

## Моделювання тепломасообмінних процесів в автоклавних установках з рециркуляційним аеродинамічним нагрівом

Вінницький національний технічний університет

### Анотація

В доповіді наведено порівнювальне оцінювання відомих установок і запропонованого устаткування з рециркуляційним аеродинамічним нагрівом для тепловологісної обробки бетонних і залізобетонних виробів за тривалістю циклу обробки та показниками їх енергетичної ефективності. Показані результати математичного моделювання на підставі складання рівнянь теплового балансу для пропарювальної автоклавної камери та встановлені напрямки підвищення її енергетичної ефективності.

**Ключові слова:** автоклавна пропарювальна камера, тепловологісна обробка, математична модель, енергетична ефективність, бетонні та залізобетонні вироби.

### Summary

In the report the comparative evaluation of known installations and equipment proposed with recirculation aerodynamic heating for thermal and humidity treatment of concrete and reinforced concrete products for the duration of processing cycle and parameters of energy efficiency. Showing results of mathematical modeling based on the equations of thermal balance for steaming autoclave camera and installed directions enhance its energy efficiency.

**Keywords:** energy performance, heat- and moist curing, curing chamber, concrete and reinforced concrete products. autoclave steaming camera thermal and humidity treatment, mathematical model, energy efficiency, concrete and reinforced concrete products.

Тепловологісна обробка (ТВО) є одним з найпоширеніших методів прискореного твердіння бетону, поряд з використанням хімічних добавок і швидкотверднучих цементів. Теплові методи засновані на збільшенні швидкості реакцій взаємодії в'язучих речовин з водою при підвищенні температури. У виробництві бетонних і залізобетонних виробів і конструкцій ТВО є найбільш енергоємною і тривалою стадією [1-3, 5].

При виготовленні будівельних виробів теплова обробка є одним з найбільш енергоємних етапів, при якій споживається близько 60% від загальної кількості енерговитрат. Теоретично на нагрів виробу із бетону і металоформ необхідно всього лише 10-15% теплової енергії, а решта, що витрачається за відомими технологіями, – заплановані і незаплановані втрати, які досягають майже 50% від загальної кількості енерговитрат. Сучасний стан устаткування підприємств з виготовлення будівельних виробів, зокрема, із бетону, потребує проведення подальшої реконструкції і модернізації виробництва з метою збільшення асортименту та якості, а також зниження собівартості продукції в умовах сучасного ринку. При цьому енергетична ефективність нових технологій та ефективна система управління процесом повинні бути одними з головних критеріїв їх вибору [4, 5].

В НДЛ гідродинаміки ВНТУ розроблена пропарювальна автоклавна установка для тепловологісної обробки бетонних виробів з рециркуляційним аеродинамічним нагрівом (рисунок) [6,7].

Принцип дії аеродинамічного нагрівача роторного типу, полягає в тому, що в результаті рециркуляції повітряного потоку і виникають аеродинамічні втрати тиску в роторному колесі, яке спричиняє нагрів повітряного середовища всередині робочої камери. Потік гарячого повітря, що рециркулює в робочій камері, передає тепло елементам робочої камери і рівномірно розігріває бетонні вироби, що розташовані в ній. Необхідний надлишковий тиск у повітряному середовищі в теплоізолюваному корпусі створюється компресором з пневморесивером. Коли всередині бетонних виробів при нагріванні відбуватимуться процеси хімічної чи фізичної модифікації матеріалів, що пов'язані із поглинанням вологи (процеси гідратації цементу у бетонних виробках), то для забезпечення необхідного тепловологісного балансу в повітряному середовищі робочої камери необхідно додатково подавати воду. Для цього над аеродинамічним нагрівачем роторного типу відбувається розбризкування води через форсунки. Вода під дією високої температури

перетворюється в пару, яка разом із теплим повітрям рециркулює всередині робочої камери, створюючи відповідне за тиском і температурою пароповітряне середовище, що здійснює подальше нагрівання і зволоження поверхні та внутрішнього об'єму виробу. В разі потреби дотримання необхідного за технологічними вимогами тепловологісного режиму процеси подачі води періодично повторюються.

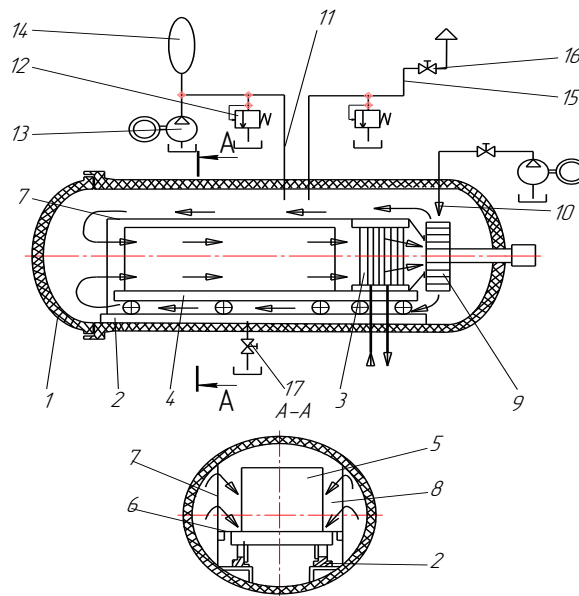


Рисунок. Автоклавна установка тепловологісної обробки:

Як відомо, режими обробки бетонів в пропарювальних камерах призначаються за нормативними рекомендаціями з обов'язковою експериментальною перевіркою та уточненнями, а методики розрахунку режимів, що виключають експеримент, відсутні. Нами проведено математичне моделювання процесу тепловологісної обробки бетонних виробів. При цьому розглядається пропарювальна камера як складна система, в якій її складові частини взаємодіють між собою: пароповітряний об'єм, вироби, форми виробів, корпус камери.

При створенні математичної моделі динаміки робочого процесу тепловологісної обробки будівельних виробів в пропарювальній камері із аеродинамічним нагрівом було прийнято наступні припущення [5]: пароповітряний об'єм камери є об'єктом із зосередженими параметрами; термічний опір, який створює плівка конденсату при конденсації пари нескінченно малий порівняно з опором дифузійного шару пароповітряної суміші, наявність плівки конденсату та її товщина не впливає на процеси тепломасообміну; тепло у виробах поширюється в основному за рахунок теплопровідності, причому, кількість теплоти, яка віддається нагрітими тілами стікаючому конденсату, є нескінченно малою порівняно з теплом, яке віддається пароповітряним середовищем; виріб – однорідне та капілярно-пористе тіло: арматура і грубодисперсні заповнювачі не впливають на розповсюдження тепла за просторовими координатами; деформація об'єму виробу, що пов'язана зі зміною температури, є досить незначною в порівнянні з вихідним об'ємом; закономірності процесу розповсюдження тепла є однаковими для всіх виробів: бетонний виріб являє собою необмежену пластину, тобто товщина виробу значно менша двох інших розмірів (довжини та ширини).

Розроблено математичну модель процесів тепло- і масообміну, що протікають в бетонних виробах при їх ТВО в пропарювальних автоклавних камерах в пароповітряній середовищі.

Баланс енергії для пароповітряного середовища у внутрішньому об'ємі пропарювальної автоклавної установки з рециркуляційним аеродинамічним нагрівачем можна записати в наступному вигляді [5]:

$$\frac{d(h^c M^c)}{d\tau} = Q^{nog} + Q^e - Q_{3a2}^m - Q_{3a2}^{kon} - Q_{3a2}^k - Q_{3a2}^{k0}, \tau > 0; h^c \cdot M^c = h_0^c \cdot M_0^c, \tau = 0, \quad (1)$$

де  $h_0^c$ ,  $M_0^c$  – початкове значення відповідно ентальпії та маси пароповітряної суміші у вільному об'ємі установки;  $Q^{nog} = G^{nog} \cdot h^{nog}$  – тепловиділення потоку повітря, який надходить від роторного

рециркуляційного аеродинамічного нагрівача;  $Q^e = G^e \cdot h^e$  – кількість теплоти, що вноситься в систему разом із зрошувальною водою;  $Q_{заг}^m$  – загальна кількість теплоти, яка передається за одиницю часу металоконструкції установки;  $Q_{заг}^{кон}$  – загальна кількість теплоти, яка передається за одиницю часу оброблюваним бетонним виробам;  $Q_{заг}^k$  – загальна кількість теплоти, яка випромінюється за одиницю часу в навколишній простір від зовнішньої поверхні корпусу робочої камери;  $Q_{заг}^{кд}$  – загальна кількість теплоти, яка передається за одиницю часу конденсату;  $G^{тов}$ ,  $G^e$  – витрата повітря та води;  $h^{тов}$ ,  $h^e$  – питома ентальпія повітря та води.

Для встановлення напруженого стану, який виникатиме у бетонному виробі окремо розглянута також математична модель напруженого стану бетонного виробу в процесі його тепловологісної обробки в пропарювальній камері у пароповітряному середовищі, яка відрізняється від відомих особливостями передачі теплової енергії та зміни вологовмісту в робочих камерах запропонованого типу, що надає можливість встановити раціональні режими зміни сумарних напружень у виробках, які сприятимуть оптимальному проходженню процесу гідrataції та тужавіння суміші.

Запропоновані алгоритми числового розв'язання методом скінчених різниць математичних моделей процесів тепло- і масообміну та напруженого стану у бетонних виробках. Здійснено перевірку адекватності запропонованих моделей на підставі отриманих експериментальних даних. Аналітично та експериментально встановлено взаємозв'язок між температурою, яка створюється всередині робочої камери пропарювальної автоклавної установки та її робочими, конструктивними параметрами і характеристиками, а саме: об'ємом робочої камери, геометричними розмірами нагрівача роторного типу, частоти обертання ротора.

Результати експериментальних досліджень підтверджують перетворення кінетичної енергії потоку повітряного середовища в теплову енергію. Внаслідок гальмування швидкості потоку зменшується його кінетична енергія, але вона не зникає, а перетворюється в теплоту, при цьому, загальний запас енергії залишається постійним у відповідності з першим законом термодинаміки.

#### **Висновок**

В результаті проведених досліджень запропоновано ефективні режими та раціональне конструктивне виконання запропонованої пропарювальної автоклавної установки із рециркуляційним аеродинамічним нагрівачем для тепловологісної обробки бетонних і залізобетонних виробів, як такою, що має суттєві технічні переваги у порівнянні із відомим серійним обладнанням. На підставі проведеного математичного моделювання розроблено науково обґрунтовану методику для проектування пропарювальних автоклавних установок різних типорозмірів з відповідними технологічними параметрами.

#### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Кучеренко А.А. Тепловые установки заводов сборного железобетона. Проектирование и примеры расчета / А.А. Кучеренко. – Киев: Вища шк., 1977. – 280 с.
2. Федосов С.В. Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии: монография / С.В. Федосов. – Иваново: ПресСто, 2010. – 363 с.
3. Федосов С.В. Влияние тепловлажностной обработки на эксплуатационные свойства бетона [Электронный ресурс]: С.В. Федосов, С.М. Бабанов, М.В. Акулова, М.В. Торопова //Изв. вузов. Строительство, 2003. – №7. С. 47 – 50. Режим доступа к журн.: <http://old.sibstrin.ru/izv2003.html>.
4. Сліпенька О.П. Аналітичне дослідження автоклавних установок із аеродинамічним нагрівом / О.П. Сліпенька, І.В. Коц // Вісник Хмельницького національного університету, 2006. – № 5. – С. 93 – 98.
5. Коц І.В. Тепловологісна обробка бетонних виробів з використанням аеродинамічного нагрівання : монографія / І.В. Коц, О. П. Колісник. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 114 с.
6. Патент 40453. МПК С04В 40/00 Пропарювальна камера/ Колісник О. П., Коц І. В. - № u200812905; Заявлено 05.11.2008; Опубл. 10.04.2009, Бюл. № 7.
7. Патент 40455. МПК С04В 40/00 Спосіб тепловологісної обробки будівельних виробів/ Колісник О. П., Коц І. В. - № u200812911; Заявлено 05.11.2008; Опубл. 10.04.2009, Бюл. № 7.

**Коц Іван Васильович** – к.т.н., професор кафедри інженерних систем у будівництві, Україна, м. Вінниця, Вінницький національний технічний університет, Email: [ivkots@i.ua](mailto:ivkots@i.ua)

**Kots Ivan V.** — Ph. D. (Eng.), professor of the department of engineering in construction., Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Email: [ivkots@i.ua](mailto:ivkots@i.ua)