

АРХІТЕКТУРА ТА ІНЖЕНЕРНІ ВИШУКУВАННЯ

УДК 91.120.10

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІСНУЮЧИХ УТЕПЛЮВАЧІВ В БАГАТОШАРОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЗОВНІШНЬОЇ СТІНИ

І.А. Височин, к.т.н., доцент, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

Розроблена методика і програма розрахунку тепло-вологісного стану багатошарових огорожувальних конструкцій в нестационарному режимі дозволяють проводити аналіз та експертизу прийнятих проектних рішень з теплової ізоляції будівель та споруд.

Постанова проблеми у загальному вигляді.

При розробці математичного опису фізичної моделі нестационарного тепло-і вологопереносу в огорожувальних конструкціях завжди виникає необхідність дослідження залежності теплотехнічних параметрів будівельних матеріалів від зміни в часі температури і вологості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Залежності коефіцієнтів теплопровідності і вологопровідності будівельних матеріалів, оброблені у вигляді таблиць, подано проф. А.У. Франчуком в [1]. Е.Шільд в своїй роботі [2] згрупував відомі на той момент (1982 р.) будівельні матеріали з щільністю, структурою, сорбційними властивостями і наводять таблицю емпіричних коефіцієнтів залежності зміни коефіцієнта теплопровідності від приросту ваговій та об'ємній вологості. Однак в останні два десятиліття на Українському ринку будівельних матеріалів з'явилася багато нових теплоізоляційних матеріалів, наприклад піноізол, залежності змін коефіцієнтів теплопровідності від вологості для яких вимагають уточнення, а отже потрібно і методика визначення цих залежностей. Автори [1,3] приводять в основному табличні дані залежностей теплофізичних параметрів від вологості і температури, які практично неможливо використовувати при комп'ютерному моделюванні, проте вони є великою допомогою при виведенні кореляційних залежностей. У практиці широко поширені, інженерні методи вирішення задач нестационарної теплопередачі, такі як методи кінцевих різниць, методи експериментальних аналогій та ін. Так для рішення двох- і тривимірних задач теплопровідності В.Н. Богословським [3] пропонується метод суперпозиції, який полягає в підсумовуванні простих рішень, які відповідають приватним складовим загальної задачі. Для розрахунку температурного поля багатошарових огорожень В.Н. Богословським в [3] розглянуто метод електротеплової аналогії. Цей метод заснований на аналогії математичного запису двох різних фізичних явищ - передачі тепла теплопровідністю, що підкоряється закону Фур'є ($q = \frac{\Delta T}{R}$) електропровідності, визначається законом Ома ($I = \frac{\Delta U}{R}$). Цю аналогію використовують для відтворення теплового процесу електричним, яким легше керувати і вимірювати всі його параметри.

Реальні процеси-теплообміну протікають у вологих багатошарових огороженнях при найрізноманітніших зміни в часі граничних умов.

Якщо для простих випадків теплопередачі в огороженнях знайдені аналітичні рішення [3, 4, 5], то розгляд процесів теплообміну, ускладнених масообміном, в багатошарових огороженнях аналітичним шляхом вирахувати практично неможливо. Тому в практиці поширені інженерні способи вирішення завдань нестационарної теплопередачі: метод гідралічних аналогій, метод кінцевих різниць та інші, розрахунки за якими використовуються для розробки програмних комплексів для ПЕОМ.

Метод гідралічних аналогій розроблений і запропонований проф. В.С. Лук'яновим [6]. Метод заснований на заміні досліджуваного явища гідралічним, аналогічним йому з математичного опису. Виклад основ методу на прикладі теплогідралічної аналогії наводиться В.Н. Богословським в [3]. Суть методу полягає в аналогії процесу зміни температури, внаслідок теплопровідності при розбитті поля на елементарні шари і гідралічного процесу ламінарного протікання води з однієї судини в іншу. Для відтворення теплового процесу складається гідромодель у вигляді ланцюжки з судин, з'єднаних між собою, гідралічними опорами і по зміни рівнів води в судинах визначають зміни температур відповідних елементарних шарів огорожі. Масштаби, що визначають відповідність між рівнями води і температурою гідралічними і термічними опорами і ємностями, а також масштаби часу задаються довільно або визначаються параметрами гідралічної моделі. Метод гідралічної аналогії можна використовувати для відтворення різних за граничними умовами теплових процесів, однак, із-за складності моделювання незручний, для: оперативного визначення; ефективності огорожувальних конструкцій в передпроектних дослідженнях. Процеси тепло-і вологообміну, що відбуваються в огорожувальних конструкціях будівель, завдяки розробкам вітчизняних вчених - будівельних фізиків в даний час вивчені і розглянуті досить повно, проте методика теплотехнічного проектування огороження ось вже протягом більше двадцяти років залишається практично незмінною. В основі методики теплотехнічного розрахунку огороження по СНиПах покладена стаціонарність

процесів тепло-і масопереносу, що не в повній мірі відповідає істинної фізичної картині процесів, реально протікаючих в огорожувальних конструкціях, в процесі їх експлуатації.

Існуючі на ринках України низькотеплопровідні теплоізоляційні матеріали. Найбільш дієвим способом підвищення енергоефективності будівель та інженерних споруд є застосування тришарових огорожувальних конструкцій з використанням ефективних теплоізоляційних матеріалів в якості середнього шару. При відносно невеликих матеріальних вкладеннях, застосування теплоізоляційної продукції дозволяє істотно підвищити рівень комфортності, тепло-і звукоізоляцію житлових будівель. Крім того, це дозволяє скоротити експлуатаційні витрати, тобто домогтися вагомою економії тепла. Такі чинники експлуатації будівель, як температурний і вологісний режим, наявність навантажень, деформаційних впливів агресивних хімічних агентів пред'являють різні вимоги до теплоізоляційних матеріалів. Відповідно до цих вимог і здійснюється вибір типу матеріалу. У сучасному будівництві використовується широкий спектр теплоізоляційних матеріалів, як на комірчаній, так і на волокнистій основі. У ніздрюватих (спінених) матеріалах можуть використовуватися як мінеральні компоненти, так і органічні полімери. Тут найбільше поширення набули теплоізоляційні матеріали на основі пінополістиролу (вспіненого або екструдованого), пінополіуретану і спінених каучуків, піногазо-і комірчастих бетонів. У волокнистих матеріалах, як правило, використовується тверда основа мінерального походження. Це можуть бути базальтові гірські породи, доменні шлаки або скло. Фізико-технічні властивості використовуваних в будівництві теплоізоляційних матеріалів роблять визначальний вплив на теплотехнічну ефективність і експлуатаційну надійність конструкцій, трудомісткість монтажу, можливість ремонту в процесі експлуатації.

Основними показниками, що характеризують властивості матеріалів є: щільність, теплопровідність, паропроникність, міцність на стиск при 10% деформації для жорстких виробів, морозостійкість, гідрофобність і водостійкість. Крім того, теплоізоляційні матеріали в конструкціях утеплення будинків повинні відповідати вимогам пожежної безпеки по СНиП 2.01.02-85, мати гігієнічні сертифікати, не виділяти токсичні речовини в процесі експлуатації і при горінні.

Згідно з рекомендаціями територіальних нормативів по енергоспоживанню і теплозахисту Київської області здійснювати вибір відповідного рівня теплозахисту будівлі з урахуванням можливостей бази будівельної індустрії регіону, при зведенні тришарових огорожувальних конструкцій застосовуються, в основному, ефективні теплоізоляційні матеріали місцевого виробництва: пінополістирол, піноізол (теплоізоляції) і мінера-

льна (Базальтова) вата. Теплофізичні властивості будівельних матеріалів та їх вплив на температурно-вологісний режим огорожувальних конструкцій багаторазово досліджувалися іще в роботах радянських вчених. Процеси тепло-і вологопереносу в одношарових і багатошарових огорожувальних конструкціях в стаціонарних і нестаціонарних умовах досить глибоко вивчені в роботах: В.Д. Мачинського [22], В.Н. Богословського [3,7], О.Е. Власова [8], А.В. Ликова [10,11,12,13,14], В.М. Ільїнського [9], А.У. Франчука [1], К.Ф. Фокіна, [15,16] і ін. Автори наводять різні методики для аналітичного розрахунку теплопередачі і вологопередачі в огорожувальних конструкціях при стаціонарних і нестаціонарних умовах. В роботах В.Д. Мачинського [22] вперше розглянуто процес дифузії водяної пари в огорожувальній конструкції за рахунок різниці тисків на внутрішній і зовнішній поверхні огороження, який став невід'ємною частиною всіх вологісних розрахунків огорожувальних конструкцій.

В роботах К.Ф. Фокіна [15,16] розглянуті методи розрахунку температурних полів в огорожувальних конструкціях і методи вологісного розрахунку огорожувальних конструкцій в стаціонарних і нестаціонарних умовах. К.Ф. Фокін на основі стаціонарного вологісного режиму вперше запропонував метод визначення зони конденсації водяної пари в товщі огороження. Відносна простота фізико-математичної моделі цього методу зумовила його широке застосування в методиках розрахунку, пропонованих будівельними нормами і проводами з проектування для оцінки вологісного стану огорожувальних конструкцій (наприклад в «Будівельна теплотехніка» [17]). Метод розрахунку нестаціонарного вологісного режиму огорожі, пропонований К.Ф. Фокіним в [16], отримав назву «методу послідовного зволоження», так як розглядає послідовна зміна в часі вологості матеріалу і пружності водяної пари з одного й іншого боку огороження.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.

1. Втрати тепла за рахунок інфільтрації повітря через зовнішні огороження становлять істотну частку (30-40%) в балансі теплових втрат будівлі, в зв'язку з чим питання підвищення теплової, захисту огорожувальних конструкцій є досить актуальним завданням. Сучасна концепція енергозбережень в будівельній індустрії диктує необхідність розробки енергоефективних огорожуючих конструкцій, з використанням ефективних теплоізоляційних матеріалів.

2. Нормативні документи пред'являють високі вимоги до рівня теплового захисту будівель і вимагають використання в розрахунках тільки розрахункових значень теплотехнічних параметрів (коефіцієнта теплопровідності, паропроникності, вологовміст і т.д.), обраних з урахуванням умов експлуатації приміщень і зон вологості ра-

йону будівництва. Однак нормами практично не враховуються коливання температури і вологості в товщі огороження внаслідок особливостей кліматичних умов експлуатації, а також вплив інших суб'єктивних факторів, що виникають при експлуатації будівель (несправності вентиляції, аварії тепло-і водопостачальних мереж, нестаціонарність процесів тепломасопереносу в огорожувальних конструкціях і т.п.). Відхилення параметрів вологісного режиму від прийнятого при проектуванні, в першу чергу, можуть позначитися на дійсною величиною коефіцієнтів теплопровідності матеріальних шарів і опору теплопередачі огорожі. Отже, проектування огорожувальних конструкцій згідно існуючих нормам не є безумовною гарантією їх експлуатаційної надійності, а відсутність на стадії проектування моделювання нестаціонарних тепло- вологісних процесів, що протікають в конструкціях під час експлуатації, з урахуванням кліматичних особливостей району будівництва призводить до збільшення тепловтрат і до передчасного старіння конструкцій.

3. Розроблені та впроваджуються різні способи підвищення енергоефективності огорожувальних конструкцій, засновані на переважному використанні багатошарових конструкцій з низькотеплопровідними матеріалами, проте для оцінки їх ефективності потрібна методика розрахунку основних теплотехнічних параметрів матеріалів, що впливають на динаміку теплообміну і вологообміну між матеріальними шарами будівельних конструкцій і навколишнім середовищем, в експлуатаційних (нестационарних) умовах.

Формулювання цілей статті.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання: - провести аналіз літературних джерел та сучасних публікацій з метою вивчення стану питання про методи дослідження спільних тепловологових процесів, що протікають в багатошарових огорожувальних конструкціях в нестаціонарному режимі; - шляхом узагальнення обґрунтованих положень існуючих теорій тепло, і вологопереносу в багатошарових огорожувальних конструкціях, при граничних умовах, максимально наближених до експлуатаційних, розробити фізико-математичну модель спільного тепловологісного розрахунку для реалізації її в комп'ютерних програмах об'єктного моделювання; - провести обробку табличних даних з метою отримання функціональних залежностей парціального тиску насичених парів, сорбційної вологості, теплопровідності і волого провідності будівельних матеріалів від температури і вологості, необхідних для комп'ютерного моделювання; - розробити методику визначення залежності коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів від сорбційної вологості в лабораторних умовах і отримати функціональні залежності для матеріалів - пінополістиролу і піноізолау.

Методи дослідження. У роботі, крім стандартних методик, застосовувалися методи математичної статистики, комп'ютерного моделювання, лабораторні та тепловізійні дослідження.

Наукова новизна роботи: - розроблена нова методика визначення залежності теплопровідності теплоізоляційних матеріалів від сорбційної вологості в лабораторних умовах; - результати програми розробленої методики в ряді прикладних задач, що розглядають варіанти тришарових огорожувальних конструкцій з теплоізоляційними матеріалами і з урахуванням особливостей кліматичних умов;

Теоретичні основи фізико-математичної моделі розрахунку тепловологісного режиму огорожувальних конструкцій будинків в нестаціонарних умовах.

Для складання фізико-математичної моделі комп'ютерного розрахунку нестаціонарної тепло і волого передачі в багатошарових огорожувальних конструкціях використані теоретичні основи і обґрунтовані положення теорій К.Ф. Фокіна, А.В. Ликова, В.Н. Богословського, а також результати досліджень теплофізичних властивостей будівельних матеріалів А.У.Франчука.

Визначення опору теплопередачі багатошарової огорожувальної конструкції з урахуванням вологості матеріалів. Теплозахисні властивості шару огорожувальної конструкції визначаються ставленням товщини шару (d) до його коефіцієнту теплопровідності, (λ) - $\frac{d}{\lambda}$ яке називається опором теплопередачі. Опір теплопередачі багатошарової огорожувальної конструкції визначається за формулою:

$$R = \frac{d}{\lambda} + \frac{d}{\lambda} + \dots + \frac{d}{\lambda} = R_1 + R_2 + \dots + R_N \quad (1.1)$$

де d_1, d_2, d_n - товщина шарів огорожувальної конструкції,

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_n$ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу шарів огорожувальної конструкції;

R_1, R_2, R_n - опір теплопередачі шарів огорожувальної конструкції.

Потоки постійно знаходяться в русі повітря (внаслідок конвекції всередині приміщення і вітрових впливів зовні) гальмуються перед поверхнею конструкції. Малорухливе повітря має більш високу теплоізоляційну здатність, ніж швидко рухливе, тому зони більш повільного руху повітря безпосередньо перед поверхнею конструкції діють як додаткові теплозахисні шари [108] для характеристики яких введено поняття опору теплообміну визначається як $\frac{1}{\alpha}$ біля внутрішньої поверхні огорожі, і опір сприйняттю, яке визначається як $\frac{1}{\alpha}$ -зовні. Загальний опір теплопередачі огорожі R_0 з урахуванням теплообміну і теплосприйняття визначається з виразу:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha} + \sum \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha} \quad (1.2)$$

У виразах (1.1), (1.2) коефіцієнт теплопрові-

дності λ характеризує властивість матеріальних шарів проводити тепло. У товщі вологого будівельного матеріалу передача тепла відбувається кількома шляхами. Через твердий скелет, а також плівки рідкої води тепло передається за допомогою теплопровідності, а в порах заповнених вологим повітрям, крім теплопровідності - конвекцією і випромінюванням. При вологообміні тепло може переноситися у вигляді рідкої і пароподібної води. Тому коефіцієнти теплопровідності окремих видів матеріалів залежать від хіміко-мінералогічного складу утворюючих речовин, щільності, температури і вологості матеріалу. Однак, якщо щільність і мінералогічний склад матеріалів порівняно постійні в часі то вологість і

температура матеріалів при експлуатації постійно змінюються. Різні дослідники дають емпіричні формули залежності коефіцієнта теплопровідності від вологості для окремих матеріалів. Для визначення коефіцієнта теплопровідності вологого матеріалу λ_w в [108] наводиться залежність

$$\lambda_w = \lambda * (1 + W * Z / 100) \quad (1.3)$$

де λ - теплопровідність сухого матеріалу; W - вагова вологість матеріалу (вологівміст),%; Z - коефіцієнт збільшення теплопровідності на 1% вологості. Е. Шільд в [2] згрупував найбільш часто застосовуємі в огорожувальних конструкціях матеріали по щільності і структурі і приводить чисельні значення Z , показані в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Залежність коефіцієнта теплопровідності від вологості матеріалів.

№ п/п	Найменування будівельних матеріалів	Приріст Z на 1% вологості
1	Цегла : повнотіла пустотіла	20 12,5
2	Бетон; силікатна цегла; газобетон; шлакобетон; пемзобетон; деревобетон.	12,5
3	Гіпсові плити	12,5
4	Деревостружкові плити; деревоволокнисті плити; плити з деревної шерсті; солом'яні або комишитові пустотілі плити. Інші органічні волокнисті утеплювачі.	1
5	Пробкові плити	1
6	Неорганічні волокнисті утеплювачі	2
7	Спінені штучні матеріали	2

Однак, для теплоізоляційних матеріалів нового покоління, таких як піноізол, нові різновиди пінополістиролу і т.п., потрібно уточнення залежності (1.3) і значень Z . Значення коефіцієнта Z визначається експериментальним шляхом індивідуально для кожного матеріалу, проте в ГОС-Тах на будівельні матеріали немає стандартної методики для визначення залежності коефіцієнта теплопровідності від ступеня зволоження матеріалу. Через обмеженість цих даних про теплоізоляційні матеріали нового покоління в літературі та відсутність їх у нормативних документах залежність (1.3) для піноізолу і пінополістиролу київського виробництва. Зразки теплоізоляційного

матеріалу розміром (25x25x5) см, висушені при температурі $(100 \pm 5) ^\circ\text{C}$ і попередньо зважені, витримувалися в щільно закритій камері з сітчастою підставкою над шаром води (рис. 1.1) протягом 6 годин, потім виймалися, зважувалися (для визначення поточної сорбційної вологості) і ментально піддавалися випробуванню на вимірник термічного опору (теплопровідності) будівельних матеріалів ІБК-У. Далі випробування повторювалися з витримуванням зразків над водою протягом 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48 і т.д. годин до досягнення зразками максимальної сорбційної вологості.

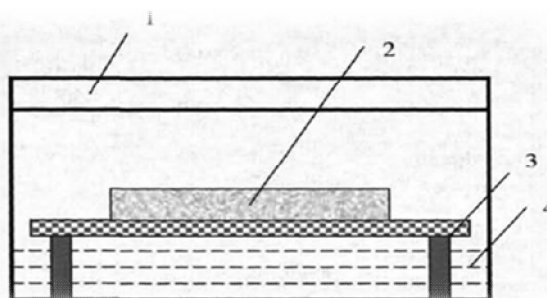


Рис.1.1. Камера для сорбційного зволоження зразків. 1 - камера з щільно закривається кришкою; 2 - випробуваний зразок; 3 - сітчаста підставка, 4 - вода.

В результаті апроксимації отриманих результатів отримана емпірична залежність коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матері-

алів від вагової вологості, яка має вигляд: $\lambda_w = \lambda * (1 + kW)$ де λ і W теж, що і в (1.3), k - коефіцієнт змінної, який визначається для кожного теп-

лоізоляційного матеріалу. Наприклад, для матеріалів київського виробництва k становить 0,046

для піноізолу і 0,033 для пінополістиролу (рис. 1.2).

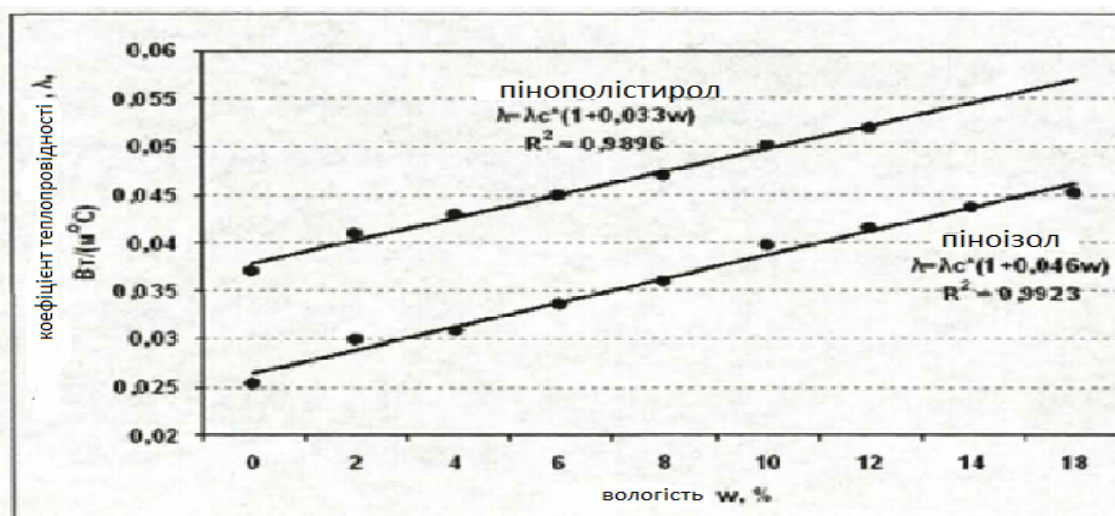


Рис. 1.2. Залежність коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів від сорбційної вологості.

Для зовнішнього (декоративного) шару багатшарових огорожувальних конструкцій не менш важлива залежність теплопровідності від температури, так як при негативній температурі теплопровідність матеріалів при аналогічній вологості має більш високі значення. Шляхом апроксимації результатів досліджень зміни теплопро-

відності будівельних матеріалів залежно від температури і вологості А.У. Франчука, наведених в [1], отримані залежності виду (2.4) коефіцієнта теплопровідності від вагової вологості при позитивних і негативних температурах для силікатної цегли щільністю 1700 кг/м³ (рис.1.3)

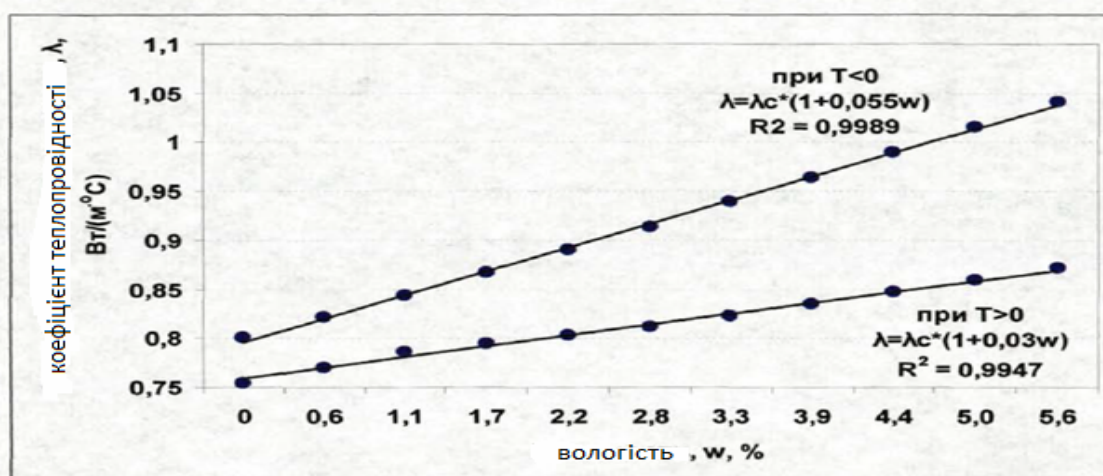


Рис. 1.3. Залежність коефіцієнта теплопровідності силікатної цегли щільністю 1700 кг/м³ від вагової вологості при позитивних і негативних температурах.

Вологість матеріалу W змінюється в часі залежно від зміни параметрів внутрішнього і зовнішнього повітря, а також сорбційних властивостей матеріальних шарів конструкції. Сорбційними властивостями в більшій чи меншій мірі володіють всі будівельні матеріали. Для кожного будівельного матеріалу, за винятком абсолютно щільних матеріалів (скло, метал), є «своя» залежність його вологості від відносної вологості пові-

тря при постійній температурі - ізотерма сорбції, яка визначається експериментальними методами за стандартною методикою ГОСТ 24816-81 [18]. На рис. 1.4 показані ізотерми сорбції будівельних матеріалів найбільш часто використовуваних в огорожувальних конструкціях, побудовані за результатами лабораторних випробувань за методикою [18].

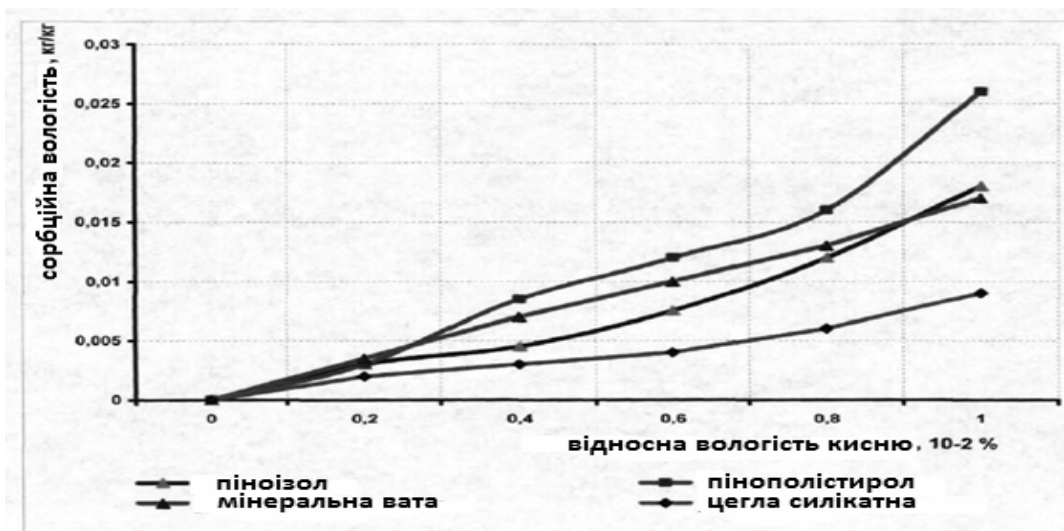


Рис. 1.4. Ізотерми сорбції будівельних матеріалів

За малюнком 1.4 видно, що сорбційні властивості будівельних матеріалів, що характеризуються ізотермами сорбції, дійсно індивідуальні для кожного матеріалу, але спостерігається однаковий характер їх розподілу в залежності від зміни потенціалу вологості. В результаті графічного дослідження ізотерм сорбції, показаних на рис. 1.4, в програмі Excel шляхом підбору ліній тренда встановлено, що всі вони апроксимуються аналогічними функціями - поліномами третього ступеня з коефіцієнтами кореляції $R^2 = 0,9994/0,9999$ виду

$$Ws = A_1\varphi + A_2\varphi^2 + A_3\varphi^3 \quad (1.5)$$

де Ws - сорбційна вологість матеріалу, %; φ - відносна, вологість повітря, відн. від A_1, A_2, A_3 - коефіцієнти змінної. Чисельні значення коефіцієнтів змінної A_1, A_2, A_3 для матеріалів, ізотерми сорбції яких показані на рис. 2.4, визначені автором і наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2
Коефіцієнти змінної в емпіричних залежностях рівноважної вологості матеріалів від потенціалу вологості.

Матеріал	Щільність г/см ³	Коефіцієнт змінної		
		A_1	A_2	A_3
Піноізол	17	0,0125	-0,0175	0,0140
Пінополістирол	25	0,0250	-0,0325	0,0270
Мінеральна вата	50	0,0075	-0,0105	0,0209
Цегла силікатна	1700	0,0125	-0,0200	0,0120

Сорбційна вологість матеріальних шарів огорожувальної конструкції залежить від зміни відносної вологості на шарі, обумовленою значенням парціального тиску повітря в порах матеріалу. Величина парціального тиску (пружності) водяної пари в насиченому повітрі p_n залежить від температури T повітря - із зростанням температури збільшується і визначається або побудо-

вою Id діаграм [3,5], або за таблицями, складеними, за результатами експериментальних досліджень [19,20]. При проведенні розрахунків на ЕОМ в нестационарному режимі використання табличних і діаграмних даних практично неприйнятно - необхідна функціональна залежність. В [93] наводяться табличні значення парціального тиску насиченої водяної пари в залежності від зміни температури від -41 до -30 ° С. При графічному дослідженні цих даних встановлено, що залежність зміни парціального тиску водяної пари від температури має нелінійний характер (див. рис. 1.5) і досить точно, з коефіцієнтом кореляції $R^2 = 0,9996$, апроксимується поліномом третього ступеня виду

$$p_n = 0,0213T^3 + 1,69T^2 + 48,02T + 611 \quad (1.6)$$

Стан вологості повітря характеризують відносною вологістю φ (%), яка за законом Бойля-Маріотта визначається ставленням [21] $\varphi = \frac{p}{p_n}$ де p_n - парціальний тиск повітря, Па. Для насиченого повітря $\varphi = 1$, або 100%, а для ненасиченого вологого повітря $\varphi < 1$. Таким чином для визначення опору. Теплопередачі огорожувальної конструкції з урахуванням фактичної вологості матеріальних шарів необхідно отримати математичні моделі нестационарного розрахунку наступних параметрів:

- розподілу температури (температурного поля) в перетині і на внутрішній поверхні огорожувальної конструкції;
- парціального тиску в перерізі матеріальних шарів конструкції;
- відносної вологості в перерізі матеріальних шарів огорожувальної конструкції.

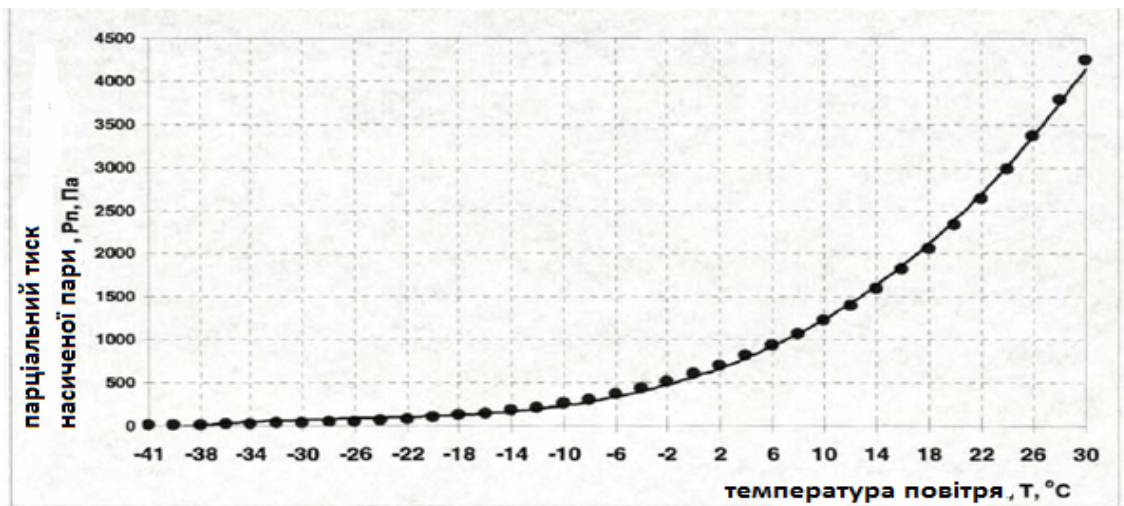


Рис. 1.5. Залежність зміни парціального тиску пари в насиченому повітрі від температури.

Розрахунок температурного поля в перетині багатошарової захисної конструкції в нестаціонарному режимі. Для розрахунку температурного поля розглядається фізико - математична модель нестаціонарної теплопередачі (одномірна задача) через перетин конструкції зовнішнього огороження, що складається з трьох різних термічно однорідних матеріальних шарів вважається, що інженерні системи опалення вентиляції та кондиціонування забезпечують усталені, нормативні параметри внутрішнього повітря (повітря приміщення) - відносну вологість ($\phi =$

55% і температуру $T = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Параметри зовнішнього повітря ($T_{\text{out}}, \phi_{\text{out}}$) задаються змінними - умовами клімату м. Києва (на рис. 1.6) показана схема тришарової огорожувальної конструкції з позначенням матеріальних шарів 1, 2, 3 та характерних меж: I – кордон між повітрям приміщення та внутрішньою поверхнею першого шару огороження; II - кордон стику першого і другого матеріальних шарів; III - межа стику другого і третього матеріальних шарів; IV - кордон між зовнішньою поверхнею третього шару і зовнішнім (атмосферним) повітрям.

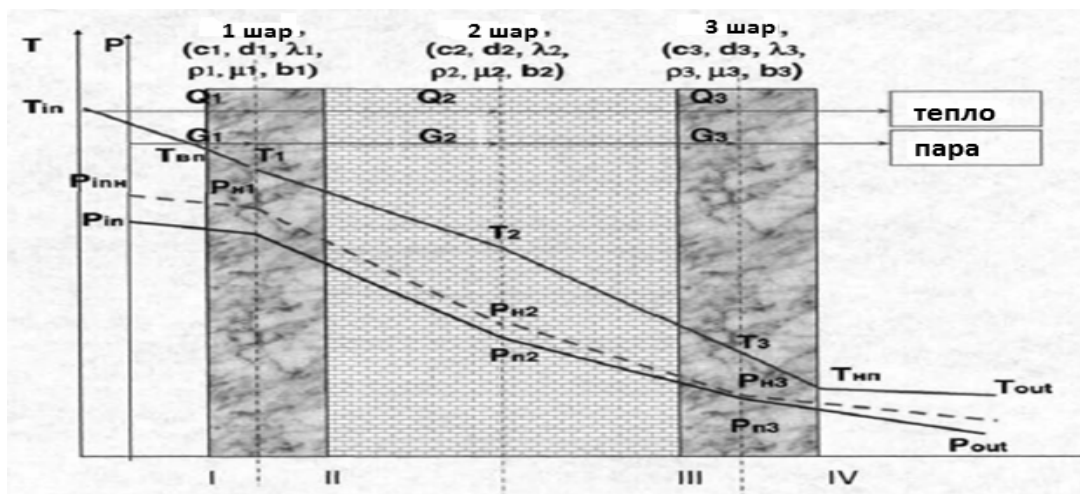


Рис. 1.6 Схема тришаровою зовнішньої захисної конструкції, де:

d_1, d_2, d_3 - товщина шарів конструкції, [м]; C_1, C_2, C_3 - теплоємність шарів, [кДж / (кг $^{\circ}\text{C}$)]; ρ_1, ρ_2, ρ_3 - об'ємна маса матеріалу шарів, [кг / м 3]; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ - коефіцієнт теплопровідності матеріалу шарів, [Вт / (м $^{\circ}\text{C}$)]; μ_1, μ_2, μ_3 - коефіцієнт паропроникності матеріалу шарів, [кг / (м $^{\circ}\text{C}$ *Па)]; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ - коефіцієнт вологості матеріалу шарів, [кг / (м $^{\circ}\text{C}$)]; T_1, T_2, T_3 - температура на осі першого, другого і третього шарів відповідно, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{вп}}, T_{\text{нп}}$ - температура на внутрішній і зовнішній поверхні огороження відповідно $^{\circ}\text{C}$.

Приймаємо, що теплова ємність кожного елементарного шару зосереджена в його центрі, а провідність між шарами характеризується опором теплопровідності між центрами шарів, отже теплофізичні характеристики матеріальних шарів конструкції (теплоємність, теплопровідність, температура) також належать осі шару.

Початкові і граничні умови. Тепловий баланс надходження тепла від джерел і втрат їх через поверхню елементарного об'єму для ізотропного неоднорідного середовища виражається відомим класичним диференціальним рівнянням теплопровідності і у цій статті не наводиться.

Розрахунок температурного поля в перерізі огорожувальної конструкції Процес нестационарної передачі тепла в товщі шарів огорожень визначається двома законами провідності і акумуляції тепла [3]. Відповідно до закону провідності, відомому як закон Фур'є, тепловий потік Q пропорційний градієнту температури $\frac{dT}{dx}$;

$$Q = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad \text{або} \quad Q = \frac{\partial T}{R} \quad (1.7)$$

При нестационарному режимі процес теплопередачі може відбуватися як від внутрішнього повітря приміщення до зовнішнього, так і в зворотньому напрямку. Напрямок теплового потоку протилежний напрямку температурного градієнта (напрямок зростання температури), на що вказує знак мінус в (1.7). У поставленому завданні умовно приймається, що передача тепла відбувається в напрямку від внутрішнього повітря приміщення через тришарову огорожу до зовнішнього повітря. В цьому випадку рівняння визначення теплового потоку Q_1 передаваного внутрішнім повітрям приміщення з температурою T_{in} центру першого шару огорожі (товщина шару при цьому дорівнює $\frac{d_1}{2}$) з температурою в центрі T_1 , згідно (1.7) буде мати вигляд:

$$Q_1 = \frac{(T_{in} - T_1)}{\frac{1}{\alpha_{in}} + \frac{d_1}{2\lambda_1}} \quad (1.8)$$

Для розрахунку температури на зовнішній поверхні огорожувальної конструкції (на зовнішній поверхні третього шару) розглядаються прийняті на кордоні IV умови. Відповідно до рівняння теплового потоку q_3 переданого від центру третього шару зовнішньої поверхні огорожувальної конструкції (зовнішній поверхні третього шару), буде мати вигляд:

$$q_3 = \frac{(T_3 - T_{nn})}{\frac{d_3}{2\lambda_3}} \quad (1.9)$$

а від зовнішньої поверхні огорожувальної конструкції навколишнього повітря:

$$Q_{out} = \alpha_{out} \cdot (T_{nn} - T_{out}) \quad (1.10)$$

Враховуючи рівність теплових потоків $Q_{out} = q_3 = Q_3$ підставивши в (1.9) Q_3 замість q_3 , вирішивши рівняння відносно T_{nn} , знаходиться температура на зовнішній поверхні огорожі (1.11)

$$T_{nn} = T_3 - \frac{Q_3 \cdot d_3}{2\lambda_3} \quad (1.11)$$

Розрахунок вологісного режиму огорожувальної конструкції

Для розрахунку вологісного режиму розглядається процес вологопередачі через матеріаль-

ні шари тришарової огорожі (схема огорожі та умовні позначення показані на рис 1.6). Вологопередача в огорожувальних конструкціях відбувається за рахунок перенесення вологи, що знаходиться в паровій фазі – паропровідності і за рахунок перенесення краплинної вологи - вологопровідності. Обидва ці процеси в матеріалі постійні, як при зволоженні матеріалу (підвищенні вологовмісту), так і при його висиханні (зниження вмісту вологи), зазвичай називаються одним терміном - "зволоження" і підкоряються законам дифузії пари і вологопровідності в капілярно-пористих тілах [13]. Процес перенесення вологи в паровій частині за аналогією з процесом нестационарної передачі тепла в товщі шарів огорожі (визначається законами теплопровідності і акумуляції), також визначається паропровідністю і сорбцією-десорбцією матеріалу [3,15,16]. Диференціальне рівняння дифузії пари в сорбуючому середовищі (одновимірне перенесення по осі x) має вигляд:

$$\xi \rho(x) \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu(x) \frac{\partial P}{\partial x} \right] \quad (1.12)$$

де: μ - коефіцієнт паропровідності, що показує кількість пара в (кг), дифундують за 1:00 через 1 м плоского шару завтовшки в 1 м при різниці парціальних тисків на поверхні шару, що дорівнює 1 Па, $[\text{кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па})]$; ξ - питома пароемкість матеріалу, $[\text{г} / (\text{кг} \cdot \text{Па})]$; P - парціальний тиск, $[\text{Па}]$. Отже рівняння (1.12) для кожного шару тришарової огороження буде мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \text{для 1 шару} \quad \xi_1 \rho_1 \frac{\partial P_1}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_1 \frac{\partial P_1}{\partial x} \right); \\ \text{для 2 шару} \quad \xi_2 \rho_2 \frac{\partial P_2}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_2 \frac{\partial P_2}{\partial x} \right); \\ \text{для 3 шару} \quad \xi_3 \rho_3 \frac{\partial P_3}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_3 \frac{\partial P_3}{\partial x} \right); \end{aligned} \right\} \quad (1.13)$$

де позначення параметрів відповідають зазначеним на рис. 1.6. На кордонах II (стику між першим і другим шарами) і III (стику між другим і третім шарами) задаються граничні умови IV роду, які визначають рівність дифузійних потоків, тобто:

$$\mu_1 \frac{\partial P_1}{\partial x} \Big|_{II} = \mu_2 \frac{\partial P_2}{\partial x} \Big|_{II}, \quad P_1 \Big|_{II} = P_2 \Big|_{II} \quad (1.14)$$

$$\mu_2 \frac{\partial P_2}{\partial x} \Big|_{III} = \mu_3 \frac{\partial P_3}{\partial x} \Big|_{III}, \quad P_2 \Big|_{III} = P_3 \Big|_{III} \quad (1.15)$$

При зволоженні матеріальних шарів огорожувальної конструкції до максимальної сорбційної вологості, тобто при відносній вологості в перетині шару $\phi_i = 1$, починається процес накопичення крапельної (конденсаційної вологи), кількість якої - V , кг, визначається різницею між зна-

ченнями загальної вологості матеріалу W_f на шарі і сорбційної вологості W_s , тобто:

$$V = W_f - W_s, \quad (1.16)$$

Загальну вологість W_f кожного матеріального шару огорожувальної конструкції в момент часу рахунки t визначимо за формулою

$$W_f = W_f^{t-1} + G, \quad (1.17)$$

де W_a^{t-1} - загальна вологість матеріалу кожного шару на попередньому кроці рахунку - в момент часу $(t-1)$;

G - загальний приплив вологи, що змінює вологість шару.

Для вираження V у відсотках (1.16) набуде вигляду

$$V = (W_f - W_s) * 100 / (d * \gamma) \quad (1.18)$$

Моделювання нестационарного процесу тепло-і вологопереносу в багатошаровій огорожувальній конструкції (одномірна задача)
Перенесення тепла в огорожувальних конструк-

ціях здійснюється за рахунок теплопровідності матеріальних шарів, а вологопереносу за рахунок паропроникності (парова волога) і вологопровідності (краплинна волога). Наведені нижче алгоритми будуть вірні як при зволоженні матеріалу, так і при його висиханні, тому що обидва ці процеси йдуть в матеріалі огорожувальних конструкцій постійно. Для спрощення моделювання розглядається модель тришарової огорожувальної конструкції. Структурна схема тришарової огорожувальної конструкції, характеристика об'єктів На рис. 2.1. наводиться структурна схема моделі імітації експлуатації тришарової огорожувальної конструкції. Модель являє собою замкнуту систему і складається з п'яти об'єктів: Код 01 - повітря в приміщенні; Код 02.01 - 1 шар огорожувальної конструкції; Код 02.02 - 2 шар огорожувальної конструкції; Код 02.03 - третій шар огорожувальної конструкції; Код 03 - зовнішнє повітря навколишнього середовища.



Рис. 2.1. Структурна схема імітаційної моделі тришарової огорожувальної конструкції.

Об'єкт 01 імітує повітря всередині приміщення, тобто розташований з внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції і має один порт для передачі (прийому) тепла захисної конструкції. За умовами завдання параметри внутрішнього повітря - температура і відносна вологість задаються нормативними відповідно до вимог територіальних СНиП регіону забудови. Об'єкти 02.01, 02.02, 02.03 імітують матеріальні верстви огорожувальної конструкції. Вихідні дані для кожного об'єкта огорожувальної конструкції приймаються відповідно до вимог нормативних документів і вводяться оператором. Кожен шар матеріалу, як об'єкт програми, має шість портів:

Порт 1. Тепло.

Порт 2. Тепло.

Порт 3. Сорбційна волога.

Порт 4. Сорбційна волога.

Порт 5. Крапельна волога.

Порт 6. Крапельна волога.

Об'єкт 03 імітує зовнішнє повітря навколишнього середовища і розташований з зовнішньої поверхні огорожувальної конструкції і має один порт для теплообміну з огорожувальною конструкцією. Параметри зовнішнього повітря (температура і відносна вологість) задаються змінними відповідно до кліматичних умов району будівництва. Для цього в базу даних програми вводяться кліматичні таблиці погодинної середньомісячної температури повітря і середньомісячної відносної вологості повітря. Дані для таблиць наведені в територіальних нормативах по енергоспоживанню і теплозахисту Київської області. Між портами кожного об'єкта встановлюються зв'язки. У про-

грамі не розрізняється вхід від виходу, тому в даній моделі приймається, що перший з двох портів для кожного потоку отримує (передає) енергію (масу) зсередини приміщення, а другий віддає (отримує) її назовні. Блок-схема моделі тепловологісного розрахунку тришарової огорожі з алгоритмами розрахунку (у цій статті не показана), червоним кольором виділені розрахункові параметри. Умовні позначення вихідних і розрахункових параметрів відповідають зазначеним у другій главі. Далі задаються значення змінних як «характеристика», якщо значення підставляється з даних, наявних у середині об'єкту, і як «Інформаційний канал», якщо значення змінної береться з іншого об'єкту, пов'язаного з даним інформаційними зв'язками. Також задається крок моделювання dt в секундах або в годинах на розсуд оператора. Якщо на першому кроці моделювання програма не знаходить значення змінної, тобто воно (значення) ще не відоме то підставляється значення «О». Після введення вихідних даних значень змінних виробляється налаштування моделі для рахунку:

1. Встановлюється час проведення експерименту, наприклад «з 01.01.2006 року 00 год. 00хв. 00 сек по 01.01.2007 року 00 год. 00мін. 00 сек.».
2. Задається крок рахунку, наприклад «5 хв.».
3. Налаштовуються звіти, для чого вибираються інформаційні канали, по яких необхідно отримати результати рахунку у вигляді таблиць. В таблиці виводяться результати розрахунку на

кожному кроці моделювання. Таблиці «звітів» можна експортувати в «Word» або «Excel» для аналізу або графічної обробки.

4. Налаштовуються осцилографи, для чого вибираються інформаційні канали, за змінами значень яких під час рахунку можна вести спостереження.

5. Налаштовуються діаграми з інформаційних каналах, по яким необхідно отримати результати рахунку в графічному вигляді. Далі виробляється копіювання моделі для видалення результатів попереднього розрахунку і активізується функція програми «старт» для початку виконання розрахунку.

Висновки:

1. Розроблена методика і програма розрахунку тепло-вологісного стану багатoshарових огорожувальних конструкцій в нестационарному режимі дозволяють проводити аналіз та експертизу прийнятих проектних рішень з теплової ізоляції будівель та споруд.

2. Розрахунок вологісного режиму роботи утеплювача в конструкції є необхідною умовою для обґрунтованого аналізу довговічності і оцінки експлуатаційного ресурсу утеплювача в конструкції.

3. Результати розрахунків вологісного режиму різних варіантів огорожувальних конструкцій будівель із застосуванням ефективних утеплювачів дозволяють робити узагальнені висновки про необхідність додаткової теплозахисту та обґрунтованості прийнятих технічних рішень.

Список використаної літератури:

1. Франчук А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов [текст] / А.У. Франчук М. НИИСФ Госстроя СССР, 1965.
2. Шильд, Е. Строительная физика [Текст]/Е. Шильд, Х.-Ф; Кассельман Г. Дамен, Р. Поленц, Пер. с нем. В.Г. Бердичевского под ред. Э.Л. Дешко. - М.: Стройиздат. - 1982. -296с, ил.
3. Богословский В.Ж Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции кондиционирования воздуха) [Текст] : учеб. для вузов / В.Н.Богословский: - 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Высш. школа, 1982-415 с. ил.
4. Гусев Н.М. Основы строительной физики [Текст]: учебник для вузов / Н.М. Гусев. - М.: Стройиздат, 1975. - 440 с.
5. Лариков Н.Н. Общая теплотехника [Текст] : учебник пособие для вузов / Н.Н. Лариков. - изд. 2-е, перераб и доп. -М.: Стройиздат, 1975.- 559 с.
6. Лукьянов В.С. Гидравлические приборы для технических расчетов [Текст] /В.С. Лукьянов. - Изв. АЕ СССР- Сер. ОТН. 1939.- №2.
7. Богословский В.Н. Три аспекта создания здания с эффективным использованием энергии [Текст] / В.Н:Богословский// АВОК. -М., 1998. - №3.
8. Власов О.Е. Основы теории капиллярной диффузии [Текст] / О.Е. Власов. - ЦНИИПе, 1940.
9. Ильинский В.М. Проектирование ограждающих конструкций с учетом физико-климатических воздействий [Текст] В.М. Ильинский - М. Госстройиздат 1955.
- 10.Лариков Н.Н. Теплотехника [Текст]: учеб. пособие для вузов / Н:Н. Лариков. - 3-е изд. перераб. и доп. - М. Стройиздат, 1985 г. 432 с, ил.
- 11.Лыков А.В. Теория теплопроводности [Текст] /А.В. Лыков.- М. 1967.
- 12.Лыков А.В. Теоретические основы строительной теплофизики- [Текст]/А.В. Лыков.-Минск, 1961.
- 13.Лыков А.В. Тепломассообмен [Текст] справ. / А.В. Лыков. - МГ: Энергия, 1972.-560 с.
- 14.Лыков А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах [Текст] /А.В.Лыков- М. 1954.

15. Фокин К.Ф. Сорбция водяного пара строительными материалами: [Текст]/К.Ф. Фокин.- Москва: Стройиздат, 1969.
16. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий [Текст] / К.Ф. Фокин.- Москва: Стройиздат, 1973.-287 с.
17. СНиП11-3-79* Строительная теплотехника [Текст]. - Взамен СНиП II-A.7-71; введ. ОГ.07.1979. - М.: ГУП ЦПП, Госстрой РФ, 1998.
18. ГОСТ 24816-81 Материалы строительные. Методы определения сорбционной влажности [Текст]; - введ. 01.01.1982. - М.: Издательство стандартов; 1981.
19. Лариков Н.Н. Теплотехника [Текст]: учеб. пособие для вузов / Н.Н. Лариков. - 3-е изд. перераб. и доп. - М. Стройиздат, 1985; г 432 с, ил.
20. СП 23-101-2004 Свод правил по проектированию и строительству. Проектирование тепловой защиты зданий [Текст]. - введ. 01.06.2004. - М. 2004.
21. Гусев Н.М. Основы строительной физики [Текст]: учебник для вузов / Н.М. Гусев. - М.: Стройиздат, 1975. - 440 с.
22. Мачинский В. Д. О конденсации паров воздуха в строительных ограждениях [Текст] / В.Д. Мачинский. //Строительная промышленность. - М., 1927. - № 1. - С. 60-62.

Разработана методика и программа расчета тепло-влажностного состояния многослойных ограждающих конструкций в нестационарном режиме позволяют проводить анализ и экспертизу принимаемых проектных решений по тепловой изоляции зданий и сооружений.

The method and program calculating heat and humidity of multilayer walling in non-stationary mode allow for analysis and examination of the design decisions of the thermal insulation of buildings and structures.

Дата надходження в редакцію: 21.03.12 р.

Рецензент: д.т.н., професор Шмуклер В.С.

УДК 693.54

АНАЛІЗ ТЕРМОСНИХ МЕТОДІВ ВИТРИМУВАННЯ БЕТОНУ В МОНОЛІТНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

Т.О. Височина, к.т.н., доцент, Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

Половина монолітного бетону укладається в конструкцію в зимових умовах, специфіка яких впливає на розмір трудових і енергетичних затрат, матеріалоемність і загальну вартість у бік збільшення. Аналіз відомих методів укладання і витримування монолітного бетону дозволяє віддати перевагу методу термоса, а для конструкцій середньої масивності з $M_n = 5 \dots 12 \text{ м}^{-1}$ - «гарячого» термоса.

Постановка проблеми в загальному вигляді:

У зв'язку зі значним скороченням підприємств по випуску збірних бетонних і залізобетонних виробів у Сумській області об'єм монолітного бетону, укладеного в конструкції, значно перевищує об'єм збірного. Половина цього бетону укладається у справу в зимових умовах, специфіка яких впливає на розмір трудових і енергетичних затрат, матеріалоемність і загальну вартість у бік збільшення.

До зимових умов прийнято відносити період, коли очікувана середньодобова температура зовнішнього повітря стає нижче $+5^\circ\text{C}$ і мінімальна добова опускається нижче 0°C . В цей період повинні бути передбачені спеціальні технологічні заходи, які б забезпечували досягнення у задані строки проектної міцності бетону, після якої заморозування практично не здійснює деструктивних впливів на бетон.

Формулювання цілей: Таким чином, задача удосконалення технології зведення монолітних

конструкцій в умовах, що склалися, доволі актуальна. Вона заключається у використанні таких методів приготування, транспортування, укладки бетонних сумішей і догляду за бетоном, які б забезпечили досягнення передбачених проектом кінцевих фізико - механічних характеристик або критичної міцності, незалежно від температур і вологості оточуючого середовища.

Прискорення або уповільнення процесу утворення і твердіння цементного каменю залежить від температури оточуючого середовища, температури бетонної суміші і адсорбуючої здатності цементу, визначуваною його мінералогічним складом. Для твердіння цементного каменю найбільш позитивною є температура $+15^\circ\text{C}$ $+25^\circ\text{C}$, при якій бетон на 28-му добу практично досягає стабільної міцності. При негативних температурах вода, що міститься в капілярах і тілі бетону, перетворюється у лід, збільшуючись в об'ємі приблизно на 9%, у результаті виникають сили тиску, що руйнують утворені структурні зв'язки, які в подальшому при відтаванні льоду і тве-