

ФИЗИКА. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 519.63; 536.248.2; 666.9
MSC 39A14.

DOI 10.18413/2687-0959-2020-52-4-262-270

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ЦЕПНЫХ ЗАВЕСАХ ЦЕМЕНТНЫХ ПЕЧЕЙ: ТЕПЛООБМЕН ПРИ ИСПАРЕНИИ ВЛАГИ ИЗ ШЛАМА С ПАДАЮЩЕЙ СКОРОСТЬЮ

Б. З. Федоренко, А. С. Горлов, В. И. Петрашев

(Статья представлена членом редакционной коллегии А. В. Носковым)

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова
г. Белгород, 308012, Россия

E-mail: bz9393@mail.ru

Аннотация. В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с оптимизацией теплообмена в цепных завесах цементных печей мокрого способа производства. Оптимизация этих процессов связана, в том числе, с разработкой математических моделей процессов, позволяющих адекватно представлять тепломассообменные процессы в цепных завесах. Только в этом случае возможно осуществить проектирование оптимальных процессов и оптимальных режимов работы цепных завес цементных печей. В статье рассмотрены модели испарения влаги с падающей скоростью при прямом тепловлагообмене с испарением влаги из пленки шлама на цепях в потоке газа и при регенеративном тепловлагообмене с испарением влаги из шлама, соприкасающегося с цепями на поду печи. Получены оценки испарения влаги с падающей скоростью в прямом режиме тепловлагообмена. Приведена модель испарения влаги с падающей скоростью в регенеративном режиме тепловлагообмена. Приведены результаты расчетов тепломассообменных процессов в цепной завесе цементной печи с использованием комплекса программ, в котором использованы и рассмотренные в работе модели испарения влаги. Рассмотренные в статье вопросы по испарению влаги с падающей скоростью дают возможность разработки уточненного комплекса программ расчета тепломассообменных процессов в цепных завесах цементных печей с тепловлагообменом при различных режимах прямого и регенеративного тепловлагообмена с падающей скоростью испарения влаги.

Ключевые слова: Цепная завеса цементной печи, прямой тепловлагообмен с падающей скоростью испарения влаги, регенеративный тепловлагообмен с падающей скоростью испарения влаги, математическая модель тепловлагообмена, оценки тепловлагообмена.

Для цитирования: Федоренко Б. З., Горлов А. С., Петрашев В. И., 2020. Оптимизация теплообмена в цепных завесах цементных печей: теплообмен при испарении влаги из шлама с падающей скоростью. Прикладная математика & Физика. 52(4): 262–270. DOI 10.18413/2687-0959-2020-52-4-262-270.

OPTIMIZATION OF THE HEAT EXCHANGE IN THE CHAIN VEILS OF THE CEMENT KILNS: THE HEAT EXCHANGE IN THE EVAPORATION OF MOISTURE FROM THE SLUDGE WITH THE DECREASING VELOCITY

B. Z. Fedorenko, A. S. Gorlov, V. I. Petrashev

(Article submitted by a member of the editorial board A. V. Noskov)

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov,
Belgorod, 308012, Russia
E-mail: bz9393@mail.ru

Received October 10, 2020

Abstract. This article deals with questions related to optimization of the heat exchange in the cement kilns chain veils of the wet production method. Optimization of these processes is connected, among other things, with the development of mathematical models that allow to adequately represent heat and mass transfer processes in chain veils. Only in this case it is possible to implement the design of optimal processes and optimal working regime of the cement kilns chain veils. In this article the models of the moisture evaporation with the decreasing velocity in the regime of the direct heat and moisture exchange with the moisture evaporation from sludge film on the chains in the gas flow and in the regenerative heat and moisture exchange with the moisture evaporation from sludge touching the chains on the hearth of oven, are considered. The estimations of the moisture evaporation with the decreasing velocity in the regime of the direct heat and moisture exchange are obtained. A model of moisture evaporation with the decreasing velocity in the regenerative regime of the heat and moisture exchange is shown. The results of the calculation of the heat and mass exchanging processes in the chain veils of the cement kiln with the application of a program complex, based on a simplified model of moisture evaporation with the decreasing velocity in the regenerative regime of the heat and moisture exchange, are presented. The questions of moisture evaporation with the decreasing velocity, considered in this article give the possibility of the creation of the refined program

complex of calculation of the heat and mass exchanging processes in the chain veils of the cement kilns with the heat and moisture exchange by the different regimes of the direct and regenerative the heat and moisture exchange with the decreasing velocity of the moisture evaporation.

Key words: the chain veil of a cement kiln, the direct heat and moisture exchange with the decreasing velocity of moisture evaporation, the regenerative heat and moisture exchange with the decreasing velocity of moisture evaporation, mathematical model of the heat and moisture exchange, the estimations of the heat and moisture exchange.

For citation: Fedorenko B. Z., Gorlov A. S., Petrashev V. I. 2020. Optimization of the heat exchange in the chain veils of the cement kilns: the heat exchange in the evaporation of moisture from the sludge with the decreasing velocity. Applied Mathematics & Physics. 52(4): 262–270 (in Russian). DOI 10.18413/2687-0959-2020-52-4-262-270.

Введение. Оптимизация и энергосбережение при производстве цемента мокрым способом опирается на оптимизацию тепломассообменных процессов в цепных завесах цементных печей. Оптимизация этих процессов связана, в том числе, и с разработкой математических моделей, позволяющих адекватно представлять тепломассообменные процессы в цепных завесах. Только в этом случае возможно осуществить проектирование оптимальных процессов и оптимальных режимов работы цепных завес цементных печей.

Одним из наиболее сложных для анализа процессов тепломассообмена в цепных завесах цементных печей является процесс испарения влаги из шлама с падающей скоростью. Этот процесс можно наглядно представить на характерном примере. Цепи цепных завес с пленкой шлама на них обдуваются потоком горячего газа. За счет конвективного теплообмена влага испаряется с поверхности шлама. При недостаточной диффузии влаги (за счет капиллярной подвижности) из глубинной области слоя шлама на обдуваемой газом поверхности образуется слой сухого шлама. Со временем толщина слоя сухого шлама увеличивается. Поток тепла к слою влажного шлама уменьшается, то есть имеет место испарение влаги с падающей скоростью испарения [3]-[5].

В настоящей работе рассматриваются следующие вопросы:

- приводится математическая формулировка различных типов задач испарения влаги с падающей скоростью, имеющих место в цепных завесах цементных печей мокрого способа производства;
- рассматриваются различные методы решения задач, связанных с математическими моделями процессов испарения влаги с падающей скоростью испарения;
- приводятся аналитические оценки процессов испарения влаги с падающей скоростью, необходимые для качественного анализа процессов и зависимости их от физических и конструктивных параметров;
- приводятся примеры численных оценок тепломассообменных процессов в цепных завесах цементных печей на основе разработанных моделей.

Приведенные результаты показывают:

- процессы испарения влаги с падающей скоростью в цепных завесах цементных печей могут быть проанализированы на основе принятых моделей процессов с использованием численных методов;
- необходима дальнейшая разработка методов анализа процессов испарения влаги с падающей скоростью испарения, и разработка комплекса программ расчета по оптимизации тепломассообменных процессов в цепных завесах в целом.

Модели процессов испарения влаги в цепных завесах с падающей скоростью испарения. Классическая задача о фазовом переходе – задача Стефана. При изменении температуры тела может происходить изменение его физического состояния, то есть имеет место фазовый переход (например, твердое состояние-жидкость, жидкость-пар). На поверхности фазового перехода сохраняется постоянная температура. При фазовом переходе происходит выделение (или поглощение) скрытой теплоты фазового перехода. Задача о распределении температуры при наличии фазового перехода и о скорости движения границы раздела фаз – это классическая задача Стефана [7]. Математическая формулировка задачи Стефана следующая (рассматривается плоская задача):
найти решение уравнений теплопроводности

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial t} &= a_1^2 \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2}, 0 < x < \xi, \\ \frac{\partial u_2}{\partial t} &= a_2^2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2}, \xi < x < \infty \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

при дополнительных условиях

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= c \text{ при } x = 0, \\ u_2 &= c \text{ при } t = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

и условиях на границе раздела фаз

$$u_1 = u_2 = u_0 \text{ при } x = \xi, \quad (3)$$

$$k_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} \Big|_{x=\xi} - k_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} \Big|_{x=\xi} = r \rho \frac{\partial \xi}{\partial t}, \quad (4)$$

где $u_1(x, t)$, $u_2(x, t)$ – температуры фаз вещества; k_1, k_2 – коэффициенты теплопроводности первой и второй фазы; r – скрытая теплота фазового перехода; a_1^2, a_2^2 – коэффициенты температуропроводности фаз; ρ – плотность фазы; $x = \xi$ – граница раздела фаз; u_0 – постоянная температура фазового перехода. Даже в простейших случаях аналитическое решение задачи Стефана достаточно сложное [7].

Испарение влаги в цепной завесе с падающей скоростью при прямом тепловлагообмене. Прямой тепловлагообмен в цепной завесе имеет место при непосредственном обдувании газом цепей с пленкой шлама на поверхности. Испарение влаги с поверхности пленки материала на цепи с падающей скоростью описывается следующей задачей Стефана (при малой толщине пленки шлама можно рассматривать плоскую задачу):

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = a_{MC}^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, & 0 < x < \xi, t > 0, \\ u = u_{MB}, & \xi < x < \infty, \\ \alpha (T_\Gamma - u|_{x=0}) = \lambda_{MC} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=0}, \\ -\lambda_{MC} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=\xi} = r \cdot \chi \cdot \rho_{MC} \frac{\partial \xi}{\partial t}, \end{cases} \quad (5)$$

где $u = u(x, t)$ – температура шлама; a_{MC}^2 – коэффициент температуропроводности сухого шлама; $x = \xi$ – фронт, разделяющий сухой и влажный шлам; u_{MB} – температура влажного шлама (принимается $u_{MB} = 100^\circ\text{C}$); λ_{MC} – коэффициент теплопроводности сухого шлама; α – коэффициент теплообмена с газовым потоком;

$$\alpha = \text{Nu} \cdot \frac{\lambda_\Gamma}{D}, \quad (6)$$

Nu – число Нуссельта; λ_Γ – коэффициент теплопроводности газа; D – гидравлический диаметр прутка цепи (с учетом пленки шлама на цепи); T_Γ – температура газа; r – удельная теплота парообразования воды;

$$\chi = \frac{w}{(100 - w)};$$

w – относительная влажность шлама в %; ρ_{MC} – плотность сухого шлама; при поперечном обтекании газом цилиндра число Нуссельта определяется следующими соотношениями [2]:

$$\text{Nu} = \begin{cases} 0,52\text{Pr}^{0,37} \cdot \text{Re}^{0,5} & \text{при } 40 < \text{Re} < 1000, \\ 0,25\text{Pr}^{0,37} \cdot \text{Re}^{0,6} & \text{при } 1000 < \text{Re} < 2 \cdot 10^5, \end{cases} \quad (7)$$

где $\text{Pr} = \nu/a^2$ – число Прандтля, $\text{Re} = W_1 D/\nu$ – число Рейнольдса, ν – кинематическая вязкость газа.

Первое уравнение системы (5) – уравнение теплопроводности в области сухого шлама; второе уравнение – граничное условие, показывающее, что за фронтом фазового перехода температура шлама равна 100°C ; третье уравнение – граничное условие, описывающее теплообмен на границе газовый поток-поверхность пленки шлама по закону Ньютона; последнее уравнение – условие Стефана, определяющее движение фронта фазового перехода. Задача Стефана может быть решена численно. На основании решения задачи Стефана проводится расчет массы испарившейся влаги и снижение температуры газового потока.

Регенеративный тепловлагообмен в цепных завесах при испарении влаги с падающей скоростью. В случае регенеративного тепловлагообмена в цепной завесе цепи нагреваются в газовом потоке, а затем, попадая в шлам, отдают тепло шламу и испаряют влагу. Испарение влаги с падающей скоростью испарения с поверхности контакта влажного шлама с нагретой цепью описывается

следующей задачей Стефана (приводится формулировка плоской задачи):

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = a_{MC}^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, & 0 < x < \xi, t > 0, \\ \frac{\partial u_1}{\partial t} = a_{Ц}^2 \cdot \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2}, & -h < x < 0, t > 0, \\ u = u_{MB}, & \xi < x < h_{пл}, \\ \left. \frac{\partial u_1}{\partial x} \right|_{x=-h} = 0, \\ u_1|_{x=0-0} = u|_{x=0+0}, \\ \lambda_{Ц} \cdot \left. \frac{\partial u_1}{\partial x} \right|_{x=0-0} = \lambda_{MC} \cdot \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=0+0}, \\ -\lambda_{MC} \cdot \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=\xi} = r \cdot \chi \cdot \rho_{MC} \frac{\partial \xi}{\partial t}, \end{cases} \quad (8)$$

где $u(x, t)$, $u_1(x, t)$ – температуры шлама и цепи соответственно; $a_{Ц}^2$ – коэффициент температуропроводности материала цепей; $\lambda_{Ц}$ – коэффициент теплопроводности материала цепей; h – толщина слоя металла; $h_{пл}$ – эквивалентная толщина прилегающей к цепи пленки шлама.

Первое уравнение системы (8) – уравнение теплопроводности в области сухого шлама; второе уравнение – уравнение теплопроводности в слое металла; третье уравнение – граничное условие, показывающее, что за фронтом фазового перехода температура шлама равна 100°C; четвертое уравнение – условие теплоизоляции; пятое и шестое уравнения – граничные условия, определяющие равенство температур и потоков тепла на поверхности контакта цепь – шлам; последнее уравнение – условие Стефана, определяющее движение фронта фазового перехода.

Тепловлагообмен в системе цепь – шлам в рассматриваемом случае описывается сопряженной задачей – совместной задачей теплопроводности в цепи и теплопроводности с испарением влаги в шламе. Решение сопряженных задач сложно, что приводит к поискам упрощения исходной задачи.

Приближенные методы решения задачи Стефана. Оценка прямого тепловлагообмена в цепных завесах с падающей скоростью. На основе математической модели [2] были получены формулы, позволяющие оценивать толщину $\xi(t)$ высохшего слоя шлама, находящегося на цепях, обдуваемых нагретым газом с температурой $T_{Г}$, за время t . В работе [6] эта задача сводится к решению задачи Коши:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\frac{\lambda_{MC}}{r\chi\rho_{MC}} \cdot \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=\xi}, \quad \xi(0) = 0. \quad (9)$$

Решение получено в виде степенного ряда, каждый член которого определяется с использованием всех уравнений системы (5):

$$\xi_1 = \gamma\delta\Delta u t - \left(\gamma^2\delta^3\Delta u^2 + \frac{1}{a^2}\gamma^3\delta^3\Delta u^3 \right) \frac{t^2}{2!} + \left(3\gamma^3\delta^5\Delta u^3 + \frac{8}{a^2}\gamma^4\delta^5\Delta u^4 + \frac{5}{a^2}\gamma^5\delta^5\Delta u^5 \right) \frac{t^3}{3!} \dots, \quad (10)$$

где $\gamma = \frac{\lambda_{MC}}{r\chi\rho_{MC}}$, $\Delta u = T_{Г} - 100$, $\delta = \frac{\alpha}{\lambda_{MC}}$, $a^2 = \frac{\lambda_{MC}}{C_{MC}\rho_{MC}}$.

В расчетах формула (10) применялась с двумя первыми членами ряда. Так как время пребывания цепи в газе около 20 секунд и оно меньше, чем $t = \frac{a^2}{a^2\gamma\delta^2\Delta u + \gamma^2\delta^2\Delta u^2}$ (t – точка экстремума функции (10) с двумя членами ряда), то формулу (10) можно применить для оценки нижней границы величины $\xi(t)$.

Другая формула, полученная в работе [6] для оценки толщины высохшего слоя шлама на цепи $\xi(t)$

$$\xi_2 = \frac{2\gamma\delta\Delta u t}{\sqrt{1 + 2\gamma\delta^2\Delta u t + 1}}. \quad (11)$$

Эта формула получена на основании системы (5) в предположении очень малой удельной теплоемкости C_{MC} (тогда $a^2 \rightarrow \infty$), вследствие чего все тепло расходуется на испарение. Поэтому формула (11) дает верхнюю границу величины $\xi(t)$. Отметим также, что формулу (11) можно применять в случае, если безразмерная величина $\mu = \frac{\gamma\Delta u}{a^2} < 1$. В противном случае, $\mu > 1$, более точную верхнюю границу величины $\xi(t)$ дает формула

$$\xi_3 = \frac{2\gamma\delta\Delta u t}{\sqrt{1 + 2\gamma\delta^2\Delta u \mu t + 1}}, \quad (12)$$

Таблица 1. Оценка толщины высохшего слоя шлама ξ на цепи; ξ_1 – оценка снизу, ξ_2 – оценка сверху
 Table 1. Estimation of the thickness of the dried sludge layer ξ on the chain; ξ_1 – lower estimate, ξ_2 – upper estimate

x	T_{Γ}	W_1	w	$h_{пл}$	$\lambda_{МС}$	$C_{МС}$	$\rho_{МС}$	v	λ_{Γ}	$\xi_1(20)$	$\xi_2(20)$
м	°С	м/с	%	м	$\frac{Вт}{м \cdot град}$	$\frac{Дж}{кг \cdot град}$	кг/м ³	м ² /с	$\frac{Вт}{м \cdot град}$	мм	мм
27	368	8,2	34,8	0,0051	0,93	877	1650	$58,21 \cdot 10^{-6}$	0,0518	0,1365	0,1366
30	414	8,3	32,6	0,0076	0,93	894,5	1650	$64,82 \cdot 10^{-6}$	0,0528	0,1669	0,1671
36	600	4,6	22,1	0,020	0,93	936	1650	$96,89 \cdot 10^{-6}$	0,0622	0,2063	0,3894

полученная в работе [1] (так как $\xi_1 < \xi_2$ при $\mu > 1$). В работе [1] была также получена асимптотическая формула для величины $\xi(t)$ при больших значениях времени сушки t :

$$\xi_4 = \sqrt{2a^2(1 - e^{-\mu})t}. \quad (13)$$

Она дает лучшую оценку, чем ξ_2 и ξ_3 , верхней границы толщины слоя высохшего материала с плоской поверхностью, но только при достаточно большом времени сушки. А именно, при $\mu < 1$ находим корень t_1 уравнения $\xi_2 = \xi_4$:

$$t_1 = \frac{2(1 - e^{-\mu})}{\delta^2 a^2 (\mu - 1 + e^{-\mu})^2}. \quad (14)$$

Тогда при времени сушки $t > t_1$ формула (13) дает лучшую оценку верхней границы $\xi(t)$, чем формулы (11) или (12). При $\mu > 1$ находим корень t_2 уравнения $\xi_3 = \xi_4$:

$$t_2 = \frac{2(1 - e^{-\mu})}{\delta^2 a^2 (\mu^2 - 1 + e^{-\mu})^2}. \quad (15)$$

При $t > t_2$ используется формула (13).

В таблице 1 приводятся оценки толщины высохшего слоя шлама ξ по данным о параметрах тепло-технологических процессов в цементной печи по таблице 3 на 27-м, 30-м и 33-м метрах. Расчет проведен с использованием формул (10) и (11). (Предполагается, что при данных влажностях шлама жидкость в шламе находится в заземленном состоянии и вода не диффундирует к поверхности испарения.) Из таблицы видно, что по мере движения шлама в цементной печи к горячему ее концу возрастает температура газа и убывает влажность шлама. Соответственно возрастает толщина высохшего за 20 секунд шлама (20 секунд – это среднее время пребывания цепи в потоке газа за один оборот цементной печи, равной 39,2 сек.). Однако на тридцать шестом метре происходят качественно новые изменения: толщина пленки $h_{пл}$ на цепях возрастает настолько, что шлам полностью заполняет пространство между прутками звена цепи, соответственно резко увеличивается гидравлический диаметр обтекаемой газом цепи (на 36 метре он составляет около 0,1 м) и резко снижается скорость газа W_1 . Поэтому, несмотря на резкое повышение температуры и сильное снижение влажности шлама, толщина высохшего слоя не выросла столь же значительно.

Упрощение задачи о регенеративном теплообмене в цепных завесах при испарении влаги с падающей скоростью. Упрощение задачи о регенеративном теплообмене при испарении влаги с падающей скоростью, описываемой системой (8), достигается заменой цепи с распределенными параметрами (и уравнения теплопроводности в цепи) на тело с сосредоточенными параметрами: с теплоемкостью цепи, средней температурой и условием теплопередачи от цепи к пленке шлама. Такое упрощение задачи возможно, потому что коэффициент теплопроводности материала цепи существенно больше коэффициента теплопроводности шлама. Температура в сечении цепи быстро выравнивается. Уравнение теплопроводности в цепи можно не решать, а рассматривать среднюю температуру цепи $u_{Ц}$ из условия баланса. Задача Стефана в этом случае принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = a_{МС}^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, & 0 < x < \xi, t > 0, \\ u = u_{МВ}, & \xi < x < \infty, \\ u|_{x=0} = u_{Ц}, \\ -\lambda_{МС} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=\xi} = r \cdot \chi \cdot \rho_{МС} \frac{\partial \xi}{\partial t}. \end{cases} \quad (16)$$

Таблица 2. Параметры цементной печи и цепной завесы
Table 2. Parameters of cement kiln and chain veil

Общие данные по печи						
Размеры печи – 5 × 185м.						
Период вращения – 39,2с.						
Производительность – 72 т.кл./ч.						
Расход тепла – 6300 кДж/кг.кл.						
Температура отходящих газов – 225°С.						
Навеска цепей по шестизаходному винту.						
Параметры цепной завесы						
Номер участка цепной завесы от загрузочного конца	1	2	3	4	5	6
Длина участка, м	8,2	16,6	8,5	12	4,8	8,2
Тип навески цепей: гирляндная (г) или свободно висящая (с)	г	г	г	г	г	г
Длина цепей, м	4,4	5,76	5,76	5,76	4,4	2,8
Коэффициент плотности навески цепей, м ² /м ²	3,3	4,4	5,8	8,7	5,5	4,4

Таблица 3. Результаты расчетов технологических процессов в цементной печи
Table 3. The results of calculations of technological processes in a cement kiln

x	T _Г	T _М	T _{Ц₁}	T _{Ц₂}	W ₁	W ₂	w	P	W _М	h _{пл}	ξ	m _Ж	ТЗ	УЧ
м	°С	°С	°С	°С	м/с	м/с	%	мм водн. ст.	мм/с	мм	мм	кг/см	-	-
0	225	20	49	56	6,9	19,2	37,5	0	57	3,2	0	0	1	1
3	235	26	51	57	7,1	19,6	37,5	2,5	57	3,2	0	0	1	1
6	244	32	57	63	7,2	19,9	37,5	4,9	57	3,2	0	0	1	1
9	255	38	63	69	7,8	22,8	37,5	7,9	53	3,2	0	0	1	2
12	268	46	71	78	8,0	23,3	37,5	11,9	53	3,2	0	0	1	2
15	281	54	80	87	8,2	23,9	37,5	16,1	53	3,2	0	0	1	2
18	294	62	89	96	8,4	24,5	37,5	20,4	53	3,2	0	0	1	2
21	310	70	94	100	8,6	25,1	37,3	24,7	52	3,3	0	0,2	2	2
24	335	77	96	100	8,9	26,2	36,3	29,2	50	4,0	0	0,4	2	2
27	368	84	97	100	8,2	33,1	34,8	34,9	41	5,1	0	0,5	2	3
30	414	90	98	100	8,3	36,3	32,6	42,7	39	7,6	0	0,6	2	3
33	477	95	99	100	8,1	42,6	29,3	51,9	36	13,7	0	0,9	2	3
36	600	98	100	100	4,6	76,0	22,1	77,3	25	20,0	0	1,6	2	4
37	639	99	159	174	9,7	52,7	19,7	85,9	18	0	0,69	1,2	3	4
38	668	103	176	200	9,9	53,8	17,9	91,2	18	0	0,85	0,8	3	4
39	703	108	171	198	10,1	55,1	15,8	96,5	18	0	0,90	1,0	3	4
40	742	112	164	193	10,4	56,5	13,3	102	18	0	0,95	1,1	3	4
41	786	117	151	183	10,7	58,1	10,3	107	18	0	1,01	1,2	3	4
42	838	120	131	168	11,0	59,9	6,6	113	18	0	1,09	1,4	3	4
43	901	123	95	140	11,4	61,9	1,8	118	18	0	1,20	1,6	3	4
44	921	136	324	334	11,5	62,8	0	124	18	0	0	0,4	4	4
45	935	173	458	473	11,7	63,5	0	129	18	0	0	0	4	4
48	971	273	569	585	7,8	44,8	0	138	22	0	0	0	4	5
51	999	353	625	638	2,3	31,7	0	142	22	0	0	0	4	6
54	1016	403	618	629	2,3	32,1	0	144	22	0	0	0	4	6
57	1031	447	650	660	2,4	32,5	0	145	22	0	0	0	4	6
58	1036	462	661	671	2,4	32,6	0	145	22	0	0	0	4	6
59	1041	476	672	682	2,4	32,7	0	146	22	0	0	0	4	6

В такой постановке задача тепломассообмена в системе цепь-шлам решается следующим образом. Решается задача Стефана (16). Определяются затраты тепла на нагревание материала и испарение влаги. После этого на основании теплового баланса определяют уменьшение температуры цепи. Такая постановка задачи Стефана была использована при разработке комплекса программ для расчета теплотехнологических процессов в цепных завесах вращающихся цементных печей [8], [9].

В цепной завесе может иметь место следующая ситуация. При критической влажности шлама физическая вода теряет капиллярную подвижность и при этом шлам теряет пластичность. При выходе цепи из шлама на ней не образуется слой шлама. При критической и меньшей влажности режим испарения влаги с падающей скоростью реализуется в следующем варианте. Цепь без слоя материала погружается в шлам на подду печи. Около цепи образуется слой влажного шлама. За счет теплопроводности и испарения влаги в шламе начинает образовываться слой сухого шлама, то есть начинается испарение влаги с падающей скоростью. Этот процесс описывается упрощенной задачей Стефана (16). Именно эта ситуация и была принята во внимание при разработке комплекса программ [8]. Разработанный комплекс программ был опробован. Расчеты с его использованием давали результаты, близкие к реальным.

Приводятся результаты расчета теплотехнологических процессов в печи № 4 цемзавода ОАО «Осколцемент», при температуре отходящих газов 225°C. Параметры печи и цепной завесы приведены в таблице 2. Расчеты проводились для случая решения задачи Стефана (16) по уточненному по сравнению с [8] методу: теплообмен между цепью и слоем шлама на ней находится по методу итераций. Результаты расчетов приведены в таблице 3. Результаты расчетов (таблица 3) показывают, что уточнение модели задачи Стефана (16) дает лучшее совпадение с промышленным экспериментом, чем при расчетах по комплексу программ [9]. Детально представлены результаты расчетов в зоне регенеративного теплообмена при испарении влаги с падающей скоростью (x от 37 м до 43 м).

При расчетах в цепных завесах выделяются четыре характерные теплотехнологические зоны: 1) нагревание шлама и цепей с пленкой шлама на них до температуры кипения воды в пленке; 2) испарение влаги из пленки шлама на цепях с постоянной скоростью испарения; 3) испарение влаги из сыпучего влажного шлама с падающей скоростью в регенеративном режиме; 4) нагревание сухого шлама в регенеративном режиме.

Примечание: обозначения в таблицах: x – расстояние по цепной завесе от холодного конца, м; $T_{г}$ – температура газа, °C; $T_{ш}$ – температура шлама, °C; $T_{Ц1}$, $T_{Ц2}$ – температура цепей при выходе из шлама и перед погружением в шлам соответственно, °C; W_1 и W_2 – скорость газа в части сечения печи, занятой цепями, и под цепями, м/с; w – влажность шлама, %; P – падение давления газа на участке цепной завесы от сечения x до холодного конца, мм вод. ст.; W_M – скорость движения материала вдоль печи, мм/с; $h_{пл}$ – толщина пленки шлама на цепях, мм; ξ – толщина высохшей пленки шлама, прилегающей к цепи, мм; $m_{ж}$ – масса испарившейся воды на погонном метре печи в сек., кг/с.м; ТЗ – номер теплотехнологической зоны; УЧ – номер участка цепной завесы. (В работе [8] допущена опечатка. Следует считать, что в таблице 1 приведены результаты расчетов процессов в печи № 4, а в таблице 2 – в печи № 2).

После создания комплекса программ расчета теплотехнологических процессов в цепных завесах цементных печей [8] работы по уточнению моделей процессов в цементных печах и разработке методов расчета процессов были продолжены [1], [6], [10]-[15]. В настоящее время существует возможность разработки модифицированного, уточненного комплекса программ расчета теплотехнологических процессов в цепных завесах цементных печей.

Заключение. Рассмотрены вопросы тепловлагообмена в цепных завесах цементных печей при испарении влаги с падающей скоростью.

1. Проведено исследование модели тепловлагообмена при непосредственном конвективном теплообмене между газом и пленкой шлама на цепях и испарении влаги с падающей скоростью. Получены оценки тепловлагообмена, толщины высохших слоев шлама на цепях. Эти оценки могут быть использованы для качественного анализа испарения влаги с падающей скоростью. Разработанная модель тепловлагообмена может быть использована при создании пакета программ расчета тепломассообмена в цепных завесах.

2. Представлена упрощенная модель регенеративного тепловлагообмена при расчете потока тепла от газа к цепям и от цепей к шламу, и испарения влаги с падающей скоростью. Аналитическое решение задачи регенеративного тепловлагообмена затруднительно. Задача решается численно. Приводится пример расчета тепловлагообмена в цепной завесе с использованием разработанного комплекса программ, в котором использована представленная уточненная модель регенеративного тепловлагообмена.

3. Рассмотренные модели испарения влаги с падающей скоростью целесообразно использовать при разработке уточненного комплекса программ расчета тепломассообменных процессов в цепных завесах цементных печей.

4. Выбор оптимального режима работы и оптимальных параметров цепной завесы упрощается с использованием комплекса программ расчета тепломассообмена в режиме прямого моделирования процессов (например, увеличения теплообмена в цепных завесах можно добиться при увеличении

скорости газа в цепной завесе, но увеличение скорости газа обеспечивается при уменьшении плотности навески цепей в цепной завесе, а это приводит к уменьшению теплообмена: нахождение оптимума в этом случае чрезвычайно сложно и возможно только с использованием прямого моделирования процесса теплообмена.

Аналогичная ситуация складывается при нахождении оптимума теплообмена на участке цепной завесы с регенеративным теплообменом с падающей скоростью испарения влаги, когда оптимум теплообмена связан с выбором скорости продвижения материала по цепной завесе и т. д.).

Список литературы

1. Горлов А. С., Петрашев В. И. 2017. Асимптотическое решение однофазной задачи о высыхании материалов при больших значениях времени. Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 7: 136–139.
2. Кутателадзе С. С. 1990. Теплопередача и гидравлическое сопротивление. М.: Энергоатомиздат, 367.
3. Классен В. К. 2012. Технология и оптимизация производства цемента. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 308.
4. Лыков А. В. Теория сушки. М.: Энергия, 480.
5. Муштаев В. И., Ульянов В. М. 1988. Сушка дисперсных материалов. М.: Химия, 352.
6. Петрашев В. И. 2000. Об оценке толщины высохшего слоя шлама в цементной печи. Известия ВУЗов. Строительство. 10: 17–18.
7. Тихонов А. Н., Самарский А. А. 2004. Уравнения математической физики. М.: Наука, 798.
8. Федоренко Б. З., Борзенков А. В., Петрашев В. И. 1993. Комплекс программ для расчета теплотехнологических процессов в цепных завесах вращающихся цементных печей. Цемент. 3: 17–18.
9. Федоренко Б. З. 1993. Математическая модель теплотехнологических процессов в цепных завесах вращающихся цементных печей. Цемент. 3: 18–22.
10. Федоренко Б. З., Горлов А. С. 1995. Математическое моделирование управления движением материала в зоне цепной завесы вращающейся цементной печи. Ресурс- и энергосберегающие технологии строительных материалов, изделий и конструкций: Междунар. конф., Белгород: Изд-во БелГТАСМ. 91–92.
11. Федоренко Б. З. 2000. Математическое моделирование теплообменных процессов в цепных завесах цементных печей. Известия ВУЗов. Строительство. 10: 129–135.
12. Федоренко Б. З. 2001. Моделирование, анализ и оптимизация теплотехнологических процессов в цепных завесах цементных печей. Современные проблемы строительного материаловедения: материалы Седьмых академ. чтений РААСН. Белгород: Изд-во БелГТАСМ. Ч. 2. 347–359.
13. Федоренко Б. З. 2003. Математическая модель аэродинамики вращающейся цементной печи. Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 6: 401–421.
14. Федоренко Б. З. 2005. Турбулентное движение жидкости: уточнённая модель Прандтля. Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 10: 302–306.
15. Федоренко Б. З., Горлов А. С., Петрашев В. И. 2018. Модели аэродинамических процессов в цепных завесах цементных печей. Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 7: 103–115.

References

1. Gorlov A. S., Petrashev V. I. 2017. Asimptoticheskoe reshenie odnofaznoi zadachi o visikhanii materialov pri bolshih znacheniyah vremeni [Asymptotic solution of a single-phase problem of the materials drying with the large values of time]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 7: 136–139.
2. Kutateladze S. S. 1990. Teploperedacha i gidravlichesкое soprotivlenie [Heat transfer and hydraulic resistance]. M.: Energoatomizdat, 367.
3. Klassen V. K. 2012. Tehnologiya i optimizatsia proizvodstv tsementa [Technology and optimization of cement production]. Belgorod: BGTU. 308.
4. Likov A. V. 1968. Teoria sushki [Theory of drying]. M.: Energy, 480.

5. Mushtaev V. I., Ul'janov V. M. 1988. Sushka dispersnih materialov [Drying of dispersed materials]. M.: Chemistry, 352.
6. Petrashev V. I. 2000. Ob otsenke tolschini visohshego sloya shlama v tsementnoi pechi [About the estimation of the thickness of a dried sludge's layer in the cement kiln]. News of higher educational institutions. Building. 10: 17–18.
7. Tikhonov A. N., Samarskii A. A. 2004. Uravnenia matematicheskoi fiziki [The equations of the mathematical physics]. M.: Science, 798.
8. Fedorenko B. Z., Borzenkov A. V., Petrashev V. I. 1993. Kompleks programm dlya raschyota teplotehnologicheskikh protsessov v tsepnih zavesah vraschayuschihsya tsementnih pechei [Complex of the programs for calculation of heat processes in the chain veils of rotary cement kilns]. Cement. 3: 17–18.
9. Fedorenko B. Z. 1993. Matematicheskaya model teplotehnologicheskikh protsessov v tsepnih zavesah vraschayuschihsya tsementnih pechei [Mathematical model of heat processes in the chain veils of rotary cement kilns]. Cement. 3: 18–22.
10. Fedorenko B. Z., Gorlov A. S. 1995. Matematicheskoe modelirivanie upravleniya dvizheniem materiala v zone tsepnih zaves vraschayuschihsya tsementnih pechei [Mathematical modeling of motion control of the material in the zone of the chain veil of a rotating cement kiln]. Resource and energy-saving technologies of building materials, products and structures: International conference. Belgorod. 91–92.
11. Fedorenko B. Z. 2000. Matematicheskoe modelirivanie teplomassoobmennih protsessov v tsepnih zavesah tsementnih pechei [Mathematical modeling of heat and mass transfer processes in the chain veils of cement kilns]. The news of higher educational institutions. Building. 10: 129–135.
12. Fedorenko B. Z. 2001. Modelirovanie, analiz i optimizatsiya teplotehnologicheskikh protsessov v tsepnih zavesah tsementnih pechei [Modeling, analysis and optimization of thermal processes in the chain veils of cement kilns]. Modern problems of building materials: materials of the Seventh academic readings RAABS. Belgorod. Part 2. 347–359.
13. Fedorenko B. Z. 2003. Matematicheskaya model aerodinamiki vraschayuscheisya tsementnoi pechi [Mathematical model of aerodynamics of a rotating cement kiln]. Bulletin BSTU named after V. G. Shukhov. 6: 401–421.
14. Fedorenko B. Z. 2005. Turbulentnoe dvizhenie zhidkosti: utochnyonnaya model Prandtlya [Turbulent fluid motion: a refined Prandtl model]. Bulletin BSTU named after V.G. Shukhov. 10: 302–306.
15. Fedorenko B. Z., Gorlov A. S., Petrashev V. I. 2018. Modeli aerodinamicheskikh protsessov v tsepnih zavesah tsementnih pechei [Models of aerodynamic processes in the chain veils of cement kilns]. Bulletin BSTU named after V.G. Shukhov. 7: 103–115.

Получена 10.10.2020

Федоренко Борис Зиновьевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова.

 <http://orcid.org/0000-0001-8263-7141>

ул. Костюкова, д. 46, Белгород, 308012, Россия

E-mail: bz9393@mail.ru

Горлов Александр Семенович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой высшей математики Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова.

 <http://orcid.org/0000-0002-6695-0442>

ул. Костюкова, д. 46, Белгород, 308012, Россия

E-mail: belgoras@mail.ru

Петрашев Владимир Иванович – старший преподаватель кафедры высшей математики Белгородского государственного технологического университета имени В. Г. Шухова.

 <http://orcid.org/0000-0002-2157-3276>

ул. Костюкова, д. 46, Белгород, 308012, Россия

E-mail: petrashev_v@mail.ru