

ТЕПЛОТЕХНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСУ КОНДЕНСАЦІЇ ВОДЯНИХ ПАРІВ ВОЛОГОГО ПОВІТРЯ НА ТЕПЛОПОГЛИНАЛЬНІЙ ПОВЕРХНІ

Іванов О.М., к.т.н., доц.

Полтавська державна аграрна академія

Окреслена задача пошук аналітичного способу дослідження процесу конденсації водяних парів вологого повітря на теплопоглинальній поверхні. Вирішення поставленої задачі пропонується здійснювати за допомогою використання функціональних залежностей, що описують конвективний процес теплообміну між теплопоглинальною поверхнею та повітрям, як теплоносієм, та детермінованих залежностей основних тепловологісних параметрів вологого повітря при різних волого-температурних станах. Описана послідовність протікання процесу конденсації водяних парів в два етапи: на першому відбувається доведення перегрітої водяної пари у вологому повітрі до стану насичення, шляхом відбору при незмінній вологомісткості теплової енергії, на другому – при абсорбції тепла від насичених водяних парів здійснюється відбір сконденсованої вологи на площину теплопоглинальної поверхні.

Розрахунок першого етапу запропоновано здійснювати як для ізобарного процесу, кількість поглинутої теплоти в якому визначається за різницею величин ентальпії для вихідної температури повітря та температури точки роси, що визначатиметься за експериментально-виведеною залежністю, що пов'язує поточну температуру вологого повітря та відносну вологість.

Опис другого етапу пропонується здійснюється у відповідності до закономірностей зміни тепловологісних параметрів повітря на кривій насичення. Теплотехнічний розрахунок проводиться з використанням формули зміни ентальпії для стану насичення водяних парів та функціональної залежності вологомісткості від парціального тиску водяної пари та барометричного тиску.

Опис процесу енергетичного взаємного обміну між теплопоглинальною поверхнею та повітрям проводиться з використанням основних положень процесу конвективного теплообміну та теорії подібності для теплових процесів з врахуванням фазового переходу води з газоподібного до рідкого стану.

Постановка проблеми. Процес конденсації водяних парів вологого повітря має суттєве значення та застосування в технічній, теплоенергетичній, теплотехнічній та інших суспільно значимих галузях. Зокрема, даний процес є важливим та основоположним фактором при проектуванні, розробці та експлуатації систем кондиціонування та вентиляції для різних промислових об'єктів, торгівельних і житлових приміщень, керуванням яким дозволяє регулювати волого-температурний стан для досягнення комфортного та

технологічно доцільного мікроклімату. Також відбір водяних парів з вологого повітря використовується як метод та альтернативне джерело отримання прісної води в посушливих кліматичних місцевостях при застосуванні конденсаційних та опріснювальних установок. При цьому виникає потреба у здійсненні теплотехнічного розрахунку даних установок по визначенню необхідної холодопродуктивності, площ теплопоглинальних поверхонь та інших конструкторсько-функціональних параметрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання проблеми. Порядок вирішення поставленої задачі зводиться до розрахунку процесу конвективного теплообміну між повітрям, як теплоносієм, та теплопоглинальною поверхнею, на якій відбувається утворення конденсату. Процес виділення конденсату, як фазового переходу води з газоподібного до рідкого агрегатного стану, значним чином видозмінює характер протікання процесу тепловіддачі та має бути врахований при проведенні теплотехнічних розрахунків [1]. При цьому кількість абсорбованої теплової енергії від повітряного потоку, для досягнення потреби отримання необхідної кількості конденсату, буде перебувати в прямій залежності від початкового волого-температурного стану повітря.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття. Дослідження процесу конденсації водяних парів, здебільшого, проводять з використанням спеціальної діаграми властивостей вологого повітря, що представляє собою графічне поле в системі двох діваріантних координат – вологомісткість та ентальпія, на яке також нанесені криві відносної вологості, парціального тиску водяної пари та температури. Користування даною діаграмою, певним чином, затрудняє проведення аналітичних розрахунків із-за потреби повсякчасно відшукувати на ній графічним способом різні тепловологісні параметри. Тому, доцільно було навести альтернативний спосіб пошуку необхідних параметрів за діаграмою та встановити детермінований зв'язок між всіма складовими цієї діаграми.

Мета публікації. В якості мети наукового дослідження, що висвітлюється, було поставлено завдання привести послідовний алгоритм теплотехнічного розрахунку процесу конденсації водяних парів вологого повітря із залученням аналітичного способу визначення тепловологісних параметрів на кожному із проміжних етапів даного процесу.

Основний матеріал. Процес отримання конденсату з вологого повітря передбачає проведення кількох послідовних операцій: по-перше, переведення водяних парів зі перегрітого стану до стану насичення шляхом їхнього охолодження до температури, яка відповідає величині точки роси при даному тиску, вологості та температури вологого повітря; по-друге, поступова абсорбція на лінії насичення ($\phi=100\%$) тепла з об'єму насичених водяних парів вологого повітря в кількості, обумовленою величиною теплоти пароутворення.

Величина температури точки роси з достатньо високою точністю ($\pm 0,4^\circ\text{C}$) для певного тепловологісного стану повітря може бути знайдена з виразу [0]:

$$t_p = \frac{b \cdot f(t; \varphi)}{a - f(t; \varphi)}, \quad (1)$$

де a, b – поправочний коефіцієнт та температурна поправка, відповідно, $a=17,27, b=237,7^\circ\text{C}$;
 $f(t; \varphi)$ – безрозмірна функція;

$$f(t; \varphi) = \frac{a \cdot t}{b + t} + \ln \varphi, \quad (2)$$

де t – поточна температура атмосферного повітря, $^\circ\text{C}$;
 φ – відносна вологість в об'ємних долях.

Величина відібраної теплової енергії від вологого повітря для його охолодження до температури, що відповідає точки роси, може буде обрахована аналітичним способом [0]:

$$\Delta i = q = 1,0048 \cdot (t - t_p) + 1,96 \cdot d \cdot (t - t_p), \text{ кДж/кг} \quad (3)$$

де t, t_p – поточна температура вологого повітря та температура точки роси, $^\circ\text{C}$
 d – вологомісткість вологого повітря, кг/кг.

Вологомісткість вологого повітря при відомому барометричному тиску B та відносній вологості:

$$d = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot p_n}{B - \varphi \cdot p_n}, \text{ кг/кг} \quad (4)$$

де p_n – тиск насичення водяної пари, Па;
 B – барометричний (атмосферний) тиск, Па;
 φ – відносна вологість.

Тиск насичення p_n в залежності від температури насичення t_n та атмосферного тиску може бути обрахований [0]:

$$p_n(B, t_n) = f(B) \cdot p'_n(t), \text{ Па} \quad (5)$$

де $p'_n(t)$ – тиск насичення чистої фази водяного пара, Па;

$$p'_n(t) = 611,2 \cdot e^{\frac{17,62t}{243,12+t}}, \quad (6)$$

де t – температура, $^\circ\text{C}$;
 $f(B)$ – допоміжна функція;

$$f(B) = 1,0016 + 3,15 \cdot 10^{-8} \cdot B - 7,4 \cdot B^{-1}. \quad (7)$$

Також необхідна кількість відібраного тепла може бути розрахована за формулою теплоти як для ізобарного процесу охолодження [0]:

$$q = c_p \cdot (t - t_p), \text{ кДж/кг} \quad (8)$$

де c_p – середня ізобарна масова теплоємність атмосферного повітря в температурному інтервалі $[t_p; t]$, кДж/(кг·°С).

Подальший процес абсорбації тепла від вологого повітря супроводжується виділенням конденсату на поверхні теплопоглинальної поверхні та проходить по кривій насичення при $\phi=1$.

Так як процес конденсації водяних парів з вологого повітря відбувається у відповідності до характеру зміни кривої насичення, це дозволяє проводити аналітичні розрахунки по визначенню необхідної кількості теплової енергії для отримання певної кількості сконденсованої води та навпаки – обраховувати масу сконденсованої вологи при відводі певної кількості тепла.

Дані розрахунки проводяться на підставі відомих функціональних залежностей між основними тепловологістними параметрами вологого повітря: ентальпії та вологомісткості повітря та парціального тиску водяної пари.

Величина ентальпії вологого повітря в стані насичення може бути визначена:

$$i = 1,0048 \cdot t_n + (2500 + 1,96 \cdot t_n) \cdot d_n, \text{ кДж/кг} \quad (9)$$

де t_n – температура насичення, °С

d_n – вологомісткість повітря в стані насичення, кг/кг.

Вологомісткість вологого повітря в стані насичення можна знайти за формулою (4) при показнику відносної вологості $\phi=1$:

$$d_n = 0,622 \cdot \frac{p_n}{B - p_n}, \text{ кг/кг} \quad (10)$$

де p_n – тиск насичення водяної пари, Па;

B – барометричний (атмосферний) тиск, Па.

Насичені водяні пари можуть зріджуватися як за рахунок об'ємної конденсації, так і за рахунок поверхневої конденсації. При цьому головною та обов'язковою умовою перебігу даних процесів є зниження температури водяних парів нижче температури насичення (точки роси) в загальному повітряному об'ємі і в пограничному шарі біля теплопоглинальної поверхні. Іншою, не менш важливою, особливістю протікання процесу конденсації – це неминуче утворення на теплопоглинальній поверхні рідкої плівки (плівка конденсату), яка суттєвим чином впливає на процес теплообміну на межі розділу поверхня-пар. Утворена плівка конденсату внаслідок тепловіддачі з охолодженою поверхнею може бути до деякій степені переохолодженою та ініціювати додаткову конденсацію водяного пару на розмежуванні конденсат-пар.

Враховуючи вище приведені особливості протікання процесу конденсації водяного пару, конвективний теплообмін між теплопоглинальною поверхнею та вологим повітрям може бути описаний основними рівняннями та аналітичними виразами, які надають математичний опис процесу тепловіддачі при вимушеному/природному руху теплоносія в різних видах простору.

Питома величина теплового потоку, що буде абсорбовуватися одиницею теплопоглинальної площини, визначається за рівнянням Ньютона-Ріхмана:

$$q = \alpha \cdot (t_{нас} - t_{ст}), \text{ Вт/м}^2 \quad (11)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°C);
 $t_{нас}$ – температура насичення, °C;
 $t_{ст}$ – температура стінки, °C.

Коефіцієнт тепловіддачі α , відповідно до положень конвективного теплообміну, визначається за критеріальним числом Нусельта Nu :

$$Nu = \frac{\alpha \cdot X}{\lambda_{ен}}, \quad (12)$$

де $\lambda_{ен}$ – коефіцієнт теплопровідності вологого повітря, Вт/(м·°C).
 X – характерний розмір поверхні теплообміну, м

При цьому визначення критерія Нусельта відбувається за критеріальним рівнянням, яке в повній мірі враховує вплив на процес тепловіддачі геометрії та положення в просторі теплопоглинальної площини, фізичних властивостей повітря, характеру та режиму руху повітря.

Так як процес конденсації водяних парів з вологого повітря відбувається з утворенням конденсаційної плівки на поверхні теплопоглинальної поверхні, то для врахування даної особливості протікання процесу в формулу (11) слід внести уточнюючий коефіцієнт ξ :

$$q = \xi \cdot \alpha \cdot (t_{нас} - t_{ст}), \quad (13)$$

Поправочний коефіцієнт ξ , який характеризує відношення повної кількості теплоти, відведеної від вологого повітря, до явної теплоти, що визначається за різницею сухого термометра, може бути визначений:

$$\xi = \frac{i_{ен}^{ex} - i_{ен}^{eux}}{c_{ен} \cdot (t_{ен}^{ex} - t_{ен}^{eux})} \quad (14)$$

де $i_{ен}^{ex}, i_{ен}^{eux}$ – питомі ентальпії повітря на вході та виході з каналу, кДж/кг;
 $c_{ен}$ – теплоємність вологого повітря в температурному інтервалі $[t_{ен}^{ex}; t_{ен}^{eux}]$, кДж/(кг·°C),

$$c_{ен} = 1,0048 + 1,96 \cdot d. \quad (15)$$

Внаслідок конвективного теплообміну між потоком вологого повітря, в якому водяні пари перебувають в стані насичення, та теплопоглинальною поверхнею відбувається утворення конденсату, який є результативним продуктом функціонування конденсаційної установки. При цьому кількість сконденсованої вологи є головним показником функціонування конденсаційної установки:

$$g = G \cdot (d_{ен}^{ex} - d_{ен}^{eux}), \text{ кг/с} \quad (16)$$

де G – масова витрата повітря через установку, кг/с.

Висновки. Таким чином, викладений теоретичний матеріал дає змогу описати та представити взаємозв'язок між основними параметрами процесу конденсації водяних парів вологого повітря на теплопоглинальній поверхні у вигляді відповідних функціональних залежностей. Крім того, приведені детерміновані залежності в повній мірі дозволяють використовувати аналітичний метод при визначенні ключових тепловологісних параметрів вологого повітря при різних варіаціях його волого-температурного стану та виключити необхідність використання для цієї мети і-d-діаграму вологого повітря.

Список використаних джерел

1. Лариков Н.Н. Теплотехника: Учеб. для вузов [Текст] / Н.Н. Лариков. – М.: Стройиздат, 1985. – 432 с.
2. Точка росы / Википедия – свободная библиотека [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Точка_росы.
3. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation / The World Meteorological Organization [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.pdf.
4. Драганов Б.Х. Теплотехника: підручник [Текст] / [Б.Х. Драганов, О.С. Бессараб, А.А. Долінський та інші]. – Київ: ІНКООС, 2005. – 432 с.

Аннотация

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССА КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНЫХ ПАРОВ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА НА ТЕПЛОПОГЛОЩАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Иванов О.Н.

Обозначена задача поиска аналитического способа исследования процесса конденсации водяных паров влажного воздуха на теплопоглощающей поверхности. Решение поставленной задачи предлагается находить с помощью использования функциональных зависимостей, описывающих конвективный процесс теплообмена между теплопоглощающей поверхностью и воздухом, как теплоносителем, и детерминированных зависимостей основных тепловлажностных параметров влажного воздуха при различных начальных влаго- температурных состояний. Описана последовательность протекания процесса конденсации водяных паров в два этапа: на первом доводят перегретые водяные пары во влажном воздухе до состояния насыщения, путем отбора при постоянном влагосодержании тепловой энергии, на втором - при абсорбции тепла от насыщенных водяных паров осуществляется отбор сконденсированной влаги на плоскость теплопоглощающей поверхности.

Расчет первого этапа предложено осуществлять как для изобарного процесса, количество поглощенной теплоты в котором определяется по разнице величин энтальпии для исходной температуры воздуха и температуры

точки росы, которая будет определяться по экспериментально-выведенной зависимости, связывающей текущую температуру влажного воздуха и относительную влажность.

Описание второго этапа предлагается осуществляется в соответствии с закономерностями изменения тепловлажностных параметров воздуха на кривой насыщения. Теплотехнический расчет производится с использованием формулы изменения энтальпии для состояния насыщения водяных паров и функциональной зависимости влагосодержания от парциального давления водяного пара и барометрического давления.

Описание процесса энергетического обмена между теплопоглощающей поверхностью и воздухом проводится с использованием основных положений процесса конвективного теплообмена и теории подобия для тепловых процессов с учетом фазового перехода воды из газообразного в жидкое состояние.

Abstract

THERMAL CALCULATION PROCESS OF CONDENSATION OF WATER VAPOR OF MOIST AIR ON THE SURFACE OF THE HEAT-ABSORBING

O. Ivanov

Designated the task of finding the analytical method for the study of the process of moist air condensation of water vapor on the heat-absorbing surface. The solution of this problem is offered by the use of finding functional relationships that describe the process of convective heat transfer between the heat-absorbing surface and the air as the coolant, and deterministic dependencies major heat and humidity of moist air parameters at different initial moisture temperature conditions. The described sequence of the process of condensation of water vapor in two stages: first adjusted overheated water vapor in humid air to the saturation state by the selection of heat at constant moisture content, the second - in the heat absorption of the saturated water vapor being selected condensed moisture on the plane of the heat-absorbing surface.

Calculation of the first stage proposed to implement for the isobaric process, the amount of heat absorbed in which is determined by the difference in enthalpy values for the initial air temperature and dew point temperature, which will be determined by experimentally-derived dependence linking the current humid air temperature and relative humidity.

Description of the second phase is proposed in accordance with the laws of the changes of heat and humidity of air parameters on the saturation curve. Thermal calculation is made using the formula enthalpy change for the state of saturation of water vapor and the functional dependence of the moisture content of water vapor partial pressure and barometric pressure.

Description of the process of energy exchange between the heat-absorbing surface and the air is carried out using the basic provisions of the convective heat transfer process and the similarity theory for thermal processes, taking into account the phase transition of water from a gaseous to a liquid state.