

УДК 666.972.17:519.8

**МЕЖФАЗНЫЙ ТЕПЛООБМЕН  
В КАМЕРАХ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

**INTERPHASE HEAT EXCHANGE  
IN THE HEAT AND HUMIDITY CHAMBERS MATERIALS PROCESSING**

*С.В. ФЕДОСОВ, А.В. ГУЩИН, М.Ю. ФЕДОСЕЕВА, А.Е. КРАЙНОВА*  
*S.V. FEDOSOV, A.V. GUSHCHIN, M.YU. FEDOSEEVA, A.E. KRAJNOVA*

(Ивановский государственный политехнический университет)  
(Ivanovo State Polytechnical University)  
E-mail: fedoseeva.m@list.ru

*В статье рассмотрены аспекты математического моделирования процессов внешнего теплообмена между паровоздушной средой и поверхностью железобетонного изделия в камере тепловлажностной обработки (ТВО). Показано, что в практических расчетах необходимо учитывать, что теплоотдача происходит по механизмам конвективного теплообмена, теплообмена излучением от водяного пара, а также посредством конденсации водяного пара.*

*Aspects of mathematical modeling of processes of the external heat exchange between the water vapor-air stream and the surface of concrete in the chamber of heat-humidity treatment (HHT) are discussed. It's shown that in practical calculations it's important to take into account the heat transfer as a convection, and a radiation from the water vapor stream to the concrete surface, and also by means of liquid condensation of water vapor.*

**Ключевые слова:** тепловлажностная обработка, внешний теплообмен, теплоотдача, водяной пар, твердый материал.

**Keywords:** heatmoist processing, external heat exchange, thermolysis, water vapor, solid material.

Ни одно из предприятий текстильной, легкой и смежных с ними отраслей промышленности не может успешно функционировать и производить необходимую для населения и экономики страны продукцию,

если его технологическое оборудование (как основное, так и вспомогательное) не располагается в комфортных условиях производственных помещений. А эти помещения выстраиваются из элементов и изделий:

фундаментных блоков, ферм, балок, свай, стеновых панелей, плит перекрытий и т.п. [1], [13].

И в соответствии с технологией производства [2], [12] все эти изделия, как правило, проходят этапы тепловлажностной обработки (ТВО), на которых для ускорения процессов получения высококачественных и прочных изделий они помещаются в специальные камеры ТВО, где по определенной программе в течение определенного времени проходят обработку насыщенным водяным паром.

При этом основной целью расчетов при проектировании камер ТВО, как ранее [3], так и в настоящее время [4], является определение расхода насыщенного водяного пара, необходимого для нагрева обрабатываемых изделий до требуемой температуры процесса и выдержки при этой температуре в течение определенного периода времени.

Основным методом расчета, изложенным в нормативной документации [5], учебной литературе [6] и монографиях [7], [8], является балансовый метод, не учитывающий кинетические особенности процесса, но в силу своей простоты позволяющий определять ориентировочные технологические параметры процесса ТВО в пределах допускаемой технологической погрешности  $\pm 20\%$ .

Вместе с тем, в процессах ТВО происходит не только изменение теплофизических параметров взаимодействующих сред, но протекают и структурно-химические изменения, определяющие будущие прочностные и эксплуатационные характеристики строительных материалов и изделий.

При поступлении насыщенного водяного пара в камеру ТВО в первую очередь происходит изменение температурно-влажностных параметров среды. Температура в камере изменяется от  $15 \dots 20^\circ\text{C}$  (температура предварительно отформованных изделий, поступающих на обработку) до температуры  $70 \dots 95^\circ\text{C}$  (температура пара, заполнившего камеру и вытеснившего весь первоначальный объем воздуха). При этом относительная влажность смеси воздуха и водяного пара изменяется от начальной ( $\varphi = 30 \dots 60^\circ\text{C}$ ) до насыщения ( $\varphi = 100^\circ\text{C}$ ),

соответственно этому изменяются и значения коэффициента теплообмена между паровоздушной смесью и изделием.

На начальном этапе ТВО теплообмен осуществляется по механизму конвективной теплоотдачи (при этом значение коэффициента теплоотдачи находится в пределах  $5 \dots 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ). На этапе перехода к периоду изотермической выдержки все более возрастает роль теплоотдачи при конденсации водяного пара.

Немаловажным фактором является расположение изделия в камере ТВО. В отечественной промышленности применяются камеры с горизонтальным расположением изделий (агрегатно-поточный, конвейерный и стендовый способы производства), а также вертикальное расположение (при кассетном способе производства) [9].

Коэффициент теплоотдачи рекомендуется определять из соотношения:

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

Здесь обозначено:  $\text{Nu} = \frac{\alpha L}{\lambda}$  – теплообменный критерий Нуссельта, определяющий интенсивность конвективного теплообмена между паровоздушной средой и поверхностью изделия;  $\text{Gr} = \frac{gL^3}{\nu^2} \beta \Delta t$  – теплообменный критерий Грасгофа;  $\text{Pr} = \frac{\nu}{a}$  – теплообменный критерий Прандтля.

Теплофизические и геометрические характеристики, входящие в критерии подобия, имеют следующий смысл:  $\alpha$  – коэффициент теплообмена (теплоотдачи) между паровоздушной средой и изделием,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $L$  – определяющий геометрический размер изделия, м (как правило, за таковой выбирается длина или ширина);  $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $a$  – коэффициенты: теплопроводности, кинематической вязкости, температуропроводности паровоздушной смеси, соответственно:  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\beta$  – коэффициент температурного расширения смеси,  $1/\text{К}$ ;  $\Delta t$  – разность температур между газом и поверхностью изделия,  $\text{К}$ .

В работе [10] показано, что при подаче насыщенного водяного пара в камеру ТВО все теплофизические характеристики паровоздушной среды изменяются. Кроме того с ростом температуры и влажности воздуха возрастает роль теплового излучения. Известно [4], что многоатомные газы способны излучать (и поглощать) лучистую энергию. Этой способностью обладает и трехатомный водяной пар. Расчеты показывают [10], что в камерах ТВО радиационная составляющая такого потока может составлять до 80% от конвективной.

В камерах с вертикальным расположением изделий несколько иная физическая картина процессов теплообмена. В соответствии с ней [11] при поступлении пара в камеру на поверхности изделия образуется пленка конденсата переменной толщины. На рис. 1 (пленочная конденсация влаги на поверхности материала:  $t_M^0$  – температура поверхности материала,  $t_{ж}^0$  – температура жидкости (сконденсированного пара),  $t_{см}^0$  – температура парогазовой смеси) приведена заимствованная нами из [11] картина.

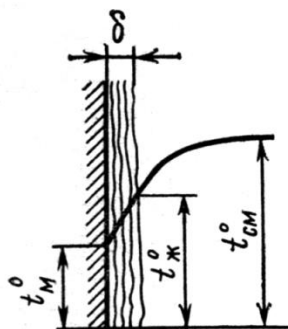


Рис. 1

И в первом (горизонтальном) и во втором (вертикальном) случаях теплообменный процесс может быть условно разделен на три этапа:

1) теплоотдача конвекцией от паровоздушной смеси к поверхности изделия, осложненная тепловым излучением от водяного пара;

2) сложный теплообмен конвекцией и излучением с нарастающей конденсацией водяного пара;

3) теплоотдача от конденсирующегося водяного пара.

Уравнение теплового баланса для элемента поверхности изделия имеет вид:

$$q_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma}(t_{п.в} - t_{пов}) = \alpha_{к.п}(t_{п.в} - t_{пов})(1 - \kappa) + \beta_{п} r^* (P_{п.в} - P_{пов}) \frac{m_{п}}{RT} \kappa. \quad (2)$$

Здесь  $P_{п.в}$  – парциальное давление водяного пара в объеме камеры ТВО при температуре паровоздушной смеси, Па;  $P_{пов}$  – парциальное давление пара вблизи поверхности материала при температуре поверхности, Па;  $\kappa$  – доля поверхности теплообмена, занятая сконденсированным паром;  $m_{п}$  – молекулярная масса водяного пара, моль/кг.

Физический смысл слагаемых уравнения (2) очевиден: при  $\kappa = 0$  теплоотдача осуществляется по механизму 1, при  $\kappa = 1$  вся поверхность материала покрыта пленкой конденсата и теплоотдача осуществляется по механизму 3.

Решая уравнение (2) относительно обобщенного коэффициента теплоотдачи, запишем:

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{к.п}(1 - \kappa) + \frac{\beta_{п} r^* (P_{п.в} - P_{пов})}{(t_{п.в} - t_{пов})} \kappa, \quad (3)$$

где  $\beta_{п}^* = \beta_{п} \frac{m_{п}}{RT}$  – модифицированный коэффициент массоотдачи.

На рис. 2 (изменение коэффициентов теплоотдачи в камере ТВО: 1 – теплоотдача излучением; 2 – теплоотдача конвекцией; 3 – суммарный коэффициент сложного теплообмена конвекцией и излучением; 4 – суммарный коэффициент теплоотдачи с учетом конденсирующегося водяного пара) приведена иллюстрация расчетов по уравнению (3).

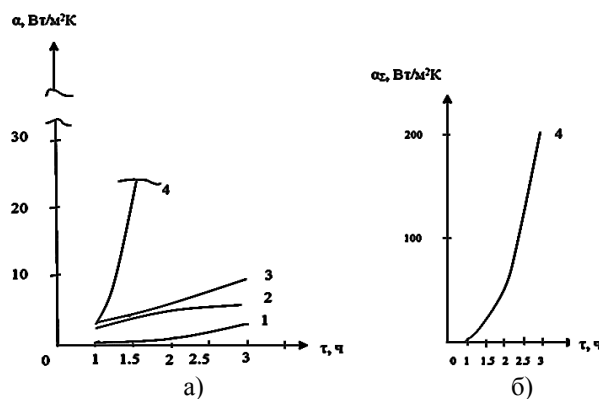


Рис. 2

Расчеты выполнены для нескольких случаев:

1) коэффициент теплоотдачи определялся при начальной температуре  $t_0=15^\circ\text{C}$  по формуле (1);

2) коэффициент теплоотдачи определялся с учетом зависимости теплофизических параметров от температуры;

3) расчеты проводились с учетом теплового излучения;

4) расчеты проводились при учете линейной зависимости  $\kappa$  от времени прогрева в соответствии с выражением:

$$\kappa = \frac{\tau}{\tau_{\text{пр}}}, \quad (4)$$

где  $\tau_{\text{пр}}$  – время периода прогрева.

Графическая иллюстрация приведенных результатов расчетов убедительно показывает необходимость учета всех составляющих внешнего теплообмена между паровоздушным потоком переменных теплофизических параметров и меняющейся температурой поверхности изделия в камере ТВО. Современные методики компьютерного моделирования позволяют создавать необходимое программное обеспечение для выработки практических рекомендаций по проектированию оптимальных технологических режимов процессов ТВО и типоразмеров промышленного оборудования.

## ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены теоретические представления о механизме теплообменных процессов в камере тепловлажностной обработки изделий. Показано, что перенос теплоты от поступающей в камеру паровоздушной смеси осуществляется по механизмам естественной конвекции, теплового излучения и поверхностной конденсации водяного пара.

2. На примере конкретных практических расчетов показано, что с увеличением подачи пара в камеру ТВО сначала теплообмен осуществляется по механизму тепловой газовой конвекции, затем все более возрастает вклад лучистой составляющей и капельной конденсации, причем процесс со-

провождается увеличением численных значений обобщенного коэффициента теплоотдачи более чем на порядок.

3. Полученные результаты рекомендуются для корректировки методики расчета параметров процессов тепловлажностной обработки материалов с целью получения более достоверной информации о динамике температурных параметров, что в свою очередь позволяет более обоснованно подойти к анализу проблем гидратации компонентов цементного клинкера и структурообразования бетонной матрицы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Власов П.В., Мартынов А.А., Николаев С.Д. Проектирование ткацких фабрик. – М.: Легкая промышленность, 1983.
2. Баженов Ю.М. Технология бетона. – М.: АСВ, 2002.
3. Мазуров Д.Я. и др. Теплотехника и теплотехническое оборудование предприятий промышленности строительных материалов. – Ч. 2. – М.: Госстройиздат, 1966.
4. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – Изд. 2-е, стереотип. – М.: Энергия, 1977.
5. Руководство по тепловой обработке бетонных и железобетонных изделий. – НИИЖБ Госстроя СССР, ВНИИЖелезобетон Минстройматериалов СССР. – М.: Стройиздат, 1974.
6. Баженов Ю.М., Комар А.Г. Технология бетонных и железобетонных изделий. – М.: Стройиздат, 1984.
7. Марьямов Н.Б. Тепловая обработка изделий на заводах сборного железобетона (процессы и установки). – М.: Стройиздат, 1970.
8. Малинина Л.А. Тепловлажностная обработка тяжелого бетона. – М.: Стройиздат, 1971.
9. Воробьев В.А. Строительные материалы. – М.: Высшая школа. – 1973.
10. Федосов С.В., Гуцин А.В., Федосеева М.Ю. Анализ физических свойств воздуха и водяного пара с позиций математического моделирования процессов тепловлажностной обработки железобетонных изделий // Современное строительство и архитектура. – 2016, №1. С. 53...57.
11. Еремин Н.Ф. Процессы и аппараты в технологии строительных материалов. – М.: Высшая школа, 1986.
12. Федосов С.В., Акулова М.В., Кокшаров С.А., Метелева О.В. Теоретические основы тепломассопереноса в перспективных технологиях производства материалов текстильной и строительной отраслей промышленности // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, №6. С. 170...174.

13. Румянцева В.Е., Хрунов В.А., Шестеркин М.Е. Определение ресурса безопасной эксплуатации зданий и сооружений из бетона // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, №4. С.131...136.

#### REFERENCES

1. Vlasov P.V., Martynov A.A., Nikolaev S.D. Proektirovanie tkackih fabrik. – M.: Legkaja promyshlennost', 1983.

2. Bazhenov Ju.M. Tehnologija betona. – M.: ASV, 2002.

3. Mazurov D.Ja. i dr. Teplotehnika i teplotehničeskoe oborudovanie predpriyatij promyshlennosti stroitel'nyh materialov. – Ch. 2. – M.: Gosstrojizdat, 1966.

4. Miheev M.A., Miheeva I.M. Osnovy teploperedachi. – Izd. 2-e, stereotip. – M.: Jenergija, 1977.

5. Rukovodstvo po teplovoj obrabotke betonnyh i zhelezobetonnyh izdelij. – NIIZhB Gosstroja SSSR, VNIIZhelezobeton Minstrojmaterialov SSSR. – M.: Strojizdat, 1974.

6. Bazhenov Ju.M., Komar A.G. Tehnologija betonnyh i zhelezobetonnyh izdelij. – M.: Strojizdat, 1984.

7. Mar'jamov N.B. Teplovaja obrabotka izdelij na zavodah sbornogo zhelezobetona (processy i ustanovki). – M.: Strojizdat, 1970.

8. Malinina L.A. Teplovlazhnostnaja obrabotka tjazhelogo betona. – M.: Strojizdat, 1971.

9. Vorob'ev V.A. Stroitel'nye materialy. – M.: Vysshaja shkola. – 1973.

10. Fedosov S.V., Gushhin A.V., Fedoseeva M.Ju. Analiz fizicheskikh svojstv vozduha i vodjanogo para s pozicij matematičeskogo modelirovanija processov teplovlazhnostnoj obrabotki zhelezobetonnyh izdelij // Sovremennoe stroitel'stvo i arhitektura. – 2016, №1. S.53...57.

11. Eremin N.F. Processy i apparaty v tehnologii stroitel'nyh materialov. – M.: Vysshaja shkola, 1986.

12. Fedosov S.V., Akulova M.V., Koksharov S.A., Meteleva O.V. Teoreticheskie osnovy teplomasoperehosa v perspektivnyh tehnologijah proizvodstva materialov tekstil'noj i stroitel'noj otraslej promyshlennosti // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2015, №6. S.170...174.

13. Rumjanceva V.E., Hrunov V.A., Shesterkin M.E. Opredelenie resursa bezopasnoj jekspluatacii zdaniy i sooruzhenij iz betona // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2015, №4. S.131...136.

Рекомендована кафедрой техносферной безопасности. Поступила 15.11.16.

УДК 67/68:331.344.2