

Метод расчета утепления снаружи. Благоприятные условия.

"Наружное расположение утеплителя как с точки зрения тепловой защиты (теплонакопления), так и с точки зрения влагозащиты (предотвращения конденсата) является наилучшим решением по всем критериям строительной физики"

В. Блази "Справочник проектировщика".

WDVS Wärmedämmverbundsystem или ETICs External thermal insulation composite systems система "мокрых" фасадов.

Для примера взят город Санкт-Петербург. Оптимальной с медицинской точки зрения влажностью в помещении будет 55% относительной влажности воздуха. Средняя температура в помещении зимой составляет 20 градусов.

Далее следует выписать основные характеристики всех слоев утепляемой стены и найти город в таблице 1 СНиП "Климатология".

▶ Поиск данного города по таблицам СНиП

▶ Ввод данных по материалам

При использовании WDVS иногда большое значение играет слой внутренней отделки. Т.к. наиболее дешевым материалом для такого типа утепления выступает фасадный пенополистирол, может потребоваться снизить паропроницаемость конструкции стены в данном случае варьируя различные виды внутренней отделки стены, выбирая менее паропроницаемые краски, к примеру, или используя менее паропроницаемые грунтовки. Мы утеплим пенополистиролом, чтобы сразу рассмотреть самый неблагоприятный вариант. Поэтому отдадим предпочтение более толстой штукатурке и менее паропроницаемой внутренней отделке. Внутренним слоем будет силиконовая краска для внутренних работ.

n1 = "Краска силиконовая для внутренних работ"

$\lambda_{1a} = 4.5$ Вт/мС⁰ коэффициент теплопроводности

$\mu_1 = 0.01$ мг/м час Па коэффициент паропроницаемости по СНиП

$\sigma_1 = 8 \times 10^{-5}$ м толщина слоя

$$Sd_1 := \frac{0.625}{\mu_1} \cdot \sigma_1$$

$Sd_1 = 5 \times 10^{-3}$ м эквивалентная толщина слоя воздуха

Вторым слоем будет цементно-известковая штукатурка достаточно толстым слоем в 2 см.

n2 = "известково-цементная Baumit MPA"

$\lambda_{2a} = 0.8$ Вт/мС⁰ коэффициент теплопроводности для условия А

$\mu_2 = 0.04$ мг/м час Па коэффициент паропроницаемости по СНиП

$\sigma_2 := 0.02$ м толщина слоя

$$Sd_2 := \frac{0.625}{\mu_2} \cdot \sigma_2 = 0.313 \text{ м эквивалентная толщина слоя воздуха}$$

Далее необходимо выбрать тип утеплителя. Как было сказано в статье об утеплении изнутри, не стоит сразу выбирать толщину утеплителя как это советуют делать некоторые продавцы. Во-первых не имеет смысла превышать требования СНиП по сопротивлению теплопередаче. И во вторых, если вы решили взять утеплитель большей толщины чем требуется, нужно понять экономические выгоды данного решения. (чему будет посвящена отдельная статья.) И так выбираем только тип утеплителя. Еще один момент при выборе утеплителя связан с коэффициентом паропроницаемости. Низкая паропроницаемость пенополистирола еще не означает, что он вам не подойдет. Старайтесь экономить свои деньги не минеральной вате.

В период конденсации для любого материала, прослойки, существует показатель максимального содержания влаги на м^2 . Так для воздушной прослойки это порядка 5 кг/м^2 . Для минваты 5% влаги по массе, а для пенополистирола аж 25% влаги по массе. Грубо говоря, определенное влагонакопление влаги, которая потом диффундирует, не критично при утеплении пенополистиролом, особенно при утеплении снаружи, когда влага высыхает быстрее всего. Коэффициент теплопроводности на этот раз берется по максимальному условию влажности, в нашем случае по условию Б.

$n3 = \text{"Необходимый ассортимент ESP"}$

$\lambda_{3b} = 0.035$ Вт/мC° коэффициент теплопроводности для условия Б

$\mu_3 = 0.026$ мг/м час Па коэффициент паропроницаемости по СНиП

Параметры стенового материала остаются одинаковыми: кирпич глиняный на цементно-песчанном растворе в два с половиной толщиной. Так как этот слой расположен перед утеплителем и условие влагонакопления просто недопустимо даже для утеплителя, то выбирается наименьшая теплопроводность.

$n4 = \text{"щелевой глиняный кирпич на ЦИР в два с половиной"}$

$\lambda_{4a} = 0.7$ Вт/мC° коэффициент теплопроводности

$\mu_4 = 0.11$ мг/м час Па коэффициент паропроницаемости по СНиП

$\sigma_4 = 0.64$ м толщина слоя

$Sd_4 := \frac{0.625}{\mu_4} \cdot \sigma_4 = 3.636$ м эквивалентная толщина слоя воздуха

Клеевой слой утеплителя и армирующей сетки в принципе можно не учитывать, т.к. ничтожная толщина и состав этих слоев практически не влияют ни на паропроницаемость, ни на сопротивление теплопередаче.

На утеплитель наносится слой шпатлевки. Именно шпатлевки, толстый слой штукатурки просто недопустим. Желательно использовать систему грунт-шпатлевка-краска для WDVS одной фирмы.

$n5 = \text{"Baumit SilikatPutz"}$

$\lambda_{5b} = 1$ Вт/мC° коэффициент теплопроводности для условия Б

$\mu_5 = 0.016$ мг/м час Па коэффициент паропроницаемости по СНиП

$\sigma_5 = 2 \times 10^{-3}$ м толщина слоя

$Sd_5 := \frac{0.625}{\mu_5} \cdot \sigma_5 = 0.078$ м эквивалентная толщина слоя воздуха

Обычно шпатлевки окрашенные по массе имеют меньшее угловое отражение и поэтому более предпочтительны. Но мы возьмем случай со шпатлевкой окрашенной отдельно силикатной краской. И шпатлевка, и окраска могут значительно влиять на влажностный режим утеплителя. Поэтому в некоторых случаях оправданы вложения в нано-шпатлевки и краски не пропускающие дождевую воду, но хорошо пропускающие водяной пар. В случае WDVS с минеральной ватой желательно использовать акриловые и силиконовые составы. Мы же возьмем силикатные:

$n6 = \text{"Baumit SilikatFarbe"}$

$\lambda_{6b} = 0$ Вт/мC° коэффициент теплопроводности для условия Б

$\mu_6 = 0.014$ мг/м час Па коэффициент паропроницаемости по СНиП

$\sigma_6 = 1.5 \times 10^{-4}$ м толщина слоя

$Sd_6 := \frac{0.625}{\mu_6} \cdot \sigma_6 = 6.696 \times 10^{-3}$ м эквивалентная толщина слоя воздуха

Теперь мы можем приступить к определению толщины утеплителя. Нам потребуется прежде всего рассчитать сопротивление теплопередаче стены без утеплителя и сравнить его с нормируемым для данного города.

► Определение сопротивления теплопередаче

$\lambda_1 = 4.5$ выбор теплопроводности внутренней отделки в сухом состоянии

$\lambda_2 = 0.8$ выбор теплопроводности внутренней штукатурки в сухом состоянии

$\lambda_3 = 0.032$ выбор теплопроводности утеплителя для условия Б

$\lambda_4 = 0.7$ выбор теплопроводности стенового материала для условия А

$\lambda_5 = 1$ выбор теплопроводности внешней штукатурки всегда для условия Б

Температура на поверхности стены будет ниже температуры воздуха в помещении, поэтому рассчитываем сопротивление теплоотдаче .

$\alpha_{ext} := 23$ коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции для условий холодного периода, Вт/м²·°С, принимаемый по таблице 8 СП 23-101-2004 или таблице С3-3

$R_{se} := \frac{1}{\alpha_{ext}}$ $R_{se} = 0.043$ м² С⁰ Вт сопротивление теплопередаче внешней поверхности стены

$\alpha_{int} := 6$ коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности ограждающих конструкций, Вт/(м² × °С), принимаемый по таблице 7 СНиП 23-02-2003 или таблице С3-4

$R_{si} := \frac{1}{\alpha_{int}}$ $R_{si} = 0.167$ м² С⁰ Вт сопротивление теплопередаче внутренней поверхности стены

Найдем температуру самой холодной пятидневки для Санкт-Петербурга

$t_{5z} = -30$ С⁰ температура наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0.92

► Определение требуемой толщины утеплителя

По той же таблице найдем продолжительность суток отопительного периода и среднюю температуру за этот период:

$Z_{ht} = 220$ продолжительность суток отопительного периода по таблице СНиП 23-01 со средней суточной температурой наружного воздуха не более 8 С⁰

$T_{ht} = -1.8$ средняя температура наружного воздуха за отопительный период по таблице 1 СНиП 23-01 температура меньше 8 С⁰

$Dd := (t_{int} - T_{ht}) \cdot Z_{ht}$ Градусосутки отопительного периода С⁰сут

$Dd = 4.796 \times 10^3$ продолжительность суток отопительного периода

Обязательно рассчитывать требуемое сопротивление теплопередаче окон вместе с утеплителем. Т.к. конденсат на окнах может быть причиной неправильно выбранного стеклопакета, его профиля, неверного стыка с утеплителем, высокой влажности в помещении. Вместо этого некоторые склонны списывать конденсат на окнах только на недостаточное утепление стен. Технические решения стыка утеплителя и рамы окна можно посмотреть у производителя утеплителя или у некоторых крупных производителей окон и профилей для стеклопакетов. Произвести расчет изотерм в инженерных программах:

$a := 0.00035$ $a = 3.5 \times 10^{-4}$

$b := 1.4$ $b = 1.4$

$a_w := \begin{cases} 0.000075 & \text{if } Dd < 6000 \\ 0.00005 & \text{if } 6000 \leq Dd < 8000 \\ 0.000025 & \text{if } Dd > 8000 \end{cases}$

$b_w := \begin{cases} 0.15 & \text{if } Dd < 6000 \\ 0.3 & \text{if } 6000 \leq Dd < 8000 \\ 0.5 & \text{if } Dd > 8000 \end{cases}$

$a_w = 7.5 \times 10^{-5}$ $b_w = 0.15$

Найдем нормируемое сопротивление теплопередаче для стен и окон

$P_{req} := a \cdot Dd + b$

$P_{reqw} := a_w \cdot Dd + b_w$

$P_{req} = 3.079$ м²С⁰/Вт требуемое сопротивление теплопередаче всей стены

$P_{reqw} = 0.51$ м²С⁰/Вт требуемое сопротивление теплопередаче окна

$\alpha_{intw} := 8.0$ коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности окон, Вт/(м² × °С), принимаемый по таблице 7 СНиП 23-02-2003

$$P_{siw} := \frac{1}{\alpha_{intw}}$$

$P_{siw} = 0.125$ м²С⁰Вт сопротивление теплопередаче внутренней поверхности окна

Определим сопротивление теплопередаче стены без утеплителя

$$P_{wall} := \frac{1}{\alpha_{int}} + \left(\frac{\sigma_1}{\lambda_1} + \frac{\sigma_2}{\lambda_2} + \frac{\sigma_4}{\lambda_4} + \frac{\sigma_5}{\lambda_5} + \frac{\sigma_6}{\lambda_6} \right) + \frac{1}{\alpha_{ext}} = 1.152$$

$P_{wall} = 1.152$ м²С⁰/Вт сопротивление теплопередаче всей стены

Выясним какой стеклопакет необходимо поставить

► Определение параметров окна

$P_{win} = 0.56$ приведенное сопротивление теплопередаче этого стеклопакета м² °С/Вт

$\delta_w = "4-16-argon-4k"$ рекомендуемый тип стеклопакета

Наконец, посчитаем какая толщина утеплителя нам необходима

$$\delta_{req} := \lambda_3 \cdot (P_{req} - P_{wall} - R_{si} - R_{se})$$

$\delta_{req} = 0.055$ м требуемая минимальная толщина утеплителя

Бессмысленно дальше использовать полученное значение, необходимо сделать поправку на реальный ассортимент утеплителей.

► Поиск по ассортименту

$\delta = 0.06$ м толщина утеплителя исходя из реального ассортимента

Теперь мы сможем определить Sd value утеплителя

$$\sigma_3 := \delta$$

$$Sd_3 := \frac{0.625}{\mu_3} \cdot \delta = 1.442 \text{ м эквивалентная толщина слоя воздуха}$$

Периодом конденсации будут дни со средней температурой -10С⁰, периодов высыхания будут дни со средней температурой +12С⁰ Для по таблице1 СНиП Климатология находим количество суток с температурой меньше -10С⁰ и по таблице 3 количество суток с температурой больше +12С⁰

► Определение периодов конденсации и высыхания

$t_{ext} := -10$ С⁰ температура , когда образуется конденсат в стене

$t_{exts} := 12$ С⁰ температура , когда стена начинает высыхать

$T_t = 5.736 \times 10^3$ часов период конденсации (водонакопления)

$T_v = 2.16 \times 10^3$ часов период высыхания (испарения влаги)

$\varphi_{int} = 55$ % влажность в помещении

$h_i := \alpha_{int} = 6$ Вт/м²К коэффициент теплоперехода внутри (без учета мебели у стены)

$h_e := \alpha_{ext} = 23$ Вт/м²К коэффициент теплоперехода снаружи

Найдем максимальное парциальное давление водяного пара внутри помещения и снаружи при средней температуре отопительного периода -10 для этого можно использовать таблицу из СП 23-101-2004 . Затем найдем действительно давление водяного пара при данной влажности.

$p_{se} = 260$ Па максимальная упругость насыщенного пара при данной температуре при данной температуре по приложению С СП 23-101-2004 снаружи

$p_{si} := 2338$ Па, максимальная упругость насыщенного пара при 20C^0 внутри комнаты

$$p_e := \frac{\varphi_{ext}}{100} \cdot p_{se}$$

$$p_i := \frac{\varphi_{int}}{100} \cdot p_{si}$$

$p_i = 1.286 \times 10^3$ Па, упругость водяного пара в комнате

$p_e = 215.8$ Па, упругость водяного пара наружи Средняя за период конденсации

Далее найдем температуры по слоям. Это необходимо потому, что конденсат обычно выпадает не в толще материала, а на стыке слоев. И для того, чтобы найти парциальное давление в этих стыках, нужно сперва определить их температуру.

$$R_t := \frac{1}{\alpha_{int}} + \left(\frac{\sigma_1}{\lambda_1} + \frac{\sigma_2}{\lambda_2} + \frac{\sigma_3}{\lambda_3} + \frac{\sigma_4}{\lambda_4} + \frac{\sigma_5}{\lambda_5} + \frac{\sigma_6}{\lambda_6} \right) + \frac{1}{\alpha_{ext}} = 3.027$$

$R_t = 3.027$ $\text{m}^2\text{C}^0/\text{Вт}$ сопротивление теплопередаче всей стены

$$\Delta\theta := t_{int} - t_{ext} = 30$$

$$T_0 := t_{int} - \frac{\Delta\theta \cdot \frac{1}{\alpha_{int}}}{R_t}$$

$T_0 = 18.348$ C^0 градусов температура на внутренней поверхности стены

$$T_1 := t_{int} - \frac{\Delta\theta \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{int}} + \frac{\sigma_1}{\lambda_1} \right)}{R_t}$$

$T_1 = 18.348$ C^0 градусов на стыке отделочного слоя и внутренней штукатурки

$$T_2 := t_{int} - \frac{\Delta\theta \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{int}} + \frac{\sigma_1}{\lambda_1} + \frac{\sigma_2}{\lambda_2} \right)}{R_t}$$

$T_2 = 18.1$ C^0 градусов на стыке штукатурки и стены

$$T_3 := t_{int} - \frac{\Delta\theta \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{int}} + \frac{\sigma_1}{\lambda_1} + \frac{\sigma_2}{\lambda_2} + \frac{\sigma_4}{\lambda_4} \right)}{R_t}$$

$T_3 = 9.037$ C^0 градусов на стыке стены и утеплителя

$$T_4 := t_{int} - \frac{\Delta\theta \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{int}} + \frac{\sigma_1}{\lambda_1} + \frac{\sigma_2}{\lambda_2} + \frac{\sigma_3}{\lambda_3} + \frac{\sigma_4}{\lambda_4} \right)}{R_t}$$

$T_4 = -9.548$ C^0 градусов на стыке утеплителя и шпатлевки для WDVS

$$T_5 := t_{int} - \frac{\Delta\theta \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{int}} + \frac{\sigma_1}{\lambda_1} + \frac{\sigma_2}{\lambda_2} + \frac{\sigma_3}{\lambda_3} + \frac{\sigma_4}{\lambda_4} + \frac{\sigma_5}{\lambda_5} \right)}{R_t}$$

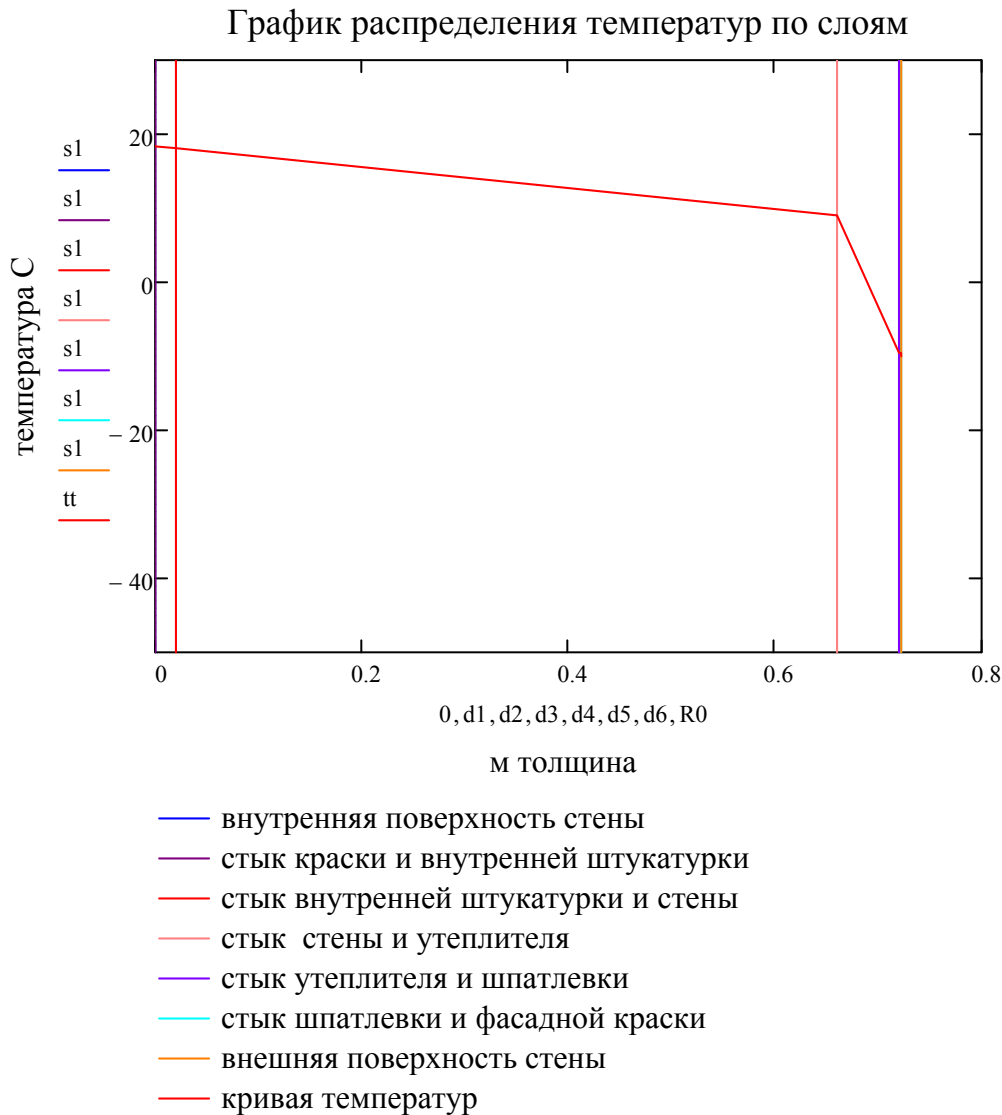
$T_5 = -9.568$ °C градусов на стыке внешней шпатлевки и фасадной краски WDVS

$$T_6 := t_{int} - \frac{\Delta\theta \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{int}} + \frac{\sigma_1}{\lambda_1} + \frac{\sigma_2}{\lambda_2} + \frac{\sigma_3}{\lambda_3} + \frac{\sigma_4}{\lambda_4} + \frac{\sigma_5}{\lambda_5} + \frac{\sigma_6}{\lambda_6} + \frac{1}{\alpha_{ext}} \right)}{R_t}$$

$\Sigma Sd := Sd_1 + Sd_2 + Sd_3 + Sd_4 + Sd_5 + Sd_6 = 5.481$ м суммарная эквивалентная толщина воздуха

Построим график распределения температуры по слоям.

▶ Параметры графика



Теперь мы можем по полученным температурам найти максимальное парциальное давление в каждом слое, используя упомянутую выше таблицу максимального давления водяного пара при данной температуре из СП 23-01-2004

▶ Определение максимального парциального давления по слоям

- $psw_0 = 2.102 \times 10^3$ Па максимальное давление водяного пара на внутренней поверхности стены
- $psw_1 = 2.102 \times 10^3$ Па максимальное давление водяного пара в стыке отделки и внутренней штукатурки
- $psw_2 = 2.077 \times 10^3$ Па максимальное давление водяного пара в стыке стены и внутренней штукатурки
- $psw_3 = 1.156 \times 10^3$ Па максимальное давление водяного пара в стыке стены и утеплителя

psw4 = 273 Па максимальное давление водяного пара в стыке утеплителя и внешней шпатлевки

psw5 = 268 Па максимальное давление водяного пара на стыке внешней шпатлевки и фасадной краски

psw6 = 260 Па максимальное давление водяного пара на внешней поверхности стены

На этот раз **нужно разметить слои не по реальной толщине, а по значениям Sd** . Нанесем распределение максимального парциального давления и соединим точки значения действительного парциального давления внутри помещения и снаружи (на поверхностях).

Т.к. значение действительно парциального давления пара не может превышать максимального, оценивается касательная прямой $p_i - p_e$ к кривой psw. Т.е. кривая действительного парциального давления не может лежать выше максимального по логике вещей.

уравнение прямой P парциального давления, найденное по двум точкам.

$$f(p) := \frac{(p_e - p_i)}{(\sum Sd - 0)} \cdot (p - 0) + p_i$$

$$f(Sd1) = 1.285 \times 10^3 \quad \text{Па действительное давление на стыке внутренней штукатурки и краски}$$

$$f(Sd1 + Sd2) = 1.224 \times 10^3 \quad \text{Па действительное давление на стыке стены и внутренней штукатурки}$$

$$f(Sd1 + Sd2 + Sd4) = 513.954 \quad \text{Па действительное давление на стыке утеплителя и стены}$$

$$f(Sd1 + Sd2 + Sd3 + Sd4) = 232.36 \quad \text{Па действительное давление на стыке утеплителя и внешней шпатлевки}$$

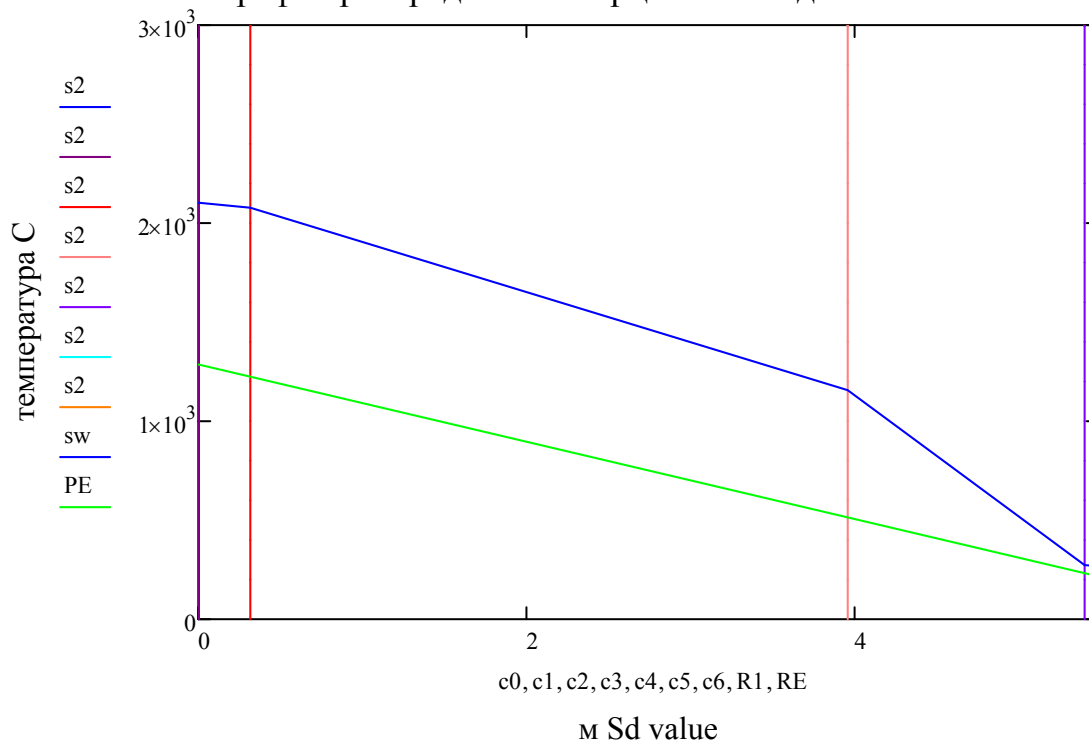
$$f(Sd1 + Sd2 + Sd3 + Sd4 + Sd5) = 217.107 \quad \text{Па действительное давление на стыке внешней шпатлевки и фасадной краски}$$

$$f(Sd1 + Sd2 + Sd3 + Sd4 + Sd5 + Sd6) = 215.8 \quad \text{Па действительное давление в.п. на внешней поверхности}$$

Построение касательных к кривой насыщения

► Разметка стены относительно Sd value

График распределения парциального давления по слоям



- внутренняя поверхность стены
- стык краски и внутренней штукатурки
- стык внутренней штукатурки и стены
- стык утеплителя и стены
- стык утеплителя и шпатлевки
- стык шпатлевки и фасадной краски
- внешняя поверхность стены
- кривая максимального парциального давления
- кривая действительного парциального давления в.п.

Несоразмерность слоев бросается в глаза. Но и суть метода состоит именно в построение кривых давлений водяного пара относительно Sd материалов, а не их толщины как в методах расчета по СНиП. По этой причине у нас принято уазывать коэффициент паропроницаемости, а у них - Sd value. Вы никогда не найдете к-нт паропроницаемости на импортных материалах.

Данное отличие методов повлияло на весьма типичное ошибочное мнение о недопустимости использования, к примеру, пенополистирола. Когда по ошибке оценка давлений в.п. делается относительно реальной толщины материалы, а не значений Sd.

На графике видно, что кривая фактического давления водяного пара не пересекает кривую давления насыщего водяного пара. Это означает, что **ни в одной плоскости стены не будет выпадать конденсат**.

Тем не менее даже при этом способе утепления могут возникнуть ситуации, когда требуется использование пароизоляции, а чаще всего просто менее паропроницаемых материалов отделки. Мы рассмотрим этот случай в следующей статье.

В данном расчете ничего не сказано про тарельчатые дюбеля для крепления утеплителя к стене. Неправильный выбор дюбеля может привести и к промерзанию и к огромной диффузии влаги в место крепления, что приведет к образованию льда или разрушению утеплителя в местах крепления. Такие повреждения выражены в эффекте "леопарда", когда весь фасад усеян точками повреждений в области дюбелей. Но рассчитать параметры теплопроводности дюбеля возможно только используя метод конечных элементов. Для этого можно порекомендовать комплекс Athena (двухмерный МКЭ) или более сложные программные комплексы, использующие МКЭ.

Следует также еще раз отметить, что описанная методика основывается на методе Глазьева, адаптированной под характеристики материалов принятые в нашем СНиП и соответственно на нашем рынке строительных материалов. Методикам расчета утепления по СНиП будет посвящена отдельная статья.

A.Zhukov Ph.D in architecture

