

**ТРУБОПРОВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ И ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ**

УДК 697.1:536

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА НАРУЖНОЙ СТЕНЫ  
НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ПОТЕНЦИАЛА ВЛАЖНОСТИ****А.В. БАТЕНКОВА, А.А. КОРШУН, А.Д. МИЛОЧКИНА**  
(Представлено: В.А. Зафатаев)

*Представлены результаты влажностного расчёта нестепрозрачной многослойной конструкции наружной стены, не облучаемой прямой солнечной радиацией, на основе теории потенциала влажности. На рассмотренном примере показано, что наряду с традиционным методом стационарной диффузии водяного пара расчёт влажностного режима методом потенциалов влажности позволяет количественно учесть содержание влаги в её различных фазовых состояниях, включая сорбированную влажность и область сверхсорбционного увлажнения.*

**Введение.** Защита ограждающих конструкций зданий от влаги необходима для повышения их теплозащитных и эксплуатационных свойств, а также долговечности. Влажностный режим ограждения является одним из основных при расчете теплопередачи, поскольку переувлажнение приводит к заметному снижению теплозащитных свойств и долговечности конструкции. С повышением влажности строительных материалов повышается и их теплопроводность. При увеличении теплопроводности материала уменьшается температура внутренней поверхности ограждения, что может привести к образованию на ней конденсата и плесени.

Известны инженерные методы расчёта температурно-влажностного режима ограждающих конструкций К. Ф. Фокина, Э. Х. Одельского, А. М. Шкловера, Ф. В. Ушкова, М. В. Поликанова, А. Г. Перехоженцева, Д. А. Андреева, Ю. С. Выгчикова, В. В. Козлова, В. Н. Богословского, С. В. Корниенко [1]. Особый интерес представляет метод расчёта влагопереноса в ограждающих конструкциях на основе теории потенциала влажности. Теория потенциала влажности была разработана В. Н. Богословским [2]. Достоинством теории потенциала влажности является возможность учесть не только сконденсировавшуюся влагу, но и содержание влаги в материале при любом её фазовом состоянии [3]. Метод позволяет определить не только положение зоны возможной конденсации, но и количественно определить влагосодержание по толщине ограждения в широком диапазоне влажности, включая область сверхсорбционного увлажнения материалов. Однако широкое практическое применение теории потенциала влажности в инженерных расчетах сдерживается отсутствием единой методики расчета потенциалов влажности [3]. Другим недостатком теории является неопределённость значений коэффициентов влагопроводности  $\chi$  для многих существующих строительных материалов [3].

Метод расчета влажностного режима ограждающих конструкций на основе теории потенциала влажности включает следующие допущения [4]:

- рассматривается одномерный тепло- и влагоперенос в многослойной ограждающей конструкции, состоящей из  $n$  слоев различных материалов;
- принимают стационарные условия тепло- и влагопереноса в конструкции при фиксированных значениях температур и абсолютного потенциала влажности внутреннего и наружного воздуха;
- теплофизические характеристики отдельных материальных слоев в конструкции (коэффициенты теплопроводности  $\lambda$  и влагопроводности  $\chi$ ) постоянны в пределах данного слоя и ступенчато изменяются от слоя к слою;
- заданы граничные условия третьего рода – коэффициенты теплообмена и влагообмена на границах конструкции с окружающей средой.

**Постановка задачи и результаты исследований.** В данной статье представлена инженерная оценка влажностного режима ограждающей конструкции на основе теории потенциала влажности.

Для исследования влажностного режима выбрана наружная стена помещения лаборатории строительной теплофизики, находящейся на первом этаже главного корпуса Полоцкого государственного университета, и имеющая ориентацию на Север. Эта конструкция в меньшей степени подвержена прямому солнечному облучению, и условия её естественного высыхания значительно хуже, чем у стены главного фасада учебного корпуса, ориентированной на Юг, то есть вероятность образования в этой конструкции зоны конденсации значительно выше, чем у стены главного фасада. Состав конструкции представлен в таблице 1.

Таблица 1. – Характеристики материалов слоёв исследуемой наружной стены

Наименование материала слоя*	Толщина слоя $\delta$ , м	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ по условиям эксплуатации, Вт/(м·°C)	Коэффициент паропроницаемости $\mu$ , мг/(м·ч·Па)	Сопротивление теплопроводности $R_{\tau}$ , м <sup>2</sup> ·°C/Вт	Сопротивление паропроницанию $R_{\mu}$ , м <sup>2</sup> ·ч·Па/мг
1. Штукатурка из цементно-песчаного раствора $\rho=1800$ кг/м <sup>3</sup>	0,02	0,76	0,09	0,026	0,222
2. Кладка из полнотелого керамического кирпича на цементном растворе $\rho=1800$ кг/м <sup>3</sup>	0,38	0,7	0,11	0,543	3,455
3. Кладка из полнотелого силикатного кирпича на цементном растворе $\rho=1800$ кг/м <sup>3</sup>	0,13	0,99	0,11	0,131	1,182
4. Плиты минераловатные ПТМ СТБ 1995-Т5-DS(ТН)1-CS(10)40-TR15-WS1 $\rho=135$ кг/м <sup>3</sup>	0,12	0,0428	0,482	2,804	0,249
5. Армированный полиминеральный слой по СТБ 1621 $\rho=1730$ кг/м <sup>3</sup>	0,006	0,87	0,015	0,007	0,4
6. Защитно-отделочный полиминеральный слой по СТБ 1621 $\rho=1740$ кг/м <sup>3</sup>	0,006	0,87	0,02	0,007	0,3

(\*) - нумерация и последовательность расположения слоёв конструкции соответствует направлению от внутреннего воздуха помещения к наружному воздуху

Данные для таблицы 1 взяты из проекта термореновации 18.17 «Реконструкция учебно-лабораторных корпусов №-1, 2 Полоцкого государственного университета», разработанного в 2017 г. Полоцким государственным университетом. При изучении материалов проекта нами установлено, что в нём отсутствуют какие-либо расчётные показатели влажностного режима ограждающих конструкций.

Физико-математическое понятие потенциала влажности  $\theta$ , °Вл, аналогично потенциалу температуры  $t$ , °С. По аналогии с законом теплопроводности удельный поток влаги через ограждение  $G$ , кг/(м<sup>2</sup>·ч), пропорционален градиенту потенциала влажности, который учитывает все формы переноса влаги в материалах [3, 5]:

$$G = -\chi \cdot \text{grad}\theta \quad (1)$$

где  $\chi$  – коэффициент влагопроводности, кг/(м·ч·°Вл);  $\theta$  – градиент потенциала влажности, °Вл/м.

Коэффициент влагопроводности строительных материалов определяется по зависимости [3, 5]:

$$\chi = \frac{(e_{\text{int}} - e_{\text{ext}}) \cdot \mu}{\theta_{\text{int}} - \theta_{\text{ext}}} \quad (2)$$

где  $e_{\text{int}}, e_{\text{ext}}$  – соответственно упругости водяного пара с внутренней и наружной сторон слоя материала ограждения, Па;  $\theta_{\text{int}}, \theta_{\text{ext}}$  – соответственно потенциалы влажности воздуха с внутренней и наружной сторон слоя материала ограждения, °Вл;  $\mu$  – коэффициент паропроницаемости материала, кг/(м·ч·Па).

Потенциалы влажности внутреннего и наружного воздуха можно определить по аналитическим зависимостям [3, 5, 6]:

при  $t \leq 10$  °С и любой относительной влажности  $\varphi$  или при  $t > 10$  °С,  $\varphi < 80\%$  и  $0 < d \leq 20$  г/кг

$$\lg \theta = 0,057 \cdot d + 0,829$$

при  $t > 10$  °С и  $\varphi \geq 80\%$

$$\lg \theta = 0,12 \cdot d - 0,049 \cdot t + 1,056$$

Формулы получены путем аппроксимации кривых постоянных потенциалов влажности  $\theta$ , нанесенных на  $I-d$ -диаграмму влажного воздуха. Формулы получены без учёта влияния солнечной радиации на величину потенциала влажности [6].

Влагосодержание воздуха  $d$ , г/кг, можно определить по формуле [3, 5]:

$$d = \frac{\varphi}{24,39 \cdot \exp(-0,062 \cdot t)} \quad (3)$$

Максимальный сорбционный потенциал влажности, соответствующий максимальному сорбционному влагосодержанию материала при температуре  $t$ , определяется по формуле [3, 4, 7]:

$$\theta_{\max} = \frac{5314 \cdot R}{1 + 107,08 \cdot \exp(-0,106 \cdot t)} \quad (4)$$

где  $R$  – газовая постоянная водяного пара, кДж/(кг·°К)

По профилю температуры  $t(x)$  определяется профиль сорбционного потенциала влажности  $\theta(x)$  [4]. По наибольшему положительному отклонению  $\theta$  от  $\theta_{\max}$  определяется плоскость наибольшего увлажнения. Затем строится профиль относительного потенциала влажности  $\theta_{\phi}(x) = \theta(x) / \theta_{\max}(x)$ . На основе имеющихся зависимостей  $w = f(\theta_{\phi})$  строят профиль равновесного влагосодержания материалов ограждающей конструкции  $w(x)$ . Сверхсорбционное увлажнение материалов ограждающих конструкций будет при условии  $\theta(x) > \theta_{\max}(x)$ .

Поглощение влаги материалом определяется зависимостью равновесного влагосодержания  $w$ , кг/кг от абсолютного потенциала влажности  $\theta$  при разных температурах при помощи относительного потенциала влажности  $\theta_{\phi}$  [8]. С использованием зависимостей равновесного влагосодержания материала  $w$  от относительного потенциала влажности  $\theta_{\phi}$  определяется количество влаги в материале конструкции.

График зависимости  $\theta_{\phi}(x)$  для исследованной ограждающей конструкции приведён на рисунке 1.

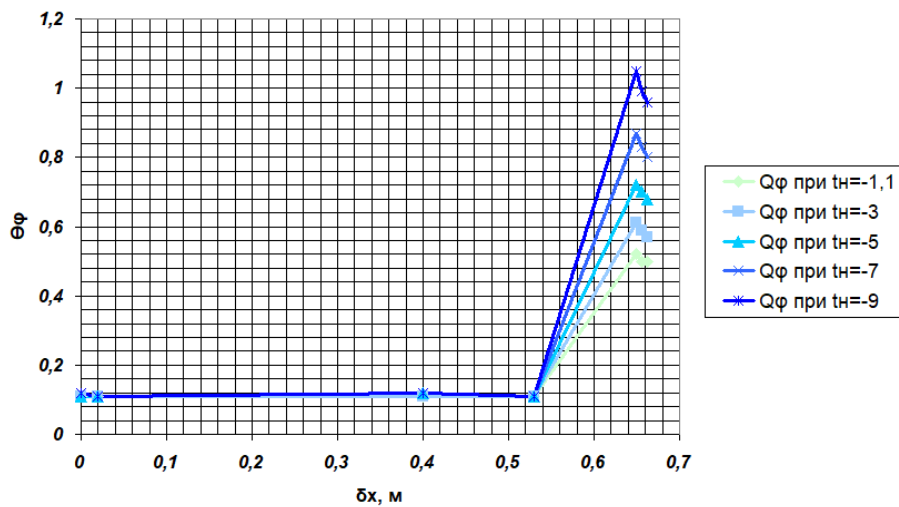


Рисунок 1. – Изменение относительного потенциала влажности  $\theta_{\phi}$  в материалах слоёв наружной стены при различных температурах наружного воздуха  $t_n$ ;  $\delta_x$  – толщина слоёв конструкции, м, отсчитываемая от внутренней поверхности стены

Из рисунка 1 видно, что превышение  $\theta$  над  $\theta_{\max}$  отсутствует при температурах наружного воздуха выше  $-9^{\circ}\text{C}$ . На стыке теплоизоляционного слоя с наружными армированным и защитно-отделочными слоями  $\theta_{\phi} \sim 1$ .

В наибольшей степени увлажнению подвергается теплоизоляционный слой (рисунок 2).

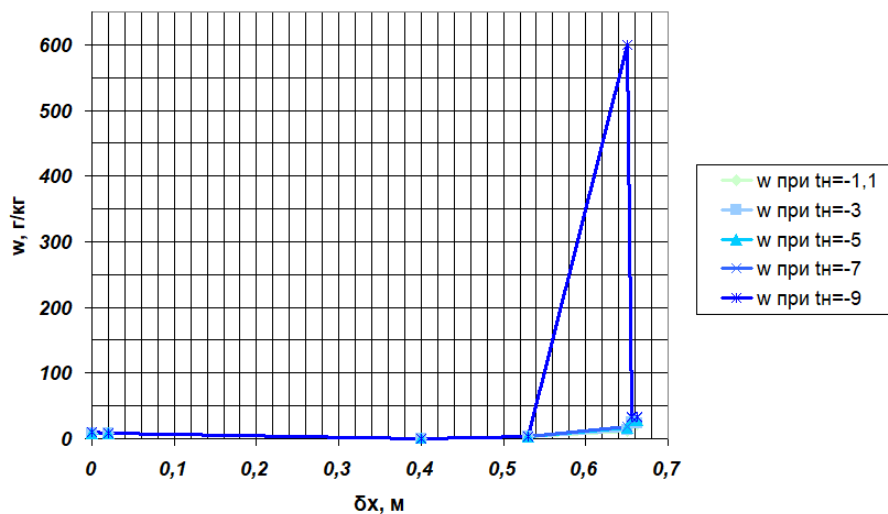


Рисунок 2. – Изменение равновесного влагосодержания  $w$ , г/кг, в материалах слоёв наружной стены при различных температурах наружного воздуха  $t_n$ ;  $\delta_x$  – толщина слоёв конструкции, м, отсчитываемая от внутренней поверхности стены

В этом слое конструкции образуется зона сверхсорбционной влажности при температурах наружного воздуха от  $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже. При этом в данном слое наблюдается переход от сорбционно-связанной влаги к капиллярной ( $\theta_{\phi} < 1,5$ ) (переход от капиллярно-связанной к свободной влаге может наблюдаться при  $\theta_{\phi} \geq 1,5$ ).

**Заключение.** Таким образом, на рассмотренном примере показано, что наряду с традиционным методом стационарной диффузии водяного пара расчёт влажностного режима методом потенциалов влажности позволяет учесть количественно и качественно содержание влаги в её различных фазовых состояниях, включая при этом сорбированную влажность и область сверхсорбционного увлажнения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Корниенко, С. В. Влагозащита ограждающих конструкций и ее повышение : монография / С. В. Корниенко ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Волгоградский государственный технический университет. – Волгоград : Изд-во ВолгГТУ, 2021. – 96 с.
2. Богословский В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) : Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1982. – 415 с.
3. Рафальская, Т. А. Определение влагонакоплений в многослойных ограждающих конструкциях на основе потенциала влажности / Т. А. Рафальская // Современное промышленное и гражданское строительство, 2019. – Том 15. – № 2. – С. 91–98.
4. Корниенко, С. В. Метод инженерной оценки влажностного режима ограждающих конструкций на основе потенциала влажности ] / С. В. Корниенко // Промышленное и гражданское строительство. – 2008. №2. – С. 46–48.
5. Кучеренко, М. Н. Применение теории потенциала влажности для расчёта переноса влаги через наружные ограждения / М.Н. Кучеренко, Е.В. Чиркова // Известия вузов. Строительство, 2013. – № 5. – С. 63–67.
6. Кучеренко, М. Н. Определение расчётных параметров наружного и внутреннего воздуха на основе теории потенциала влажности / М. Н. Кучеренко, Е. В. Чиркова, М. В. Бикунова, Г. И. Грейсух, В. В. Салмин // Региональная архитектура и строительство, 2018. – № 1. – С. 162–167.
7. Корниенко, С. В. Инженерная оценка влажности наружных стен / С. В. Корниенко // Вестник ВолгГАСУ, 2015. – Вып. 1(37). – С. 113–126.
8. Корниенко, С. В. Характеристики состояния влаги в материалах ограждающих конструкций зданий [Текст] / С. В. Корниенко // Строительные материалы, 2007. – № 4. – С. 74–76.