

DOI: 10.18454/mca.2016.01.10

Федосов С.В.<sup>1</sup>, Гушин А.В.<sup>2</sup>, Федосеева М.Ю.<sup>3</sup><sup>1</sup>Доктор технических наук, <sup>2</sup>кандидат технических наук, <sup>3</sup>инженер,

Ивановский государственный политехнический университет

**АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОЗДУХА И ВОДЯНОГО ПАРА С ПОЗИЦИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ***Аннотация*

В статье рассмотрена проблема математического моделирования теплопереноса на стадии нагревания процесса тепловлажностной обработки железобетонных изделий. Показано, что для синтеза адекватной математической модели необходимо иметь полный перечень расчетных выражений для определения основных параметров воздуха и водяного пара с учетом их зависимости от влагосодержания и температуры. Установлено, что в практических расчетах важно учитывать теплоотдачу как конвекцией, так и излучением от паровоздушной среды к поверхности изделия.

**Ключевые слова:** тепловлажностная обработка, теплообмен, промышленность.

Fedosov S.V.<sup>1</sup>, Gushchin A.V.<sup>2</sup>, Fedoseeva M.Y.<sup>3</sup><sup>1</sup>PhD in Engineering, <sup>2</sup>PhD in Engineering, <sup>3</sup>engineer, Ivanovo State Politechnical University**ANALYSIS OF PHYSICAL PROPERTIES OF AIR AND WATER VAPOR FROM THE VIEWPOINT OF MATHEMATICAL MODELLING OF HEAT-HUMIDITY TREATMENT PROCESSES OF CONCRETE PRODUCTS***Abstract*

The problem of mathematical modeling of heat exchange during the stage of heat-humidity treatment of concrete products is discussed. It is shown, the full set of equations for calculation of air and water vapor parameters, including their humidity and temperature dependencies must be taken into account in order to synthesize the sufficient mathematical model. It is established that in practical calculations it is important to take into account the heat transfer as a convection, and a radiation from the vapor environment to the product surface.

**Keywords:** heat-humidity treatment processes, heat exchange, industry.

Процесс тепловлажностной обработки (ТВО) является одним из важнейших в технологии производства железобетонных изделий для крупнопанельного домостроения [1,2]. Традиционно [3,4] рассматривалось три стадии ТВО: начальный период прогрева (подъем температуры), период изотермической выдержки и период охлаждения. Правильность организации процесса ТВО позволяет в итоге получать готовое изделие с нормативными показателями проектных и эксплуатационных характеристик.

В основе существующих методов теплотехнического расчета камер ТВО лежит балансовый метод [5], по которому основной задачей расчета является определение размеров камер ТВО для обеспечения заданной производительности по готовой продукции, а также установление необходимого расхода пара, и, следовательно, энергозатрат на проведение процесса.

При этом одним из этапов расчета является определение коэффициента теплоотдачи от влажного воздуха к поверхности изделия и в этих условиях обычно принимается, что теплообмен между влажным воздухом, насыщенным водяным паром и обрабатываемым изделием происходит по закону естественной конвекции [4]. Для расчетов принимается критериальное уравнение вида [7]:

$$Nu=0,5(Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad (1)$$

Здесь критерии подобия:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda_{в.в.}} \quad \text{- теплообменный критерий Нуссельта.}$$

$$Gr = \frac{gL^3}{\nu_{в.в.}^2} \beta \Delta t = \frac{gL^3}{\nu_{в.в.}^2} \cdot \left| \frac{\rho_{к} - \rho_{п.и.}}{\rho_{к}} \right| \quad \text{- критерий Грасгофа} \quad (2)$$

$$Pr = \frac{\nu_{в.в.}}{a_{в.в.}} \quad \text{- критерий Прандтля} \quad (3)$$

В указанные критерии подобия входят теплотехнические характеристики влажного воздуха: плотность –  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>; кинематический коэффициент вязкости –  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с; коэффициент температуропроводности –  $a$ , м<sup>2</sup>/с и теплопроводности –  $\lambda$ , Вт/(м·К). Подстрочным индексом «в.в.» обозначена принадлежность к влажному воздуху. Кроме того в уравнениях (1)-(3) обозначено:  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $L$  – определяющий размер изделия, м;  $\rho_{к}$  – плотность влажного воздуха при температуре в камере ТВО, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{п.и.}$  – плотность влажного воздуха при температуре поверхности изделия, кг/м<sup>3</sup>.

Для выполнения конкретных расчетов необходимо наличие математических зависимостей для определения входящих в формулы (1)-(3) величин.

Ниже приводится сводка формул, заимствованных нами из литературы или полученных математической обработкой данных таблиц или графических зависимостей.

- относительная влажность воздуха [8]:

$$\varphi = \frac{P_n}{P_{н.н}} \cdot 100\%, \text{ где} \quad (4)$$

где  $P_n$  - парциальное давление пара, Па;

$P_{н.н}$  - парциальное давление насыщенного пара, Па;

- парциальное давление насыщенного водяного пара:

$$\lg P_{н.н} = 2,135 + \left[ \frac{156 + 8,12t_k}{236 + t_k} \right] \quad (5)$$

$t_k$  - температура в камере, °С;

- влагосодержание воздуха [8]:

$$x = \frac{M_{вл}}{M_{с.в}} = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot P_{н.н}}{P_k - \varphi \cdot P_{н.н}} \quad (6)$$

Здесь:  $M_{вл}$  - масса влаги в единице объёма, кг;

$M_{с.в}$  - масса сухого воздуха в единице объёма, кг;

$P_k$  - давление в камере, Па;

- плотность влажного воздуха [8]:

$$\rho_{вл.в} = 3,49 \frac{P_k}{T} - 1,32 \frac{P_n}{T} = \frac{1}{T} (3,49P_k - 1,32\varphi P_{н.н}) \quad (7)$$

- теплоёмкость влажного воздуха [8]:

$$C_{вл.в} = C_{с.в} + C_{в.п} \cdot x \quad (8)$$

$C_{с.в} = 1,005$  - теплоёмкость сухого воздуха, кДж/(кг·К);

$C_{в.п} = 1,807$  - теплоёмкость водяного пара, кДж/(кг·К);

- скрытая (удельная) теплота парообразования:

$$r^* \cdot 10^{-3} = 5,292 - 2,8 \exp(7,92 \cdot 10^{-4} t), \text{ кДж/кг} \quad (9)$$

(формула получена нами в результате обработки табличных данных [ ])

- теплопроводность влажного воздуха [9]

$$\lambda_{вл.в} = \lambda_{с.в}(1-x) + \lambda_{в.п} \cdot x \quad (10)$$

В диапазоне температур 0-100°С теплопроводность сухого воздуха может быть представлена следующей полученной нами зависимостью:

$$\lambda_{с.в} \cdot 10^2 = 0,0068 \cdot t + 2,369 \quad (11)$$

- динамический коэффициент вязкости сухого воздуха:

$$\mu = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1,5} \quad (12)$$

$\mu_0 = 18,27 \cdot 10^{-5}$  - вязкость сухого воздуха при 0°С, Па·с;

$T_0 = 291,15$  - температура при 20°С, К;

$C = 120$  - поправка Сазерленда, К.

- энтальпия (теплосодержание) влажного воздуха:

$$I = C_{с.в} \cdot t + x(r^* + C_{п} \cdot t), \text{ кДж/кг} \quad (13)$$

На рисунке 1, заимствованном нами из работ [10-12], показаны температурные графики в течение всего процесса ТВО в горизонтальной камере. Отчётливо видно, что температура поверхности изделия изменяется в течение первых двух периодов не так, как температура паровоздушной среды.

На рисунке 2 показано изменение критерия Нуссельта и соответствующее ему изменение коэффициента теплоотдачи во времени периода прогрева, учитывающее изменение теплофизических свойств.

Вместе с тем известно, что многоатомные газы (а к ним относятся и углекислый газ и водяной пар) способны излучать тепловую энергию.



Рис. 1 – Изменение температуры в камере ТВО:

I – температура поверхности изделия;

1 этап - период предварительной выдержки, 2 этап – период прогрева, 3 этап – изотермическая выдержка, 4 этап – период охлаждения.

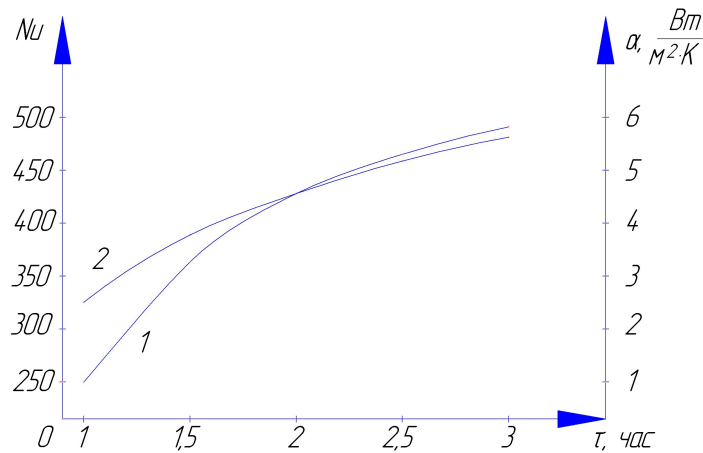


Рис. 2 – Изменение теплового критерия Нуссельта (1) и коэффициента теплоотдачи (2)

В этом случае можно предположить, что теплообмен в камере ТВО определяется не только конвективным теплопереносом, а существенную роль может играть и тепловое излучение.

В соответствии с принципами сложного теплообмена [Михеев] можно записать:

$$q_{сл} = q_{конв} + q_{изл} \quad (14)$$

где:  $q_{конв}$  и  $q_{изл}$  – соответственно плотности тепловых потоков посредством естественной конвекции и излучение, определяемые по выражениям:

$$q_{конв} = \lambda_{конв} (t_k - t_{п.и.}) \quad (15)$$

$$q_{изл} = \varepsilon_{np} \cdot C_0 \left\{ \left[ \frac{t_k + T_0}{100} \right]^4 - \left[ \frac{t_{п.и.} + T_0}{100} \right]^4 \right\} \quad (16)$$

Здесь:

$C_0 = 5,67$  коэффициент излучения абсолютно чёрного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$\varepsilon_{np}$  – приведённая степень черноты в системе «камера ТВО – изделие», определяется по формуле [4]:

$$\varepsilon_{np} = \frac{\varepsilon_n \cdot \varepsilon_{обем} \cdot \beta^*}{\varepsilon_{обем} + \varepsilon_n (1 - \varepsilon_{обем})} \quad (17)$$

Обработкой табличных экспериментальных данных в диапазоне температур 10-100°C нами получена следующая аппроксимальная формула:

$$\varepsilon_{np} = 0,179 + 0,01 [2,7t^2 - 6,05t + (-0,472t^2 + 0,246t + 1,4) P_n l^3 + (2,67t^2 - 0,566t - 15) \cdot P_n l^2 + (2,195t^2 - 7,48t + 47,2) P_n l] \quad (18)$$

Для определения величины поправочного коэффициента  $\beta^*$  имеются графические зависимости [4], аппроксимация которых может быть обобщена выражением:

$$\beta^* = -2,16P_n^2 + 0,056(P_n l)^2 - 0,282(P_n l) + 3,675P_n \quad (19)$$

Здесь:  $P_n$  – парциальное давление пара, Па;

$P_n l$  - величина параметра на графиках, где  $l$  - длина пути луча.

По аналогии с записью выражения (15) из выражения (16) можно записать следующую формулу для «модифицированного» коэффициента теплоотдачи излучением:

$$\alpha_{\text{изл}} = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot C_0 \cdot \left\{ \left[ \frac{t_{\text{к}} + T_o}{100} \right]^4 - \left[ \frac{t_{\text{п.и.}} + T_o}{100} \right]^4 \right\} \frac{1}{(t_{\text{к}} - t_{\text{п.и.}})} \quad (20)$$

На рисунке 3 показаны результаты расчётов по формулам (1) и (20).

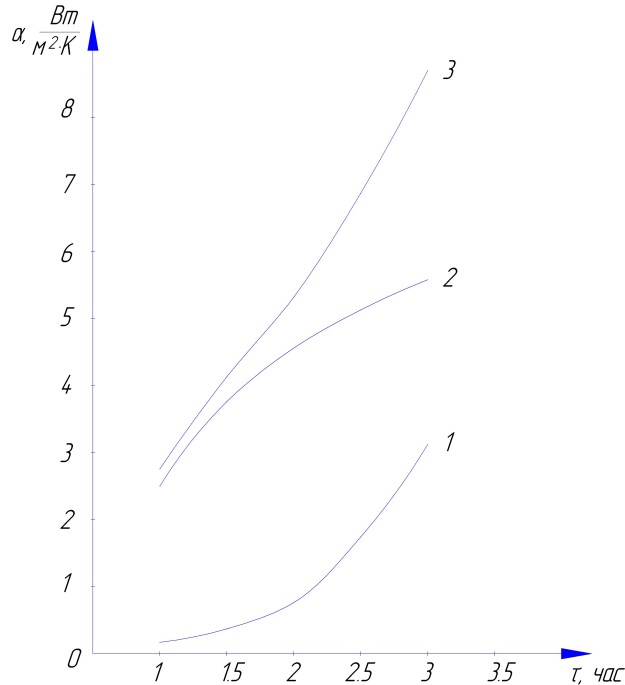


Рис. 3 – Изменение коэффициентов теплоотдачи излучением (1), конвекцией (2) и суммарного коэффициента сложного теплообмена (3)

Очень показательно, что по мере приближения состояния паровоздушной среды к состоянию насыщения от пара начинает приобретать всё большее значение.

#### Выводы:

1. Проведённый анализ литературных источников показывает, что в настоящее время основным методом расчёта камер тепловлажностной обработки железобетонных изделий и элементов конструкций является балансовый метод, позволяющий определить необходимые параметры ведения процессов ТВЛ и конструктивных параметров камер. Однако этот метод не позволяет учитывать динамику и кинетику явлений теплопереноса, оказывающих существенное влияние на структурообразование цементного камня и эксплуатационные характеристики изделий.

2. Показано, что для организации работы камер ТВО и разработки методов их расчёта необходимо учитывать изменение во времени процессы теплофизических параметров паровоздушной среды и обрабатываемого изделия. При этом следует учитывать влияние лучистой тепловой энергии от поступающего в камеру ТВО теплоносителя – насыщенного водяного пара.

#### Литература

1. Скрамтаев Б.Г., Балатьев П.К. Справочник по производству сборных железобетонных изделий, т.1, 2. - М.: Стройиздат, 1965. - 453 с.
2. Пособие по тепловой обработке железобетонных конструкций и изделий (к СНиП 3.09.01-85). - М.: Стройиздат, 1989. - 49 с.
3. Производство сборных железобетонных изделий: Справочник / Г. И. Бердичевский, А. П. Васильев, Л. А. Малинина и др.; Под ред. К. В. Михайлова, К. М. Королева. - М.: Стройиздат, 1989. - 477с.
4. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. - М.: Энергия, 1977. - 344 с.
5. Марьямов Н.Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона (процессы и установки). - М.: Стройиздат, 1970. - 272 с.
6. Федосов С.В., Ибрагимов А.М., Гушин А.В. Влияние режима процесса тепловлажностной обработки железобетонных ограждающих конструкции и изделия на их прочность // Строительные материалы. – 2006. - №9. - С.7-8.
7. Федосов С.В., Ибрагимов А.М., Гушин А.В. Применение методов математической физики для моделирования массо- и энергопередачи в технологических процессах строительной индустрии // Строительные материалы. – 2008. - №4. - С. 65-67.
8. Богословский Б.Н. Строительная теплофизика. Изд. 2-е перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 1982г. - 415с.

9. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Варгафтик Н.Б., Филиппов Л.П., Тарзиманов А.А., Тоцкий Е.Е. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 352.
10. Федосов С.В., Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Монография. – Иваново: ИПК «ПресСто», 2010. - 364 с.
11. Федосов С.В., Ибрагимов А.М., Гушин А.В. Нестационарный процесс теплопереноса в монолитном железобетонном перекрытии при использовании термоактивной опалубки. Часть I. // Строительные материалы XXI в. – 2006. - №2. - С. 56-57.
12. Федосов С.В., Ибрагимов А.М., Гушин А.В., Нестационарный процесс теплопереноса в монолитном железобетонном перекрытии при использовании термоактивной опалубки. Часть II // Строительные материалы XXI в. – 2006. - №3. - С.70.

#### References

1. Skramtaev B.G., Balathev P.K., Spravochnik po proizvodstvu sbornih zhelezobetonnykh izdeliy, т.1, 2. - М., Stroyizdat, 1965. - 453 с.
2. Posobie po teplovoj obrabotke zhelezobetonnykh konstruktсий i izdeliy (k SNiP 3.09.01-85). - М.: Stroyizdat, 1989. - 49 s.
3. Proizvodstvo sborniy zhelezobetonnykh izdeliy: Spravochnik / G. I. Berdichevskiy, A. P. Vasilev, L. A. Malinina i dr.; Pod red. K. V. Mihaylova, K. M. Koroleva. - М.: Stroyizdat, 1989. - 477s.
4. Miheev M.A., Miheeva I.M. Osnovy teploperedachi. Izd. 2-e, stereotip. - М.: Energiya, 1977. - 344 s.
5. Maryamov N.B. Teplovaya obrabotka izdeliy na zavodah sbornogo zhelezobetona (protsessy i ustanovki). - М.: Stroyizdat, 1970. - 272 s.
6. Fedosov S.V., Ibragimov A.M., Guschin A.V. Vliyanie rezhima protsessa teplovlazhnostnoy obrabotki zhelezobetonnykh ograzhdayuschih konstruktсий i izdeliy na ih prochnost // Stroitelnyye materialy. – 2006. - #9. - S.7-8.
7. Fedosov S.V., Ibragimov A.M., Guschin A.V. Primenenie metodov matematicheskoy fiziki dlya modelirovaniya massoi energoperedachi v tehnologicheskikh protsessakh stroitelnoy industrii // Stroitelnyye materialy. – 2008. - #4. - S. 65-67.
8. Bogoslovskiy B.N. Stroitel'naya teplofizika. Izd. 2-e pererab. i dop. - М.: Vysshaya shkola, 1982g. - 415s.
9. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Варгафтик Н.Б., Филиппов Л.П., Тарзиманов А.А., Тоцкий Е.Е. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 352.
10. Федосов С.В., Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Монография. – Иваново: ИПК «ПресСто», 2010. - 364 с.
11. Федосов С.В., Ибрагимов А.М., Гушин А.В. Нестационарный процесс теплопереноса в монолитном железобетонном перекрытии при использовании термоактивной опалубки. Часть I. // Строительные материалы XXI в. – 2006. - #2. - С. 56-57.
12. Федосов С.В., Ибрагимов А.М., Гушин А.В., Нестационарный процесс теплопереноса в монолитном железобетонном перекрытии при использовании термоактивной опалубки. Часть II // Строительные материалы XXI в. – 2006. - #3. - С.70.

DOI: 10.18454/mca.2016.01.11

Федюк Р.С.<sup>1</sup>, Храмов Д.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Кандидат технических наук, <sup>2</sup>студент, Дальневосточный федеральный университет  
ЛАБОРАТОРНОЕ ФИЗИКО-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОЛЫ УНОСА

*Аннотация*

*Современное строительное материаловедение направлено на разработку экологически чистых материалов с оптимальными физико-механическими и другими характеристиками. Наиболее эффективно использовать для этой цели применять такие методы, как рентгеновскую дифракцию, дифференциально-термический анализ, термогравиметрию, спектрометрический анализ. В результате различных исследований определены характеристики золы уноса теплоэлектростанций. Выявлено, что золы двух электростанций Приморского края из четырех пригодны для использования в качестве компонента композиционного вяжущего.*

**Ключевые слова:** зола уноса, рентгенофазовый анализ, дифференциально-термический анализ, термогравиметрия, спектрометрический анализ.

Fediuk R.S.<sup>1</sup>, Khramov D.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD in Engineering, <sup>2</sup>student, Far Eastern Federal University  
PHYSICAL EQUIPMENT SPECTROSCOPIC STUDY OF COAL ASH

*Abstract*

*Modern construction materials study aims to develop eco-friendly materials with optimum physical and mechanical and other characteristics. The most effective techniques used for this purpose are applied techniques such as X-ray diffraction, differential thermal analysis, thermogravimetry, spectrometric analysis. As a result of various studies we have identified characteristics of fly ash. It has been revealed that the two power stations out of four in Primorsky Region are suitable for use as a component of the composite binder.*

**Keywords:** coal ash, X-ray diffraction, differential thermal analysis, thermogravimetry, spectrometric analysis.