскости конденсации за предыдущие месяцы с начала расчета. Если значение G для какого-либо месяца года окажется меньше нуля, то для этого месяца принимается $G = 0$. На начало расчета количество влаги принимается равным нулю.

2.2.6 Экспресс проверка исследуемого монтажного шва по принципу Роджерса / Express testing of the examined assembly seam according to the Rogers principle

Сформулированный принцип для экспресс проверки влажностного состояния ограждающих конструкций Rogers T. описал выражением (33):

$$G'_1 < G'_2 < G'_3 \dots < G'_n, \text{ причем } G'_n > 5 \cdot G'_1, \quad (33)$$

где G' это паропроницаемость слоя. Формула (34) определяет паропроницаемость G' :

$$G' = \frac{\mu}{\delta}. \quad (34)$$

В выражении (33) G'_1 это паропроницаемость внутреннего слоя, а за G'_n принимается паропроницаемость наружного слоя.

3 Результаты / Results

3.1 Определение плоскости максимального увлажнения в типовом монтажном шве / Determination of the plane of maximum wetting in a typical assembly seam

Парциальное давление водяного пара внутреннего воздуха e_{in} рассчитано по формуле (3) с учетом формулы (4).

$$e_{in} = \left(\frac{45\%}{100\%} \right) \cdot 1.84 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(-\frac{5330}{273 + 20}\right) = 1042 \text{ Па}$$

Для проверки выражения (12) рассчитано R_0^{conv} по формуле (8):

$$R_0^{conv} = \frac{1}{8.7} + \frac{0.003}{0.16} \cdot 1 + \frac{0.085}{0.05} \cdot 1 + \frac{0.02}{0.05} \cdot 1 + \frac{1}{23} = 2.28 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}$$

Проверка условий (12)-(14):

$$\begin{aligned} \frac{2}{3} R_0^{conv} &= 1.52 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}, \\ \frac{\delta_{ins}}{\lambda_{ins}} &= \frac{\delta_2}{\lambda_2} = 1.7 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}, \\ 0.21 \text{ мг} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}) &> 0.05 \text{ мг} / (\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}), \\ \frac{\mu_{ins}}{\lambda_{ins}} &= \frac{\mu_2}{\lambda_2} = \frac{0.05}{0.05} = 1. \end{aligned}$$

Условие (12) выполняется, а условия (13), (14) нет.

Общее сопротивление паропроницанию всей конструкции $R_{v.p.}^{gen}$ рассчитано по формуле (6):

$$R_{v.p.}^{gen} = \frac{0.003}{0.00065} + \frac{0.085}{0.05} + \frac{0.02}{0.21} = 6.42 \frac{m^2 \cdot \text{Pa}}{mg}.$$

Расчет (7) проведен для каждого слоя многослойной конструкции шва и по таблице из [14], определены значения $t_{m.w.}$ для каждого слоя. Вычислены также температуры на границах слоя, полученные расчетом (10) и сформирована таблица для определения плоскости максимального увлажнения (Таблица 6).

Таблица.6 Определение плоскости максимального увлажнения
Table.6 Determination of the plane of maximum moisture

№	Слой	$f_i(t_{m.w.})$	$t_{m.w.}$	t_x
	+			
1	Нащельник из ПВХ	$f_i(t_{m.w.}) = 5330 \cdot \left[\frac{6.42 \cdot (20 + 4.4)}{2.28 \cdot (1042 - 405)} \right] \cdot \frac{0.00065}{0.16} = 2.33$	>27 Нет данных [18]	$t_1 = 20 - \frac{(20 + 4.4)}{2.28} \cdot \frac{1}{8.7} = 18.8^\circ C$ $t_{1,2} = 20 - \left[\frac{(20 + 4.4)}{2.28} \cdot \left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.003}{0.16} \right) \right] = 18.6^\circ C$
2	Пена монтажная	$f_i(t_{m.w.}) = 5330 \cdot \left[\frac{6.42 \cdot (20 + 4.4)}{2.28 \cdot (1042 - 405)} \right] \cdot \frac{0.05}{0.05} = 468.12$	-19.5	$t_{2,3} = 20 - \left[\frac{(20 + 4.4)}{2.28} \cdot \left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.003}{0.16} + \frac{0.085}{0.05} \right) \right] = 4^\circ C$
3	Саморасширяющаяся уплотнительная лента (ПСУЛ) illbruck – ILLMOD 2D	$f_i(t_{m.w.}) = 5330 \cdot \left[\frac{6.42 \cdot (20 + 4.4)}{2.28 \cdot (1042 - 405)} \right] \cdot \frac{0.21}{0.05} = 2414.5$	-39.5	$t_3 = 20 - \left[\frac{(20 + 4.4)}{2.28} \cdot \left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.003}{0.16} + \frac{0.085}{0.05} + \frac{0.02}{0.05} + \frac{1}{23} \right) \right] = -4.4^\circ C$
	-			

Расчёты по формулам (7) и (10) не привели к нахождению плоскости максимального увлажнения для исследуемого примера. Таблица в [18] имеет ограничения по $f(t_{m.w.})$. Иные условия по нахождению плоскости максимального увлажнения (выполнение условий (12) - (14)) также не привели к результату.

Проверка для каждого слоя условия (17):

$$\frac{\mu_1}{\lambda_1} = \frac{0.00065}{0.16} = 0.004 < 1 \text{ слой из ПВХ-нащельника является плотным;}$$

$$\frac{\mu_2}{\lambda_2} = \frac{0.05}{0.05} = 1 \geq 1 \text{ слой из пены монтажной проницаем;}$$

$$\frac{\mu_3}{\lambda_3} = \frac{0.21}{0.05} = 4.2 \geq 1 \text{ слой из ПСУЛ illbruck – ILLMOD 2D проницаем.}$$

Таким образом, исследуемый монтажный шов состоит из плотного внутреннего слоя и проницаемого наружного слоя. Работа [17] при таком расположении слоев говорит о нахождении плоскости максимального увлажнения в наружной половине проницаемого слоя, т.е. плоскость максимального увлажнения может располагаться, как в слое из illbruck – ILLMOD, так и в слое из монтажной ваты.

Климатический фактор (18) в обоих случаях одинаков:

$$\text{Climate factor} = \frac{20 + 4.4}{1042 - 405} = 0.038$$

Конструкционный фактор (19) для ПСУЛ и для монтажной пены:

$$\text{Structural factor}_{\text{mounting foam}} = \frac{6.42}{2.28} \cdot \frac{0.21}{0.05} = 11.82$$

$$\text{Structural factor}_{\text{illbruck}} = \frac{6.42}{2.28} \cdot \frac{0.05}{0.05} = 2.81$$

По найденным климатическому и конструкционным факторам определяется $t_{m.w.}$. Для слоя illbruck по найденным климатическим и конструкционным факторам найти $t_{m.w.}$ невозможно. Для монтажной пены $t_{m.w.} = -20.7^\circ C$. Координата x плоскости максимального увлажнения согласно формуле (20):

$$x = \left(2.28 \cdot \frac{(-20.7 + 4.4)}{20 + 4.4} - \left[\frac{1}{23} + \frac{0.02}{0.05} + \frac{0.325}{0.05} \right] \right) \cdot 0.05 < 0$$

Координата x имеет отрицательное значение, соответственно, плоскость максимального увлажнения расположена на наружной границе слоя. Плоскость максимального увлажнения совпадает с наружной границей исследуемого монтажного шва. Таким образом, значение $R_{v.p.}$, зависящее от толщины ограждающей конструкции, расположенной между наружной поверхностью ограждающей конструкции и плоскостью максимального увлажнения, равно 0. Требуемое сопротивление паропроницанию R_{n1}^{req} , $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$, из условия недопустимости накопления влаги в ограждающей конструкции за годовой период эксплуатации), определяемое по формуле (1), также равно 0. Требуемое сопротивление паропроницанию R_{n2}^{req} , $(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})/\text{мг}$, из условия ограничения влаги в ограждающей конструкции за период с отрицательными средними месячными температурами наружного воздуха, определяемое по формуле (2), в данном случае можно математически интерпретировать как предел, который стремится к нулю. Физически стремящийся к нулю предел означает, что влагонакопление в ограждающей конструкции за указанный период отсутствует. Следовательно, влагозащитные свойства рассматриваемой конструкции обеспечены.

3.2 Расчет влажностного режима типового монтажного шва графоаналитическим методом / Calculation of the humidity regime of a typical assembly joint using the graphic-analytical method

Сопротивления паропроницанию каждого из слоев найдены по формуле (5):

$$R_1 = \frac{0.003}{0.00065} = 4.61 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг},$$

$$R_2 = \frac{0.085}{0.05} = 1.7 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг},$$

$$R_3 = \frac{0.02}{0.21} = 0.095 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{мг}.$$

Температуры t_x определены при $t_{out} = t_{\text{average Jan}} = -6.5^\circ C$ по формуле (10) для каждого слоя:

$$t_1 = 20 - \left[\frac{(20 + 6.5)}{2.28} \cdot \frac{1}{8.7} \right] = 18.7^\circ C,$$

$$t_{1,2} = 20 - \left[\frac{(20 + 6.5)}{2.28} \cdot \left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.003}{0.16} \right) \right] = 18.4^\circ C,$$

$$t_{2,3} = 20 - \left[\frac{(20 + 6.5)}{2.28} \cdot \left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.003}{0.16} + \frac{0.085}{0.05} \right) \right] = -1.3^\circ C,$$

$$t_3 = 20 - \left[\frac{(20 + 6.5)}{2.28} \cdot \left(\frac{1}{8.7} + \frac{0.003}{0.16} + \frac{0.085}{0.05} + \frac{0.02}{0.05} + \frac{1}{23} \right) \right] = -6.5^\circ C.$$

Парциальные давления водяного пара e_x , соответствующие найденным температурам t_x равны (22):

$$e_1 = 1042 - \frac{(1042 - 370)}{6.42} \cdot 0 = 1042 \text{ Pa} ,$$

$$e_{1,2} = 1042 - \frac{(1042 - 370)}{6.42} \cdot 4.61 = 559 \text{ Pa} ,$$

$$e_{2,3} = 1042 - \frac{(1042 - 370)}{6.42} \cdot (4.61 + 1.7) = 486 \text{ Pa} ,$$

$$e_3 = 1042 - \frac{1042 - 370}{6.42} \cdot 6.42 = 370 \text{ Pa} .$$

Давления насыщенного пара E_x найдены по формуле (4) для каждого слоя:

$$E_1 = 1.84 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(-\frac{5330}{273 + 18.7}\right) = 2154 \text{ Pa} ,$$

$$E_{1,2} = 1.84 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(-\frac{5330}{273 + 18.4}\right) = 2114 \text{ Pa} ,$$

$$E_{2,3} = 1.84 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(-\frac{5330}{273 - 1.3}\right) = 562 \text{ Pa} ,$$

$$E_3 = 1.84 \cdot 10^{11} \cdot \exp\left(-\frac{5330}{273 - 6.5}\right) = 383 \text{ Pa} .$$

Полученные значения температур и давлений водяного пара перенесены на сечение ограждения (рис. 3).

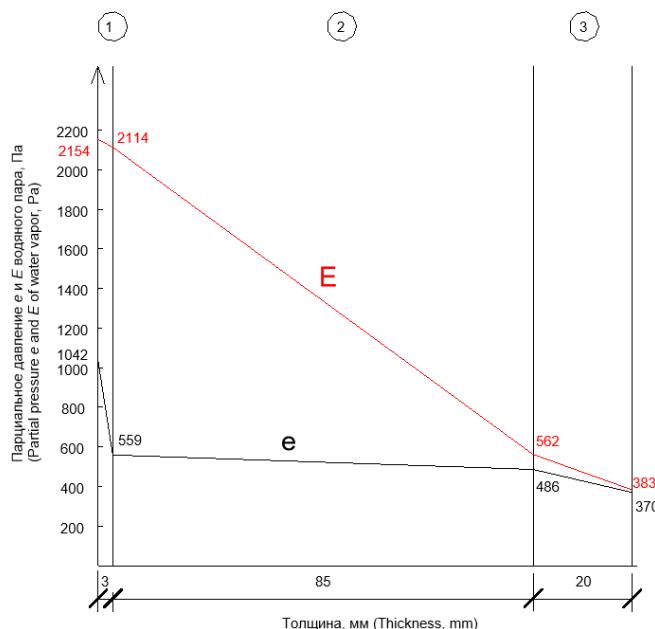


Рис.3 - Профили давления насыщенного пара $E(x)$ и парциального давления $e(x)$ (Январь)
 Fig. 3 - Saturated vapor pressure profiles $E(x)$ and partial pressure $e(x)$ (January)

Из Рис.3 видно, что E и e не пересекаются, следовательно, при температуре наружного воздуха $t_{out} = -6.5^\circ C$ и выше конденсации водяного пара в ограждении не происходит.

3.3 Расчет влажностного режима типового монтажного шва приближенным аналитическим методом определения положения плоскости возможной конденсации / Calculation of the humidity regime of a typical assembly joint using an approximate analytical method for determining the position of the plane of possible condensation

Комплекс $F(t_{k_i})$ рассчитывается для каждого слоя конструкции с применением найденных ранее $R_{v,p}^{gen}$ и R_0^{conv} . Для слоя из нащельника из ПВХ:

$$F(t_1) = 4049 \cdot \frac{6.42 \cdot (20 + 6.5)}{2.28 \cdot (1042 - 370)} \cdot \frac{0.00065}{0.16} = 1.82$$

В [21] отсутствуют данные по нахождению t_{k_1} через $F(t_1) = 1.82$.

Для слоя из монтажной пены:

$$F(t_2) = 4049 \cdot \frac{6.42 \cdot (20 + 6.5)}{2.28 \cdot (1042 - 370)} \cdot \frac{0.05}{0.05} = 449.6$$

$$t_2 = -19.5^{\circ}C$$

Для слоя из ПСУЛ illbruck – ILLMOD 2D:

$$F(t_3) = 4049 \cdot \frac{6.42 \cdot (20 + 6.5)}{2.28 \cdot (1042 - 370)} \cdot \frac{0.21}{0.05} = 1888.3$$

В Таблице 22 [21] также отсутствуют данные по нахождению t_{k_1} через $F(t_3) = 1888.3$.

Определение координаты плоскости возможной конденсации:

$$x_2 = 0.05 \cdot \left(\frac{20 + 19.5}{20 + 6.5} \cdot 2.28 - \frac{1}{8.7} - 4.61 \right) = -0.07 \text{ м}$$

Плоскость возможной конденсации находится за пределами 2-го слоя. Так как табличные данные нормативного документа [21] ограничены по значениям комплекса $F(t_{k_1})$, то достоверно узнать, где располагается плоскость возможной конденсации (третий слой из ПСУЛ или за внешней границей монтажного шва) не возможно.

3.4 Оценка влагонакопления в типовом монтажном шве в годовом цикле эксплуатации / Evaluation of moisture accumulation in a typical assembly joint during the annual operating cycle

Параметры микроклимата в помещении для каждого месяца (температура t_{in} и относительная влажность внутреннего воздуха φ_{in}), рассчитанные по формулам (25) и (26), представлены в Таблице 7.

Таблица 7. Параметры микроклимата в помещении для расчета влажностного режима
Table 8. Indoor microclimate parameters for calculating humidity conditions

Месяц	t_{in} , °C	φ_{in}
Январь	20	0.3
Февраль	20	0.3
Март	20	0.3
Апрель	20	0.3
Май	20.45	0.509
Июнь	22.85	0.557
Июль	24.15	0.583
Август	23.35	0.567
Сентябрь	20.7	0.514
Октябрь	20	0.3
Ноябрь	20	0.3
Декабрь	20	0.3

Плоскость конденсации влаги в наиболее холодный месяц года для монтажного шва определяется путем построения профилей $e(x)$ и $E(x)$. Температуры на границах слоев посчитаны в п.3.2 и равны:

$$t_1 = 18.7^{\circ}C,$$

$$t_{1,2} = 18.4^{\circ}C,$$

$$t_{2,3} = -1.3^{\circ}C,$$

$$t_3 = -6.5^{\circ}C.$$

Давление насыщенного водяного пара на границах слоев (24) равно:

$$E_1 = 610.5 \cdot e^{\frac{17.269-18.7}{237.3+18.7}} = 2150 \text{ Па},$$

$$E_{1,2} = 610.5 \cdot e^{\frac{17.269-18.4}{237.3+18.4}} = 2120 \text{ Па,}$$

$$E_{2,3} = 610.5 \cdot e^{\frac{21.875-(-1.3)}{265.5-1.3}} = 546 \text{ Па,}$$

$$E_3 = 610.5 \cdot e^{\frac{21.875-(-6.5)}{265.5-6.5}} = 352 \text{ Па.}$$

Профиль парциального давления водяного пара $e(x)$ по сечению ограждающей конструкции производится по формуле (22).

$$e_1 = e_{in} = 0.3 \cdot 2149.9 = 645 \text{ Па,}$$

$$e_{1,2} = 645 - \frac{(645 - 370)}{6.42} \cdot 4.61 = 447 \text{ Па,}$$

$$e_{2,3} = 645 - \frac{(645 - 370)}{6.42} \cdot (4.61 + 1.7) = 375 \text{ Па,}$$

$$e_3 = 645 - \frac{(645 - 370)}{6.42} \cdot 6.42 = 370 \text{ Па.}$$

Рис. 4 представляет профили давления насыщенного пара $E(x)$ и парциального давления $e(x)$.

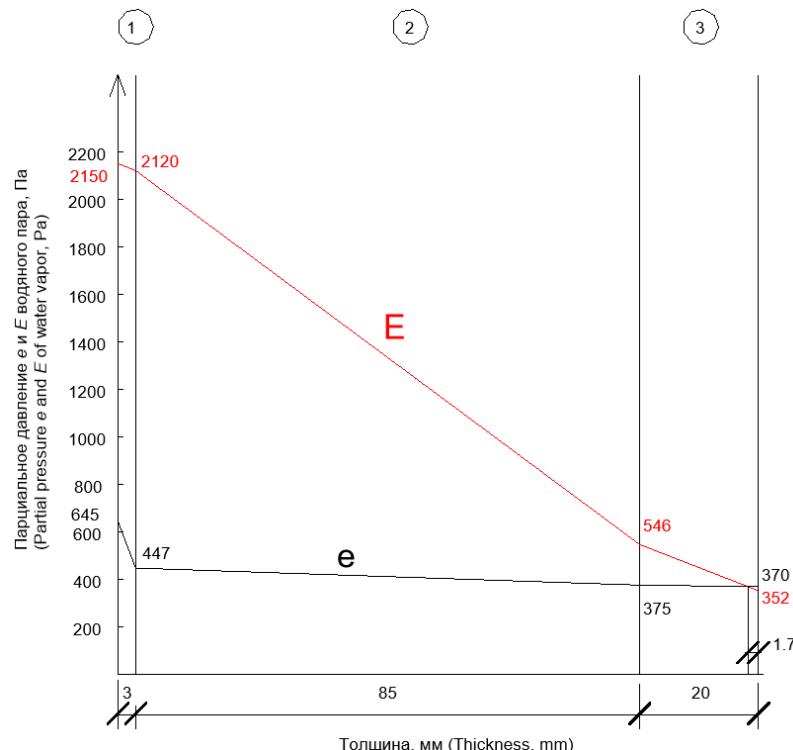


Рис.4 - Профили давления насыщенного пара $E(x)$ и парциального давления $e(x)$ (Январь)
 Fig. 4 - Saturated vapor pressure profiles $E(x)$ and partial pressure $e(x)$ (January)

Зоной конденсации влаги согласно [6] называется участок ограждающей конструкции, на котором выполняется условие конденсации влаги (21). Плоскостью конденсации влаги называется сечение ограждающей конструкции в зоне конденсации, в котором отклонение e от E достигает максимального значения. Координата плоскости конденсации влаги $x = 106.3$ мм, отклонение e от E равно 18 Па.

Таблица 8 приводит результаты расчета влажностного режима монтажного шва в годовом цикле. Значение e_{in} зависит от температуры на внутренней поверхности из профиля температур.

Таблица 8. Результаты расчета влажностного режима монтажного шва в годовом цикле
 Table 8. Results of calculation of the humidity regime of the assembly joint in the annual cycle

Месяц	e_{in} , Па	g^{inp} , мг/(м ² ·ч)	Δg , кг/м ²	G^* , кг/м ²	G , кг/м ²
Январь	645	-234	-0.174	0	0

Февраль	645	-234	-0.157	0	0
Март	645	-234	-0.174	0	0
Апрель	645	-234	-0.168	0	0
Май	1094	-164	-0.122	0	0
Июнь	1197	-148	-0.106	0	0
Июль	1253	-139	-0.103	0	0
Август	1219	-145	-0.107	0	0
Сентябрь	1105	-162	-0.116	0	0
Октябрь	645	-234	-0.174	0	0
Ноябрь	645	-234	-0.168	0	0
Декабрь	645	-234	-0.174	0	0

Влагонакопления в исследуемом монтажном шве не происходит.

3.5 Проверка исследуемого монтажного шва по принципу Роджерса / Checking the investigated assembly seam according to Rogers' principle

Паропроницаемость всех слов конструкции определяется по формуле (34):

$$G_1' = \frac{0.00065}{0.003} = 0.21 \text{ мг} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}),$$

$$G_2' = \frac{0.05}{0.085} = 0.58 \text{ мг} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}),$$

$$G_3' = \frac{0.21}{0.02} = 10.5 \text{ мг} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}).$$

Проверка условия (33):

$$0.21 < 0.58 < 10.5$$

$$10.5 > 5 \cdot 0.21$$

$$10.5 > 1.05$$

Таким образом, исследуемый типовой монтажный шов соответствует принципу Роджерса.

4 Обсуждение / Discussion

Существующие инженерные методы расчета влажностного режима применялись ранее только к плоским элементам ограждающих конструкций, и лишь в одной научной работе [45] был рассмотрен влажностный режим монтажного шва узла примыкания оконного блока к стековому проему. Для восполнения недостатка научных данных о влагонакоплении в монтажных швах было принято решение о влажностном расчете швов по аналогии с ограждающими конструкциями. Таблица 9 систематизирует итоги расчетов влажностного режима стандартного монтажного шва.

Таблица 9. Систематизирующая таблица по итогам влажностного расчета монтажного шва
Table 9. Systematizing table based on the results of the moisture calculation of the assembly joint

Метод	Нормативный документ, в основу которого лег метод	Вывод по исследуемому типовому монтажному шву
Метод определения плоскости максимального увлажнения	СП 50.13330.2024 “Тепловая защита зданий” [18]	Плоскость максимального увлажнения не найдена. Выявлено, что при наличии в конструкции тонких слоев материалов с ненулевой, но низкой паропроницаемостью, температуру в плоскости максимального увлажнения по табличным данным найти невозможно.
	СП 345.1325800.2017 “Здания жилые и общественные. Правила проектирования тепловой защиты” [19]	Плоскость максимального увлажнения расположена на внешней границе наружного слоя монтажного шва
Графоаналитический метод		При температуре наружного воздуха $t_{out} = -6.5^{\circ}C$ (средняя температура января) и выше конденсации водяного пара в ограждении не происходит
Приближенный аналитический метод определения положения плоскости возможной конденсации	СТО 00044807-001-2006 “Теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий” [21]	Плоскость возможной конденсации не найдена ввиду ограничения табличных нормативных данных
Оценка влагонакопления в годовом цикле эксплуатации	СТО 73090654.001–2015 “Оценка влажностного режима ограждающих конструкций в годовом цикле” [58] СТО 03984362.574100.056–2015 “Оценка влажностного режима ограждающих конструкций в годовом цикле” [59]	Плоскость максимальной конденсации находится на внешней границе типового монтажного шва. Влагонакопления за год нет.

Применяемые в работе методы влажностного расчета являются основой актуальных нормативных документов. В ходе работы авторы столкнулись с перечисленными в работах предшественников проблемами [60]–[63], например, отсутствие учета изменения параметров микроклимата внутри помещения в течение года. Было выявлено, что температура в плоскости максимального увлажнения по критерию $f(t_{m.w.})$ при наличии в конструкции тонких слоев материалов с ненулевой, но довольно низкой паропроницаемостью, посчитать нельзя, поскольку таблица для $f(t_{m.w.})$ имеет ограничения. Координата плоскости максимального увлажнения зависит от выбора граничных условий

Исследование [61] сравнило расчетные и экспериментальные значения парциального давления насыщенного водяного пара. Расхождение результатов по формуле (4) монотонно возрастает с понижением температуры, достигая 80 % при $-40^{\circ}C$. Для сравнения расхождение значений по формуле (24) из EN ISO 13788:2007 «Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods» [56] не превышает 2 %.

Выявленные неточности, неясности и необоснованности в методах расчета влажностного режима монтажного шва указывают на необходимость продолжения исследований в данном направлении, а также на корректировку существующих нормативных документов.

5 Выводы / Conclusions

В ходе обзора литературы был выявлен недостаток эмпирических данных и теоретических исследований влажностного режима монтажных швов узла примыкания оконного блока к стеновой конструкции. Поиск статей осуществлялся в научных базах Scopus, Web of Science, The Lens и Elibrary. Было принято решение о расчете монтажного узла по алгоритму расчета влажностного режима ограждающих конструкций с использованием инженерных методов. На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для типового монтажного узла был применен метод определения максимальной плоскости увлажнения. Было выявлено, что при наличии в конструкции тонких слоев материалов с ненулевой, но низкой паропроницаемостью, температуру в плоскости максимального увлажнения по критерию $f(t_{m.w.})$ посчитать нельзя, поскольку таблица для $f(t_{m.w.})$ имеет ограничения. Координата плоскости максимального увлажнения зависит от выбора граничных условий. Для расчета влажностного режима монтажного шва также использовался упрощенный метод нахождения плоскости максимального увлажнения. Расчет показал, что плоскость максимального увлажнения расположена на внешней границе наружного слоя монтажного шва. Влагозащитные свойства ограждающей конструкции обеспечены.

3. Стандартный монтажный узел был также рассчитан при помощи графоаналитического метода Фокина К.Ф. Кривые распределения парциального давления водяного пара e и насыщенного водяного пара E при $t_{out} = t_{Jan} = -6.5^{\circ}C$. Соответственно, при температуре выше $-6.5^{\circ}C$ выпадение конденсата внутри монтажного слоя невозможно.

4. Влажностный расчет монтажного узла с использованием приближенного аналитического метода определения положения плоскости возможной конденсации привел к тому, что таблица для определения $F(t_{k_i})$ имеет ограничения, поэтому нахождение плоскости возможной конденсации для двух слоев из трех проверить было невозможно.

5. Расчет по методу, описанному в работах Корниенко С.В., оказался более совершенным, так как учитывает изменения температуры и относительной влажности внутри помещения в течение года. Данный метод позволяет рассчитывать влажностные процессы помесячно. Плоскость максимальной конденсации находится также на внешней границе монтажного шва, что согласуется с упрощенным методом нахождения плоскости максимального увлажнения. Влагонакопления за год не происходит.

6. Экспресс проверка монтажного шва по принципу Роджерса подтвердила, что монтажный узел выполнен правильно. В исследуемом шве паропроницаемость каждого слоя (G') нарастает от внутренней поверхности к наружной.

Выявленные неточности, неясности и необоснованности в методах расчета влажностного режима монтажного шва указывают на необходимость продолжения исследований в данном направлении, а также на корректировку существующих нормативных документов.

6 Финансирование / Fundings

This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment No 075-03-2025-256 dated 16 January 2025, Additional agreement No 075-03-2025-256/1 dated March 25, 2025, FSEG-2025-0008

7 Конфликт интересов/ Conflict of Interests

The authors declare no conflict of interest.

References

- 1 Van Linden, S. and Van Den Bossche, N. (2023) Pre-Compressed Foam Sealing Tapes to Seal Joints between Building Envelope Components Watertight: An Experimental Assessment. *Buildings* 2023, Vol. 13, Page 661, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **13**, 661. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS13030661>.

Kotliarskaia, I.; Vatin, N.; Ulanov A.; Korniyenko, S.

Moisture accumulation in the assembly joint of the window block abutment to the wall opening; 2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 119 Article No 11906. doi: 10.4123/CUBS.119.6

- 2 Kupriyanov, V.N. and Petrov, A.S. (2016) Moisture Condition of Enclosing Structures with Due Regard for Variable Value of Vapor Permeability of Materials. *Building materials*, **6**, 40–43.
- 3 Yurin, O., Mammadov, N., Semko, P. and Mahas, N. (2022) Analysis of the Humidity Condition of Wall Enclosing Structures of Cooling Warehouses and Possible Ways to Improve It. *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, **181**, 439–448. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_41/TABLES/4.
- 4 Petrov, A.S., Yuzmuhamedov, A.M., Kupriyanov, V.N. and Andreatseva, K.S. (2019) Determination of the Nature of Humidification of Enclosing Structures by Experimental Method of Color Indication. *Stroitel'nye Materialy, Stroymaterialy*, **771**, 24–28. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-771-6-24-28>.
- 5 Zubarev, K.P. (2020) Experimental Determination of the Vapor Permeability Coefficient of a Sample of Building Material in Vertical Position. *Stroitel'nye Materialy, Stroymaterialy*, **781**, 59–64. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-781-6-59-64>.
- 6 Korniyenko, S.V., Vatin, N.I., Petrichenko, M.R. and Gorshkov, A.S. (2015) Evaluation of Hygrothermal Performance of Multilayered Wall Design in Annual Cycle. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **33**, 19–33. <https://doi.org/10.18720/CUBS.33.2>.
- 7 Borodulin, V.Y. and Nizovtsev, M.I. (2021) Modeling Heat and Moisture Transfer of Building Facades Thermally Insulated by the Panels with Ventilated Channels. *Journal of Building Engineering*, Elsevier, **40**, 102391. <https://doi.org/10.1016/J.JB.2021.102391>.
- 8 Gagarin, V.G. and Kozlov, V.V. (2010) Basis for Engineering Method of Calculation of Moisture Mode for Walling Made with Aerated Concrete. *Concrete*, **1**, 52–59.
- 9 Kozlov, V.V. (2002) Parameters of the Condensation Zone of an Enclosing Structure, Taking into Account the Moisture Conductivity of Materials (in Rus). Proceedings of the Seventh Scientific and Practical Conference, April 18-20, 2002. "Current Issues in Building Thermal Physics." (Academic Readings), 255–260.
- 10 Kozlov, V.V. (2002) Analysis of Moisture Accumulation in an Enclosing Structure over an Annual Period of Operation (in Rus). Collection of Papers from the Seventh Scientific and Practical Conference, April 18-20, 2002. "Current Issues in Building Thermal Physics." (Academic Readings), 247–254.
- 11 Gagarin, V.G. and Kozlov, V.V. (2003) Fundamentals for Developing an Engineering Method for Calculating Humidity Conditions (in Rus). *Proceedings of the Eighth Scientific and Practical Conference "Walls and Facades. Current Issues in Building Thermal Physics."* (Academic Readings), 33–35.
- 12 Kozlov, V.V. (2004) A Method of Engineering Assessment of the Moisture Condition of Modern Enclosing Structures with an Increased Level of Thermal Protection, Taking into Account Vapor Permeability, Moisture Conductivity and Air Filtration (in Rus): Candidate of Technical Sc.
- 13 Gagarin, V.G., Kozlov, V.V. and Zubarev, K.P. (2016) Analysis of the Area's Location of Maximum Moisture in the Wall System with Different Thickness of Insulation Layer. *Housing construction*, OOO Рекламно-издательская фирма «Стройматериалы», 8–11.
- 14 Gagarin, V.G. and Kozlov, V.V. (2006) Mathematical Model and Engineering Method for Calculating the Moisture State of Enclosing Structures. *Academia. Architecture and Construction*, **2**, 60–63.
- 15 SP 345.1325800.2017 "Residential and Public Buildings. Thermal Performance Design." <https://docs.cntd.ru/document/557662914>.
- 16 Korniyenko, S.V. (2020) Improving Methods of Temperature and Humidity Calculation in Enclosing Structures. *AlfaBuild*, **13**, 1–6. <https://doi.org/10.34910/ALF.13.1>.
- 17 SP 50.13330.2024 "Thermal Protection of Buildings." <https://www.minstroyrf.ru/upload/iblock/4a0/hzthegc44r25waj2sf7h8lgfie4v27sp/SP-50.pdf>.
- 18 Vytchikov, Yu.S. and Beljakov, I.G. (1998) Vytchikov Ju.S., Beljakov i.G. *Izvestiya Vyshe Uchebnykh Zavedenii. Stroitel'stvo*. Novosibirsk, 1998. №3. Pp. 76-79. *Izvestiya vyshe uchebnykh zavedenii*, 76–79.
- 19 STO 00044807-001-2006 "Thermal Protection Properties of Building Enclosing Structures." <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293851/4293851951.htm>.
- 20 Vytchikov, Yu.S., Saparev, M.E. and Diadin, A.A. (2020) Study of the Humidity Regime of Building Enclosing Structures Using the Method of Dimensionless Characteristics (in Rus). *Engineering Bulletin of the Don*, 1–12.

- 21 Vytchikov, Y.S. and Saparev, M.Ye. (2020) Application of the Method of Dimensional Characteristics to the Calculation of the Humidity Mode of Multi-Layered Enclosing Building Structures. *Urban construction and architecture*, Samara State University of Architecture and Civil Engineering, **10**, 10–15. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2020.02.2>.
- 22 Vytchikov, Yu.S. (2006) Determination of the Condensation Plane for Multilayer Enclosing Structures (in Rus). *Construction materials*, **4**, 92–94.
- 23 Gagarin, A. the authors: V.G. and Zubarev, K.P. (2019) Moisture Potential Theory Application for Modelling of Enclosing Structure Unsteady-State Moisture Regime. *Vestnik MGSU*, Moscow State University of Civil Engineering, 484–495. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.4.484-495>.
- 24 Gagarin, V.G., Akhmetov, V.K. and Zubarev, K.P. (2020) Position Control of Maximum Wetting Plane for Building Walls with Foam Polystyrene Heat Insulator. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, **753**, 022045. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/2/022045>.
- 25 Bogoslovskii, V.N. and Gagarin, V.G. (2013) Fundamentals of the Theory of Material Moisture Potential as Applied to External Enclosures of Building Shells (in Rus).
- 26 Perehogencev, A.G. (2006) Calculation of Moisture Distribution in Multilayer Building Envelope Structures Based on the Moisture Potential in a Non-Isothermal Quasi-Steady-State Mode (in Rus). *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno- stroitevnogo universiteta. Seriya: Stroitelstvo i arhitektura*, **6**, 10–13.
- 27 Korniyenko, S. V. (2015) Assessment of Moisture Conditions of a Multi-Layered Building Envelope with Multi-Zone Moisture Condensation. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*, **41**, 24–33.
- 28 Kupriyanov, V.N. and Safin, I.Sh. (2010) Vapor Permeability and Design of Enclosing Structures (in Rus). *Academia. Architecture and construction*, Российская академия архитектуры и строительных наук, 385–390.
- 29 Rogers, T.S. (1966) Design of Thermal Protection for Buildings (in Rus).
- 30 Kopylova, A., Vatin, N.I. and Pestryakov, I. (2014) Experimental Comparison of the Characteristics of Water Vapor Permeability of the Main Construction Materials. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **25**, 98–108. <https://doi.org/10.18720/CUBS.25.8>.
- 31 He, Y., Liu, M., Zhao, Z., Li, S., Zhang, X. and Zhou, J. (2025) Condensation Risk Under Different Window-Opening Behaviours in a Residential Building in Changsha During Plum Rains Season. *Buildings 2025*, Vol. 15, Page 1536, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, **15**, 1536. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS15091536>.
- 32 Wang, J., Zhang, Y., Li, B., Zhao, Z., Huang, C., Zhang, X., Deng, Q., Lu, C., Qian, H., Yang, X., Sun, Y. and Norbäck, D. (2023) Effects of Mold, Water Damage and Window Pane Condensation on Adult Rhinitis and Asthma Partly Mediated by Different Odors. *Building and Environment*, Pergamon, **227**, 109814. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2022.109814>.
- 33 Chesnokova, O.G. (2016) Use of Ultra-Fine Heat Insulation to Prevent Freezing of Steel Window Bridges. *The Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*, **45**, 94–101.
- 34 Huff, D.N. (2008) Non-Destructive Testing of Elastomeric Joint Sealants in Construction. 11th DBMC International Conference of Durability of Building Materials and Components, Istanbul, Turkey, 1–5.
- 35 Olsson, L. (2015) Long-Term Field Measurements of Moisture in Wooden Walls with Different Types of Facades: Focus on Driving Rain Tightness. *Energy Procedia*, Elsevier, **78**, 2518–2523. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.11.258>.
- 36 Farrington, E., Anderson, T., Grant, L., Journal, R.S.-P. and 2019, undefined. (2019) Precast Concrete-to-Precast Concrete Facade Joints Using Precompressed Expandable Foam. *pci.orgES Farrington, T Anderson, L Grant, R SeraderianPCI Journal, 2019•pci.org*.
- 37 Van Linden, S. and Van Den Bossche, N. (2019) On the Feasibility of Watertight Face-Sealed Window-Wall Interfaces. *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, **282**, 02015. <https://doi.org/10.1051/MATEC201928202015>.
- 38 Van Linden, S. and Van Den Bossche, N. (2021) Comparative Study on the Feasibility of Watertight Face-Sealed Building Joints under Simulated Wind-Driven Rain Conditions. *Building Research & Information*, Routledge, **49**, 748–762. <https://doi.org/10.1080/09613218.2021.188687>.

- 39 Arce Recatalá, M., García Morales, S. and Van den Bossche, N. (2020) Pressure-Equalised Façade Systems: Evaluation of Current Watertightness Test Standards Used to Assess the Performance of Enclosure Components. *Journal of Building Physics*, SAGE Publications Ltd, **43**, 369–397. <https://doi.org/10.1177/1744259119880284>.
- 40 Perez-Bella, J.M., Dominguez-Hernandez, J., Cano-Suñen, E., Del Coz-Diaz, J.J. and Alvarez Rabanal, F.P. (2015) Improvement Alternatives for Determining the Watertightness Performance of Building Facades. *Building Research and Information*, Routledge, **43**, 723–736. <https://doi.org/10.1080/09613218.2014.943101>.
- 41 Pérez-Bella, J.M., Domínguez-Hernández, J., Rodríguez-Soria, B., Del Coz-Díaz, J.J. and Cano-Suñén, E. (2013) A New Method for Determining the Water Tightness of Building Facades. *Building Research and Information*, **41**, 401–414. <https://doi.org/10.1080/09613218.2013.774936>.
- 42 Shi, D., Malaga-Chuquitaype, C., Wang, X., Marano, G.C. and Demartino, C. (2026) Glubam Roof Trusses: Uncertainty Quantification and Partial Safety Factors Calibration Based on Bayesian Methods. *Reliability Engineering & System Safety*, Elsevier, **265**, 111488. <https://doi.org/10.1016/J.RESS.2025.111488>.
- 43 Vytchikov, Yu.S., Saparev, M.E. and Konyakina, D.D. (2024) Improving the Thermal Protection Characteristics of the Seams of the Mounting Assemblies of the Window Blocks to the Wall Openings. *Traditions and Innovations in Construction and Architecture. Construction and Construction Technologies*, 652–662.
- 44 (2005) Installation Guide for PVC Windows by VEKA-Rus LLC. 1–151. https://aaz.ucoz.com/VEKA/PDF/Montazh_okon.pdf.
- 45 Salvati, A. and Kolokotroni, M. (2023) Urban Microclimate and Climate Change Impact on the Thermal Performance and Ventilation of Multi-Family Residential Buildings. *Energy and Buildings*, Elsevier, **294**, 113224. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2023.113224>.
- 46 Korchkov, A.P. (2020) Indoor Microclimate (in Rus). *Master's Degree Bulletin*, Общество с ограниченной ответственностью «Коллектиум».
- 47 Russian State Standard 30494-2011 “Residential and Public Buildings. Microclimate Parameters for Indoor Enclosures.” <https://docs.cntd.ru/document/1200095053>.
- 48 Lasantha, V., Oki, T. and Tokuda, D. (2022) Data-Driven versus Köppen-Geiger Systems of Climate Classification. *Advances in Meteorology*, Hindawi Limited, **2022**. <https://doi.org/10.1155/2022/3581299>.
- 49 Gorshkov, A.S., Vatin, N.I. and Rymkevich, P.P. (2020) Impact of Anthropogenic Factors on Thermal Pollution of the Urban Environment. *ABOK*, **7**.
- 50 SP 131.13330.2020 “Building Climatology.” <https://docs.cntd.ru/document/573659358>.
- 51 SNIП II-A.6-72 Construction Climatology and Geophysics - Docs.Cntd.Ru. <https://docs.cntd.ru/document/1200064981>.
- 52 Korniyenko, S.V., Vatin, N.I. and Gorshkov, A.S. (2016) Assessment of Moisture Conditions of Walls with Façade's Thermoinsulation Composite Systems with External Mortar Layers. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **45**, 34–54. <https://doi.org/10.18720/CUBS.45.2>.
- 53 SP 345.1325800.2017 “Residential and Public Buildings. Thermal Performance Design.” <https://docs.cntd.ru/document/557662914>.
- 54 Fokin, K.F. (2006) Stroitel'naya Teplotekhnika Ograzhdayushchih Chastej Zdanij. 256. <https://dwg.ru/lib/2372>.
- 55 Kupriyanov, V.N. (2017) Improved Calculation Method for Protection Against Strong Moistening of an Enclosure. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]*, OOO Рекламно-издательская фирма «Стройматериалы».
- 56 STO 73090654.001–2015 “Otsenka Vlazhnostnogo Rezhima Ograzhdayushchikh Konstruktsiy v Godovom Tsikle” [Assessment of Moisture Conditions of the Building Components in the Annual Cycle] (Rus).
- 57 STO 03984362.574100.056–2015 “Otsenka Vlazhnostnogo Rezhima Ograzhdayushchikh Konstruktsiy v Godovom Tsikle” [Assessment of Moisture Conditions of the Building Components in the Annual Cycle] (Rus).
- 58 Korniyenko, S. V. (2014) About Applicability of SP 50.13330.2012 Method to Calculation of a Moisture Conditions of Enclosing Structures with Multi-Zone Moisture Condensation. *Construction and reconstruction*, **5**, 29–37.
- 59 Lichman, V.A. (2018) On the Methods of Calculation of Humidity Conditions of Building Envelopes. *ABOK*, **4**, 1.

- 60 Gorshkov, A.S. and Korniyenko, S.V. Analysis of the Main Provisions of SP 50.13330.2012 (in Rus). *Engineering systems*, 1–13.
- 61 Perekhozhentsev, A.G. (2017) On the Need to Adjust Construction Rules SP 50.13330.2012 "Thermal Protection of Buildings." *ABOK*, 8, 54–57.
- 62 (2007) EN ISO 13788:2007 «Hygrothermal Performance of Building Components and Building Elements – Internal Surface Temperature to Avoid Critical Surface Humidity and Interstitial Condensation – Calculation Methods». 40.