Результаты прогноза расхода воды по секциям ЗВО при скорости разливки v = 1 м/мин. приведены в табл. 2. Удельный расход воды рассчитывали по формуле $g = \frac{1}{60}\alpha$.

Таблица 2

Прогноз расхода воды на охлаждение трефовидного слитка при v = 1 м/мин

№ секции	l, м	p, м	S, м^2	α, Вт/м^{2}К	$\alpha_л$, Вт/м^{2}К	g, м^3/м^{2}ч	G, м^3/ч
I	0,50	0,836	0,418	462,0	180,0	4,70	1,96
II	0,75	0,836	0,627	469,2	157,3	5,20	3,26
III	1,25	0,836	1,045	447,5	136,4	5,19	5,42
IV	3,00	0,836	2,508	358,7	123,7	3,92	9,82
V	5,50	0,130	0,715	235,1	117,6	1,96	1,40

Общий по всем секциям ЗВО расход воды на охлаждение заготовки $G = \sum_i G_i$ составил 21,87 м^3/ч.

Таким образом, в работе приведена универсальная методика расчета расходов воды в ЗВО при непрерывной разливке заготовок со сложной формой поперечного сечения, которая позволяет прогнозировать длину ЗВО, количество секций, расходы воды и участки периметра охлаждаемой поверхности слитка в каждой секции ЗВО.

Литература

1. *Молочников, Н.В.* Совмещение непрерывной разливки стали и прокатки трубных заготовок / Н.В. Молочников, А.А. Целиков, А.М. Ротенберг // Сталь. – 1970. – № 5. – С. 408 – 412.

2. *Коновалов, Ю.В.* Настоящее и будущее литейно-прокатных агрегатов / Ю.В. Коновалов // Производство проката. – 2009. – № 10. – С. 36 – 48.

3. *Сивак, Б.А.* Технологические основы проектирования машин и оборудования прокатного производства: Сортовые и листовые литейно-прокатные агрегаты для металлургических мини-заводов / Б.А. Сивак. – М., 2001.

4. *Кабаков, З.К.* Инженерный способ расчета вторичного охлаждения крупного непрерывного слитка / З.К. Кабаков, В.А. Горяинов, А.Г. Подорванов, Е.А. Чесницкая // Металлургическая теплотехника. – М., 1976. – № 5. – С. 28 – 33.

5. *Павздерин, А.И.* Влияние рифлений поверхности слитка на конфигурацию его фронта затвердевания / А.И. Павздерин, З.К. Кабаков // Вестник ЧГУ. – 2011. – № 1. – С. 95 – 99.

УДК 62-6

Н.Н. Синицын, Д.А. Домрачев, В.С. Грызлов

КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛОТНОГО СЛОЯ БИОТОПЛИВА И ЕГО ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ

Предложена методика определения конструктивных параметров плотного слоя биотоплива. Методика расчета прогрева пластины с учетом фазового перехода влаги, теплотехническая оптимизация плотного слоя.

Плотный слой, параметры, коэффициент теплоотдачи, теплопроводность, испарение влаги, оптимизация.

The technique of determining the design parameters of the dense bed of biofuel is offered in the article. Calculation procedure of heating the plate taking into account the phase transition of moisture and heat engineering optimization of dense bed are considered in the paper.

Dense bed, parameters, coefficient of heat transfer, heat conductivity, moisture evaporation, optimization.

При расчете плотного слоя, в котором осуществляется нагрев материала, исходными данными являются: агрегатная производительность, средняя начальная $T_{пл}^{нач}$ и конечная $T_{пл}^{кон}$ температуры материала, начальная температура газов $T_{Г}^{нач}$, дисперсный состав материала и его удельная поверхность $F_{пл}^{уд}$ (на единицу массы), порозность слоя $m_{п.с.}$.

К числу управляющих параметров теплотехнического принципа плотного фильтрующего слоя относится размер куска материала d_k. Теплотехническая оптимизация плотного фильтрующего слоя по данному параметру сводится к определению оптимального значения $d_к^{опт}$, соответствующего минимальным удельным энергозатратам на процесс. С ростом d_k могут уменьшиться издержки на подготовку технологического материала, но одновременно из-за роста высоты слоя может наблюдаться повышение аэродинамического сопротивления слоя и, как следствие, рост энергозатрат на дутье. Уменьшение d_k создает более благоприятные условия для тепломассообмена в слое, но приводит к увеличению площади сечения и снижению высоты слоя, что может негативно сказаться на равномерности обработки материала, однородности качества.

Теплоэнергетическая оптимизация плотного слоя заключается в выборе таких значений его параметров, при которых обеспечивается снижение уровня удельной энергоемкости процесса. Для оценки про-

цессов, протекающих при прогреве древесного топлива, выполнены исследования на специально разработанной и изготовленной экспериментальной установке, позволяющей проводить комплексный анализ процессов тепло- и массообмена для одиночных частиц при условиях, близких к условиям реальности в плотном слое.

Уравнение подобия для расчета теплоотдачи от вертикальной пластины к воздуху [1]

$$\overline{\mathrm{Nu}} = 0,478 \cdot \mathrm{Gr}_l^{1/4},$$

в котором $\mathrm{Gr}_l = gl^3 \cdot \beta(T_{ст} - T_ж)/\nu^2$, ($T_{ст} = \mathrm{const}$); g = = 9,81 м/с^2; l – высота пластины, м; $\beta = 1/T_ж$; $T_{ст}$ и $T_ж$ – температуры стенки и воздуха; ν – коэффициент кинематической вязкости м^2/с. Для расчета теплоотдачи к воздуху от горизонтальной пластины существует формула [1]

$$\overline{\mathrm{Nu}} = 0,24 \cdot \mathrm{Gr}_l^{1/4},$$

в которой $\mathrm{Gr}_l = \frac{gl^3}{\nu^2} \cdot \frac{T_{ст} - T_ж}{T_ж}$; $\overline{\mathrm{Nu}} = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$ – среднее число Нюссельта; l – длина пластины; λ – коэффициент теплопроводности воздуха.

Формула справедлива при $10^5 < \mathrm{Gr}_l < 10^9$, теплоотдающая поверхность обращена вниз. В том случае, когда нагретая (теплоотдающая) поверхность обращена вверх, применяется формула [1]:

$$\overline{\mathrm{Nu}} = 0,54\mathrm{Ra}^{1/4}, \qquad (1)$$

справедливая для квадратной пластины при $10^5 < \mathrm{Ra} < 2 \cdot 10^{-7}$, здесь $\mathrm{Ra} = \mathrm{Gr}_l \mathrm{Pr}$ – число Релея, построенное по определяющему размеру l; Pr – число Прандтля.

В этих формулах физические свойства среды отнесены к температуре $0,5(T_{ст} + T_ж)$.

В формуле (1) за характерный размер принята сторона квадрата. Эту формулу можно применять и в том случае, когда холодная сторона пластины обращена вниз и $T_{ст} < T_ж$. Для практических расчетов радиационно-конвективного теплообмена используют принципы независимости конвективного и лучистого потоков друг от друга, что оказывается достаточно верным, если один из них значительно меньше другого. Так, для расчета теплоотдачи излучением к коэффициенту теплопроводности конвекцией, подсчитанному обычным образом (то есть без учета влияния радиационного теплообмена на профили скорости и температуры), рекомендуется прибавлять условный коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_л$ так, что коэффициент теплоотдачи от газов к наружной поверхности выражается:

$$\alpha = \alpha_к + \alpha_л.$$

Здесь $\alpha_л$ – условный коэффициент теплоотдачи излучением, полученный делением лучистого потока на разность температур между материалом и поверхностью реакционной камеры

$$\alpha_л = q_л / (T_{ст} - T_м),$$

где $q_л$ – лучистый поток, $T_{ст}$ и $T_м$ – температура стенки реакционной камеры и материала.

$$q_л = \varepsilon_м \cdot 5,67 \left[\left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_м}{100} \right)^4 \right],$$

где $\varepsilon_м$ – степень черноты материала.

Время прогрева материала при $\mathrm{Bi} = \bar{\alpha} \cdot d_k / \lambda_м < 0,1$ можно определить из уравнения теплопередачи

$$m_k \cdot \Delta q_м = F_k \bar{q}_{пов} \cdot \Delta\tau_м,$$

где m_k – масса куска материала; $\Delta q_м$ – удельное теплопотребление материала; F_k – площадь поверхности куска; $\bar{q}_{пов}$ – средняя плотность теплового потока к поверхности куска за время $\Delta\tau_м$.

Время заданной тепловой обработки материала в слое при $\mathrm{Bi} = \bar{\alpha} \cdot d_k / \lambda_м > 0,1$ можно определить из решения дифференциального уравнения теплопроводности в виде [2]:

$$c_{эф} \rho_м \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_м \frac{\partial^2 T}{\partial x^2},$$

где $c_{эф} = \begin{cases} C_1, T > T_л \\ \frac{C_1 + C_2}{2} + \frac{L}{T_л - T_с} \\ C_2, T < T_с \end{cases}$.

Величина $c_{эф}$ называется эффективной теплоемкостью, с помощью которой учитывают тепловыделения и испарение влаги; C_1 и C_2 – удельная теплоемкость влажного и сухого материалов; L – теплота испарения влаги. $T_л$ и $T_с$ – некоторые температуры материала в окрестности температуры испарения влаги. Разность между этими температурами выбирается в пределах ΔT = 5÷10 °С. Плотность материала $\rho_м = \rho_1$ плотности сухого материала при $T > T_{исп}$, $\rho_м = \rho_2$ при температуре материала меньше температуры испарения. В качестве $T_л$ и $T_с$ следует выбрать значения $T_л = T_{исп} + \Delta T/2$; $T_с = T_{исп} - \Delta T/2$. Толщина сухого слоя материала определяется на координате изотермы $T = T_{исп}$ – температура испарения влаги.

Для адаптации модели проведены экспериментальные исследования прогрева коры. Экспериментальная установка приведена на рис. 1.

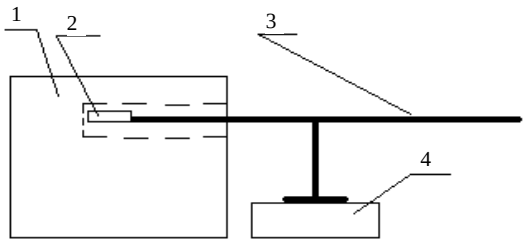


Рис. 1. Установка для мониторинга динамики изменения массы вещества:

1 – печь; 2 – исследуемый образец (кора ели, березы); 3 – устройство для помещения образца в печь; 4 – весы высокой точности

В ходе опыта в печь 1 помещалось устройство 3 с исследуемым образцом 2, изменение массы фиксировалось на весах высокой точности 4. Эксперимент проводился с использованием секундомера. Размер частицы коры ели 40×40×3 мм, частицы коры березы 40×40×2,5 мм; температура, при которой проводились опыты, – 400 ºС. На данной установке был проведен ряд экспериментов. Результаты представлены на рис. 2, 3.

Исходя из обобщенных опытных данных можно отметить, что для коры ели при температуре 400 ºС появление запаха отмечено в период 2,5 – 3 мин., появление дыма – в период 2,5 – 3,5 мин., прекращение выхода дыма – в интервале времени 7 – 12 мин. Для коры березы при температуре 400 ºС появление запаха отмечено в период 0,5 – 1 мин., появление дыма – в период 1,0 – 1,5 мин., прекращение выхода дыма – в интервале времени 10,5 – 18 мин. Таким образом, предложенная методика позволит определить конструктивные параметры плотного фильтрующего слоя материала, провести теплотехническую оптимизацию.

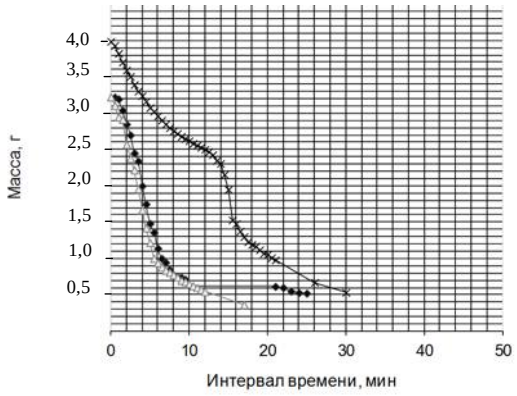


Рис. 2. Сжигание коры ели при температуре 400 ºС

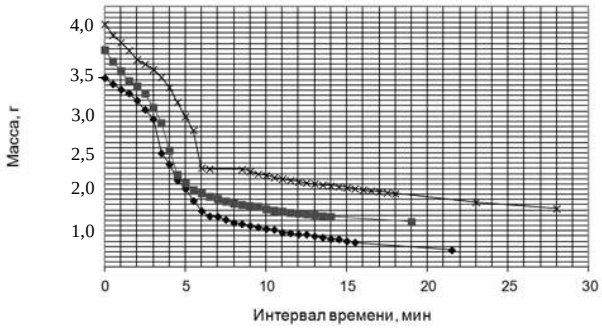


Рис. 3. Сжигание коры березы при температуре 400 ºС

Литература

1. *Иванов, С.И.* Теория тепломассообмена / С.И. Иванов, И.А. Кожинов, В.И. Кофянов / под ред. А.И. Леонтьева. – М., 1979.

2. *Самойлович, Ю.А.* Тепловые процессы при непрерывном литье стали / Ю.А. Самойлович, С.А. Крулевецкий, В.А. Горяинов, З.К. Кабаков. – М., 1982.

УДК 62-6

Н.Н. Синицын, Д.А. Домрачев, В.С. Грызлов

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПРОГРЕВА ПЛОТНОГО СЛОЯ ТОПЛИВА В ТОПКАХ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ

В данной статье предложена методика расчета плотного слоя топлива системы подачи в топку котла.

Сжигание твердого топлива, наклонный слой, топочные газы, температурное поле слоя, коэффициент теплопередачи, порозность, сопротивление слоя.

The article suggests the methods of calculation of the dense bed of fuel of the fuel feed system into the boiler furnace.

Burning of solid fuel, sloping bed, flue gas, the temperature field of the bed, coefficient of heat transfer, porosity, bed resistance.

Сжигание топлива в наклонном состоянии является наиболее совершенным и распространенным принципом организации слоевого процесса, при этом с помощью конструктивных приемов обеспечивается постоянная толщина топлива и одинаковые условия для прохода воздуха и продуктов сгорания через слой по всей площади колосниковой решетки. В топках с наклонным слоем возможно применение эффективных средств регулирования толщины материала в соответствии с видом сжигаемого топлива. Такое топочное устройство обеспечивают возможность сжигания древесины с широким диапазоном