

УДК 699.866:692.232

*Г.Г. Фаренюк, д.т.н., с.н.с.
ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», м. Київ
О.Б. Олексієнко, ст. викл.
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка*

НОВІ НОРМИ РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУРНО-ВОЛОГІСНОГО РЕЖИМУ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Наведено вдосконалену математичну модель та алгоритм розрахунку температурно-вологісного режиму огороджувальних конструкцій з фасадною теплоізоляцією, що дозволяє більш точно описати тепловологісні процеси в багатошарових конструкціях у річному циклі експлуатації та здійснювати розрахунки можливої конденсації вологи для кожного місяця року.

Ключові слова: температурно-вологісний режим, огороджувальні конструкції, конденсація, експлуатація.

УДК 699.866:692.232

*Г.Г. Фаренюк, д.т.н., с.н.с.
ГП «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций», г. Киев
Е.Б. Олексеевко, ст. препод.
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка*

НОВЫЕ НОРМЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Приведена усовершенствованная математическая модель и алгоритм расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций с фасадной теплоизоляцией, которая позволяет более точно описать тепловлажностные процессы в многослойных конструкциях в годовом цикле эксплуатации и осуществлять расчеты возможной конденсации влаги для каждого месяца года.

Ключевые слова: температурно-влажностный режим, ограждающие конструкции, конденсація, експлуатація.

UDC 699.866:692.232

*G.G. Farenjuk, ScD, senior researcher
State Enterprise «State Research Institute of Building Structures», Kyiv
O.B. Oleksienko, senior lecturer
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University*

NEW RULES FOR CALCULATING TEMPERATURE AND HUMIDITY CONDITIONS ENCLOSING STRUCTURES

The article presents an improved mathematical model and algorithm for calculating the temperature and humidity regime envelope from the front insulation that can more accurately describe the thermal and humidity processes in multilayer structures in the annual cycle of operation and make payments possible condensation for each month of the year.

Keywords: temperature and humidity, envelope, condensation, operation.

Вступ. Одним з основних чинників, що впливають на експлуатаційну надійність і довговічність системи фасадної теплоізоляції, є вірогідність накопичення вологи в товщі стіни за річний період її експлуатації і наднормативного зволоження стіни за період із негативними середньомісячними температурами зовнішнього повітря. Накопичення вологи за річний цикл, коли зібрана за холодний період волога не встигає випаровуватися за теплу пору року, може призвести до постійного замочування стіни, що спричиняє зниження її теплоізоляційних властивостей, підвищення вологості в приміщеннях, а перемінне заморожування-відтавання вологи в структурі стіни в зоні зимових негативних температур призводить до зниження довговічності теплоефективності огорожувальної конструкції. Наднормативне зволоження стіни за холодний період року призводить до випадання конденсату в товщі утеплювача, внаслідок чого після низки циклів зволоження-висихання і заморожування-відтавання протягом короткого часу призводить до руйнування теплоізоляційного шару та штукатурного покриття.

Із метою зниження негативних наслідків зволоження конструкцій необхідно при їх проектуванні оцінювати експлуатаційний стан шляхом розрахунку температурно-вологісного режиму. Найбільшого розповсюдження у будівельній теплотехніці при розрахунках тепловологісного стану огорожувальних конструкцій отримала теорія дифузії водяної пари в сорбуючому середовищі, що була розроблена К. Ф. Фокінім [2]. Як потенціал переносу маси в цій теорії прийнято парціальний тиск водяної пари.

За умови стаціонарної дифузії водяної пари обчислення тепловологісних параметрів огорожувальних конструкцій здійснюють графоаналітичним методом, який дозволяє визначити тільки кінцеві термодинамічні можливі стани. Графоаналітичний метод покладено в основу розрахунку температурно-вологісного режиму огорожувальних конструкцій сучасних норм з теплозахисту будівель [1].

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. Недоліки графоаналітичного методу розрахунку вологісного режиму огорожувальних конструкцій: він заснований на стаціонарному режимі; математичні моделі, які описують стаціонарний процес теплопровідності та дифузії, не враховують кількість теплоти, котра витрачається на процес конденсації або випаровування.

Некоректність цього інженерного методу розрахунку полягає в тому, що він не враховує зміну парціального тиску по перетину конструкції залежно від коефіцієнта паропроникнення окремих шарів. Крім цього, лінійна залежність зміни парціального тиску водяної пари в порах огороження передбачає стаціонарний процес її дифузії від повітря з вищим парціальним тиском до повітря з нижчим тиском. Проте в разі

конденсації або випаровування водяної пари в огороженні лінійна залежність дотримуватися не буде. За допомогою цього методу не можна коректно визначити кількість вологи, яка конденсуватиметься в огороженні, оскільки розрахунок проводиться для однорідного огороження, і характерна зміна парціального тиску в огороженні не враховує процес конденсації вологи в стіні.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Головною причиною численних пошкоджень, пов'язаних із зволоженням конструкцій будівлі, є конденсація водяної пари [3, 4]. Спектр ушкоджень, що виникають унаслідок конденсації вологи, виявляється від невеликої появи цвілі в кутах приміщень через зниження опору теплопередачі шарів теплоізоляції (конденсація внаслідок недостатніх термічних властивостей конструкції або її окремих зон) до повного зволоження зовнішніх стін унаслідок конденсації у товщі конструкції [5, 6]. Замість переважно однорідних зовнішніх стін почали застосовувати багатошарові фасадні системи, у товщі яких при неправильній конструкції та монтажі утворюється і накопичується конденсат.

Постановка завдання. Мета роботи – удосконалити математичну модель та алгоритм розрахунку температурно-вологісного режиму огорожувальних конструкцій. Для досягнення поставленої мети розв'язувалися такі наукові завдання: виконати аналіз фізичних процесів, які характеризують формування температурно-вологісного режиму огорожувальних конструкцій, уточнити математичну модель розрахунку температурно-вологісного режиму конструкції фасадної теплоізоляції з урахуванням річного циклу експлуатації.

Основний матеріал і результати. При проектуванні багатошарових зовнішніх огорожень слід вживати заходи щодо:

- запобігання можливості зволоження матеріалів огорожувальної конструкції;
- уникнення можливості конденсації водяної пари на внутрішній поверхні огорожувальної конструкції;
- запобігання можливості конденсації водяної пари в товщі огорожувальної конструкції;
- забезпечення умови від'ємного або нульового річного балансу вологи в товщі огорожувальних конструкцій (умови виведення за період вологовіддачі всієї вологи, що сконденсувалася за період вологонакопичення).

Розрахунок температурно-вологісного стану багатошарових конструкцій виконують аналогічно до розрахунку тепловлогісного стану одношарових конструкцій із такими допущеннями:

- розрахунок здійснюють за стаціонарними умовами дифузії водяної пари;
- конструкція є плоскою та термічно однорідною;
- опори паропереходу внутрішньої та зовнішньої поверхонь конструкції дорівнюють нулю;

– у межах однорідного шару конструкції парціальний тиск насиченої водяної пари змінюється за лінійним законом;

– якщо має місце конденсація вологи в товщі конструкції, то вона триває або на межі двох сусідніх шарів (зона конденсації – площина) або зона конденсації має товщину, що дорівнює товщині певного шару (зона конденсації – шар).

Спочатку виконують розрахунки згідно з нормативним документом [1], для зовнішніх огорожувальних конструкцій опалюваних будинків обов'язкове виконання умови

$$\Delta w \leq \Delta w_d, \quad (1)$$

де Δw – збільшення вологості матеріалу в товщі шару конструкції, в якому може відбуватися конденсація вологи, за холодний період року, відсоток за масою;

Δw_d – допустиме за теплоізоляційними характеристиками збільшення вологості матеріалу, в шарі котрого може відбуватися конденсація вологи, відсоток за масою, що встановлюється згідно з таблицею 8 [1] залежно від виду матеріалу.

Для від'ємного або нульового річного балансу вологи в товщі огорожувальних конструкцій запропоновано виконання умови

$$W_{зп} \leq W_{лп}, \quad (2)$$

де $W_{зп}$ – кількість накопиченої в товщі огорожувальної конструкції вологи, що сконденсувалася за період вологонакопичення року, $\text{кг}/\text{м}^2$;

$W_{лп}$ – кількість вологи, яка випаровується з огорожувальної конструкції за період вологовіддачі року, $\text{кг}/\text{м}^2$.

Розрахунок тепловологісного стану огорожувальних конструкцій будинків здійснюють за стаціонарними умовами дифузії водяної пари. Його починають з аналізу умов дифузії водяної пари найбільш холодного місяця року, для чого виконують такі розрахунки:

1. Визначають опори паропроникненню кожного шару R_{ex} та конструкції в цілому R_{Σ} , $(\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{Па})/\text{мг}$.

2. Обчислюють розрахункові значення температури t_b , $^{\circ}\text{C}$, та відносної вологості ϕ_b , %, внутрішнього повітря [1, додаток Г].

3. Визначають розрахункові значення температури t_3 , $^{\circ}\text{C}$, та відносної вологості ϕ_3 , %, зовнішнього повітря як кліматичні параметри січня згідно з ДСТУ-Н Б В.1.1-27.

4. Обчислюють розподіл температур $t(x)$, $^{\circ}\text{C}$, по товщині конструкції.

5. Розрахунок опорів теплопередачі R_{Σ} і R_x виконують відповідно до рекомендацій нормативного документа [1, додатку И].

6. Визначають парціальний тиск насиченої водяної пари E , Па, на внутрішній (E_b) та зовнішній (E_3) поверхнях огорожувальної конструкції й

на всіх інших межах шарів (E_x), за розподілом $t(x)$ згідно з нормами [1, додаток Б, таблиця Б.1].

У довільному масштабі викреслюють умовний переріз огорожувальної конструкції, у якому товщина кожного шару дорівнює його значенню опору паропроникненню.

На осі, паралельній лініям меж шарів, задають шкалу парціального тиску p , Па, та на відповідних межах відкладають значення E_x . Ці значення з'єднують ламаною – лінією E .

Визначають парціальні тиски водяної пари e , Па, на внутрішній (e_B) і зовнішній (e_3) поверхнях огороження відповідно за формулами

$$e_B = 0,01 \cdot \varphi_B \cdot E_B; \quad (3)$$

$$e_3 = 0,01 \cdot \varphi_3 \cdot E_3. \quad (4)$$

Отримані значення e_B та e_3 відкладають на умовному перерізі у масштабі шкали p і з'єднують відрізком прямої – лінією e .

У разі, якщо лінії E та e не перетинаються, то конденсація водяної пари в товщі огорожувальної конструкції відсутня й умови (1) та (2) слід вважати виконаними.

У разі, якщо лінії E й e перетинаються, то в товщі конструкції утворюється зона (або зони) конденсації водяної пари, подальший розрахунок проводять за такою методикою.

З точок e_B та e_3 проводять дотичні до лінії E . Точки дотику позначають як p_B і p_3 відповідно.

Якщо точки дотику збігаються ($p_B = p_3 = p_K$), то ламана $e_B p_K e_3$ являє собою лінію розрахункового розподілу парціального тиску водяною пари в товщі конструкції, а зона конденсації – площину, що проходить через точку p_K (рис. 1, а).

Якщо точки дотику не збігаються ($p_B \neq p_3$), але вони належать одній ланці лінії E , то лінією розрахункового розподілу парціального тиску водяної пари в товщі конструкції буде ламана $e_B p_B p_3 e_3$, а зона конденсації являтиме собою шар, що знаходиться між точками p_B і p_3 (рис. 1, б).

Якщо точки дотику обох дотичних не збігаються ($p_B \neq p_3$) та знаходяться на різних ланках лінії E , то в товщі огороження утворюються окремі ізольовані зони конденсації водяної пари (рис. 1, в).

Для зони (або зон) конденсації виконують розрахунок приросту вологи за період τ , год, розрахункового місяця року. Так, наприклад, зона конденсації – площина між шарами 2 та 3 (рис. 1, а):

1. Кількість водяної пари i_B , мг/(м²·год), що надходить до зони конденсації зі сторони приміщення,

$$i_B = \frac{e_B - p_K}{R_{eB}}. \quad (5)$$

2. Кількість водяної пари i_3 , мг/(м²·год), яка виводиться назовні із зони конденсації,

$$i_3 = \frac{p_k - e_3}{R_{e3}} \quad (6)$$

3. Кількість вологи W , кг/м², що конденсується у конструкції за розрахунковий місяць,

$$W_{\text{зп}} = \tau(i_{\text{в}} - i_3) \cdot 10^{-6}, \quad (7)$$

де τ – час, за який відбувається вологонакопичення, розрахунковий місяць.

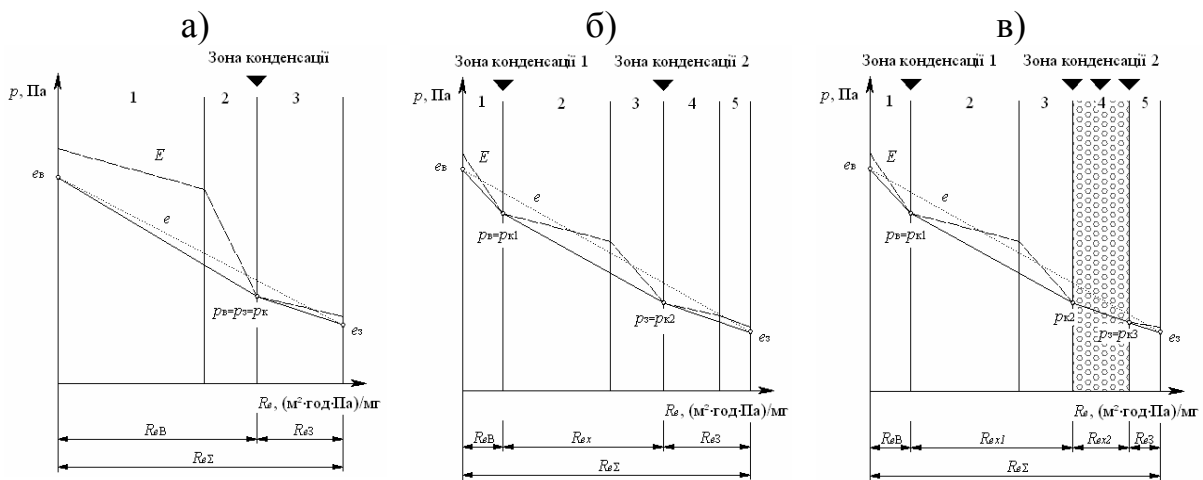


Рис. 1. Графічний спосіб розрахунку кількості накопиченої огорожувальною конструкцією вологи за розрахунковий місяць W , кг/м²:

а) точки дотику збігаються ($p_{\text{в}} = p_3 = p_k$);

б) точки дотику не збігаються ($p_{\text{в}} \neq p_3$);

в) точки дотику обох дотичних не збігаються ($p_{\text{в}} \neq p_3$)

Алгоритм розрахунку визначення кількості накопиченої огорожувальною конструкцією вологи за розрахунковий місяць W , кг/м², для можливих варіантів зон конденсації наведений у ДБН-Н Б В.2.6 «Настанова з розрахункової оцінки тепловологісного стану огорожувальних конструкцій».

У випадку наявності конденсації водяної пари при розрахунку для найбільш холодного місяця року згідно з ДСТУ-Н Б В.1.1-27 аналогічні графічні побудови слід робити для всіх місяців року, в яких має місце конденсація вологи в товщі огороження. Ці місяці складають період накопичення вологи в конструкції.

Місяці, в котрих конденсація вологи не відбувається, складають період вологовіддачі. Розрахунки кількості вологи, що випаровується з конструкції за цей період, починають з першого місяця, що настає після закінчення періоду вологонакопичення.

Для розрахунку кількості вологи, яка випаровується за відповідний місяць із зон конденсації, котрі утворилися за період накопичення вологи, приймають парціальний тиск водяної пари в межах кожної зони таким, що дорівнює тиску насиченої водяної пари, відповідно до температури в цій зоні.

Будується лінія падіння парціального тиску в товщі огородження; $e_B E_1 E_2 \dots E_j \dots E_N e_3$, де $E_1, E_2, \dots, E_j, \dots, E_N$ – тиски насиченої водяної пари у відповідних зонах конденсації, N – кількість зон конденсації у товщі огородження.

Якщо j -та зона конденсації – шар, то для побудови лінії падіння парціального тиску приймається середня температура у шарі, E_j відкладається посередині шару, а зона конденсації – шар замінюється на зону конденсації – площину (рис. 2, а).

За умови, якщо парціальний тиск водяної пари внутрішнього повітря e_B буде більшим, ніж тиск насиченої водяної пари в зоні конденсації p_K , та кількість водяної пари, що надходить до зони конденсації, менша, ніж видаляється, процес випаровування вологи слід вважати таким, що йде тільки у напрямку до зовнішнього повітря (рис. 2, б).

За умови, якщо парціальні тиски водяної пари внутрішнього повітря e_B та зовнішнього повітря e_3 менші, ніж тиск насиченої водяної пари в зоні конденсації p_K , то процес випаровування вологи слід вважати таким, що йде в обох напрямках (рис. 2, в).

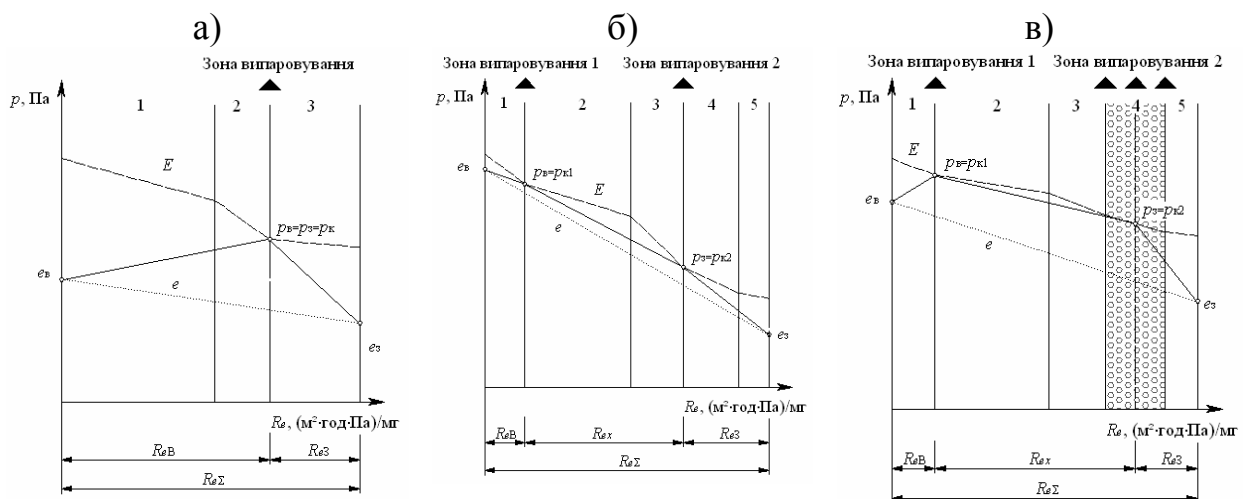


Рис. 2. Графічний спосіб розрахунку визначення кількості вологи, що випаровується за розрахунковий місяць періоду вологовіддачі

Так, наприклад, кількість водяної пари i_B , мг/(м²·год), яка видаляється із зони конденсації в сторону приміщення, дорівнює (рис. 2, а)

$$i_B = \frac{p_K - e_B}{R_{eB}} \quad (8)$$

Кількість водяної пари i_3 , мг/(м²·год), що виводиться назовні із зони конденсації, дорівнює

$$i_3 = \frac{p_K - e_3}{R_{e3}}. \quad (9)$$

Кількість вологи W , кг/м², яка випаровується із зони конденсації за розрахунковий період,

$$W_{\text{пл}} = \tau \cdot (i_B + i_3) \cdot 10^{-6}. \quad (10)$$

Алгоритм розрахунку кількості вологи, що випаровується за розрахунковий місяць періоду вологовіддачі для найбільш розповсюджених варіантів конструкцій, наведено в ДБН-Н Б В.2.6 «Настанова з розрахункової оцінки тепловологісного стану огорожувальних конструкцій».

Після розрахунку кількості вологи, яка випарилася протягом місяця з кожної зони конденсації, визначають баланс вологи в зонах конденсації на початок наступного місяця періоду вологовіддачі.

Якщо в усіх зонах баланс від'ємний, то це свідчить, що з конструкції випарилася уся волога, яка накопичилася в ній за період вологонакопичення, тобто виконується умова (1).

Якщо ж у конструкції залишалася волога, то визначають зони конденсації на початок наступного місяця і кількість вологи у кожній зоні. Після чого виконують розрахунок для наступного місяця періоду вологовіддачі. Розрахунок закінчується місяцем, для якого виконується умова (2). Якщо умова (2) не виконується протягом періоду вологовіддачі, це свідчить, що конструкція не задовольняє вимоги норм [1].

Порівняння існуючої методики розрахунку тепловологісного режиму із запропонованою наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Порівняння існуючої методики розрахунку тепловологісного режиму із запропонованою

Характеристики	ДБН В.2.6-31:2006	Нова методика розрахунку
Збільшення вологості матеріалу в товщі шару конструкції	$\Delta w \leq \Delta w_d$	$\Delta w \leq \Delta w_d$
Річний баланс вологи в товщі шару конструкції		$W_{\text{зп}} \leq W_{\text{лп}}$
Температурно-вологісний розрахунок	Розрахунок виконується для періоду із середньодобовими температурами $\leq 8^\circ\text{C}$	Розрахунок ведеться для кожного місяця року окремо
Розрахунок висихання вологи в конструкції	Не передбачено	Передбачено

- Висновки.** Відмінність від методики нормативного документа [1]:
- нова і більш точна методика розрахунку;
 - розрахунок можливої конденсації вологи здійснюють для кожного місяця року;
 - вводиться розрахунок випаровування вологи в теплий період року;
 - вводиться поняття річного балансу вологи.

Перевагою запропонованого методу розрахунку є простота, ясність і наочність, а також функціональний зв'язок з теплотехнічним розрахунком. До цього слід додати, що такий метод дає більше інформації про процеси дифузії та конденсації, ніж традиційний графічний метод, і є більш точним, тому що розрахунок виконують з урахуванням річного циклу експлуатації. З іншого боку, поряд із зазначеними перевагами методу наявні ускладнення розрахунку і збільшення часу його виконання.

Література

1. ДБН В.2.6-31: 2006. *Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель.* – К.: Мінбудархітектури України, 2006. – 71 с.
2. Фокин К.Ф. *Строительная теплотехника ограждающих частей зданий* / К.Ф. Фокин. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.
3. Шнайдель, К. *Диффузия и конденсация водяного пара в ограждающих конструкциях* / К. Шнайдель; [пер. с нем. В. Г. Бердичевского]. – М.: Стройиздат, 1985. – 48 с.
4. DIN 4108. *Warmeschutz im Hochbau. Deutsche Norm, 2008.* – 34 p.
5. EN ISO 10456-99 *Thermal insulation – Building materials and products – Determinations of declared and design thermal values, 2000.* – 26 p.
6. BS 5250: 2002. *British Standard Code of practice for Control of condensation a buildings, 2002.* – 90 p.

Надійшла до редакції 09.10.2013
© Г.Г. Фаренюк, О.Б. Олексієнко