

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.

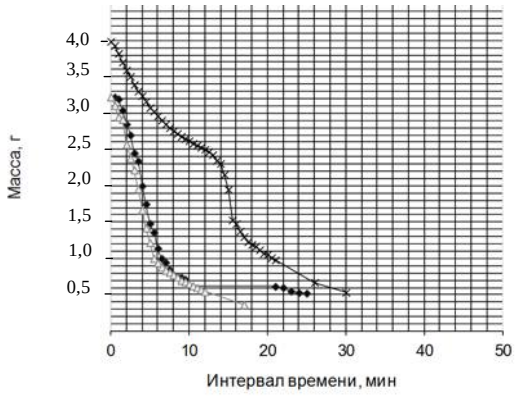


Рис. 2. Сжигание коры ели при температуре 400 ºС

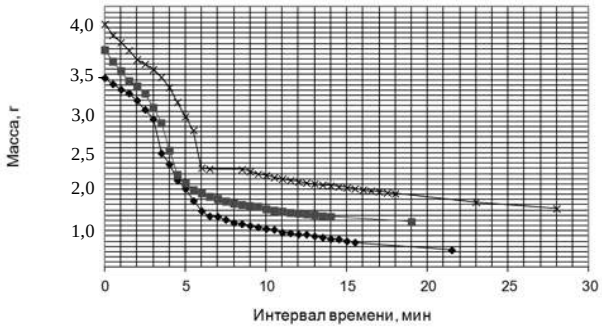


Рис. 3. Сжигание коры березы при температуре 400 ºС

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

изменения гранулометрического состава, начиная от опилок и заканчивая крупнокусковыми отходами и дровами.

При движении топлива по наклонной поверхности происходит его подсушка. При повышенной влажности древесного топлива увеличивают его толщину для интенсификации подготовки к сжиганию. Под колосниковую решетку подается воздух, обеспечивающий интенсивное сгорание слоя топлива при повышенных скоростях прохода воздуха и топочных газов через слой. Для нормального схода древесных отходов необходимо обеспечить требования к их гранулометрическому составу и предельной влажности, с повышением влажности и неоднородности состава отходов значительно ухудшаются условия их схода. Для сушки топлива под колосником подаются продукты сгорания, отбираемые после котла и имеющие температуру 250÷350 °С. Схема сушки может быть полностью разомкнутой, когда все количество дымовых газов после котла подается на сушку, или полуразомкнутой, когда отбирается только часть газов. Для исключения выноса мелких фракций скорость циркуляции газов через слой топлива должна быть такой, чтобы сушильный агент на выходе из слоя имел скорость не более 0,5÷0,8 м/с [3]. Необходимо также знать температуру материала по высоте слоя, температуру газов на выходе из слоя, время прогрева материала.

В качестве математического аппарата для расчета нагрева плотного слоя кусковых материалов потоком газа используются решения Шумана и Анцелиуса [1]. Они позволяют найти температурные поля в продуваемом газом плотном слое материала в любой момент времени от начала продувки, а также находить изменение температуры отходящих газов в процессе тепловой обработки (рис. 1).

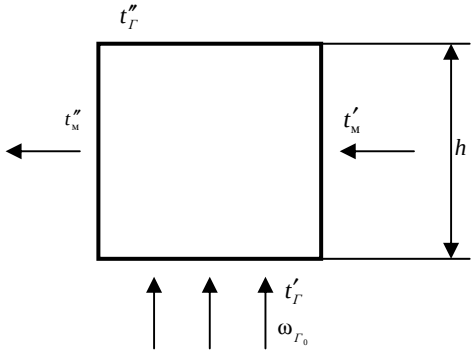


Рис. 1. Схема плотного фильтруемого слоя
$t'_Г$, $t''_Г$, $t'_м$, $t''_м$ – температура газов и материала на входе и выходе

Приводимые решения справедливы для случаев, когда начальная температура во всех точках слоя одинакова, а температура газа на входе в слой постоянна во времени. Для этих условий решение задачи Шумана в наиболее удобной для расчетов форме представляются следующими выражениями:

$$\theta_м = (t_м - t'_м)/(t'_г - t'_м) = e^{-Y}\int_0^z e^{-\varepsilon}\cdot I_0(2\sqrt{Y\varepsilon})\cdot d\varepsilon \quad (1)$$

$$\theta_Г = (t_Г - t'_м)/(t'_Г - t'_м) = 1 - e^{-z}\int_0^Y e^{-\varepsilon}\cdot I_0(2\sqrt{Z\varepsilon})\cdot d\varepsilon\,, \quad (2)$$

в которых относительные температуры для материала $\theta_м$ и для газа $\theta_Г$ определяются безразмерными числами высоты слоя Y и времени Z: $Y = k_ϑ h/(C_Г\omega_{Г_0})$; $Z = k_ϑ\tau/(C_M(1-f))$, а $I_0(x)$ является функцией Бесселя первого рода от мнимого аргумента. Определение интегралов в (1) и (2) может быть произведено любым из известных способов.

Здесь $k_ϑ = \left(\frac{1}{\alpha_V} + \frac{d^2_M}{A(1-f)\cdot\lambda_M}\right)^{-1}$, $\frac{Вт}{м^3К}$ – суммарный коэффициент теплопередачи, учитывающий как внешнее, так и внутреннее тепловое сопротивление, в котором числовой коэффициент A = 75 для кусков произвольной формы; λ_M – теплопроводность вещества частиц; f – порозность слоя, h – высота слоя, м; $C_г$ – средняя теплоемкость газа, $\frac{Дж}{кг\cdot К}$; $\omega_{Г_0}$ – скорость газов на входе в слой при нормальных условиях, м/с.

При анализе слоевых процессов удобнее пользоваться объемным коэффициентом теплоотдачи α_V, $\frac{Вт}{м^3\cdot К}$, связь его с обычным коэффициентом теплообмена α_F относительно проста, так как поверхность 1 м^3 слоя частиц для кусков неправильной формы диаметром $d_м$ составляет: $F = 7{,}5(1-f)/d_м$, $\frac{м^2}{м^3}$.

Таким образом: $\alpha_V = \alpha_F\cdot F$.

Расчет объемного коэффициента теплоотдачи проводится по формуле:

$$\alpha_V = 186\frac{\omega^{0,9}_{Г_0}\cdot\overline{T_Г}^{0,3}}{d^{0,75}_M}\cdot M',$$

где $\overline{T_Г}$ – средняя температура газов, К; а M' зависит, в основном, от равномерности распределения газов по поперечному сечению слоя и содержания мелочи. Для идеальных условий (калиброванный материал слоя, равномерное газораспределение по сечению) M' = 1.

При анализе механики газов в плотном слое весьма важными задачами являются расчеты аэродинамической границы стабильного состояния сопротивления слоя и обеспечение равномерного распределения скорости газов и материала. Последнее важная предпосылка для однородности тепловой обработки материала.

Площадь поперечно сечения слоя $F_{сл}$ зависит от производительности установки и определяется на основе соотношения $F_{сл} = \frac{V_Г}{\omega_{Г_0}}$, где $V_Г$ – объемный

расход газов, рассчитываемый на основе теплового и материального балансов, ω_{Γ_0} – расчетная скорость газов, отнесенная к свободному сечению слоя. Расчетная скорость обычно принимается равной (0,6÷0,9) $\omega_{\Gamma}^{\text{пр}}$ – предельная скорость газов, при превышении которой слой нарушается и переходит в кипящий (псевдоожиженный) слой. В расчетах $\omega_{\Gamma}^{\text{пр}}$ принимается равной скорости начала закипания слоя.

Сопротивление слоя материала высотой *h*, в пределах которой перепады давления и температуры газов принимаются малыми относительно их абсолютных значений, можно определить по следующей зависимости [2]:

$$\Delta p = \frac{h}{d_к^{\text{ср}}} \cdot \frac{\rho_\Gamma (\omega_{\Gamma_0}{}^2)^2}{2} \cdot \lambda_{\text{сл}},$$

где $\lambda_{\text{сл}}$ – коэффициент сопротивления в слое, определяется обычно экспериментальным путем; $d_к^{\text{ср}}$ – средний размер куска в слое.

Средний размер куска можно определить по формуле: $\frac{1}{d_к^{\text{ср}}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\Delta g_i}{d_к^i}$, где Δg_i – массовая доля частиц узкой фракции со средним диаметром d_k^i, *n* – количество фракций.

Для кусков неправильной формы [2]:

$$\lambda_{\text{сл}} = \frac{1{,}53}{m_{\text{п.с.}}^{4,2}} \left(\frac{75}{\text{Re}_0 \cdot k_m} + \frac{15}{\sqrt{\text{Re}_0 \cdot k_m}} + 1 \right),$$

где $\text{Re}_0 = \omega_{\Gamma_0} d_к^{\text{ср}} / \nu$; $\kappa_{\text{m}} = \frac{0{,}45}{(1 - m_{\text{п.с.}}) \cdot m_{\text{п.с.}}^{0,45}}$ – коэффициент, зависящий от порозности $m_{\text{п.с.}}$, определяется экспериментально.

Были проведены опыты для кусков коры ели и березы с использованием установки, показанной на рис. 2.

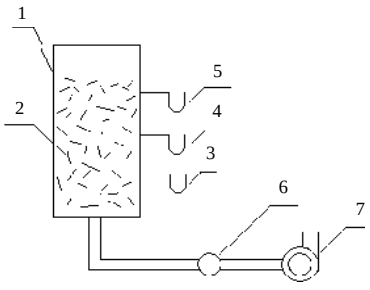


Рис. 2. Схема установки для исследования аэродинамики плотного слоя

1 – бункер круглого сечения; 2 – частицы исследуемой коры; 3, 4, 5 – U-образные манометры; 6 – счетчик газа; 7 – нагнетатель воздуха

Эксперимент состоит в следующем: в бункере 1 находятся частицы коры. Устройство 7 нагнетает воздух с постоянным расходом, поток воздуха проходит через слой частиц коры одинакового размера. U-образные манометры замеряют перепад давления в трех точках бункера 1. Исследования проведены для частиц коры ели и березы размером 10 и 20 мм, рассматриваются три постоянных расхода воздуха.

Результаты исследования приведены на рис. 3.

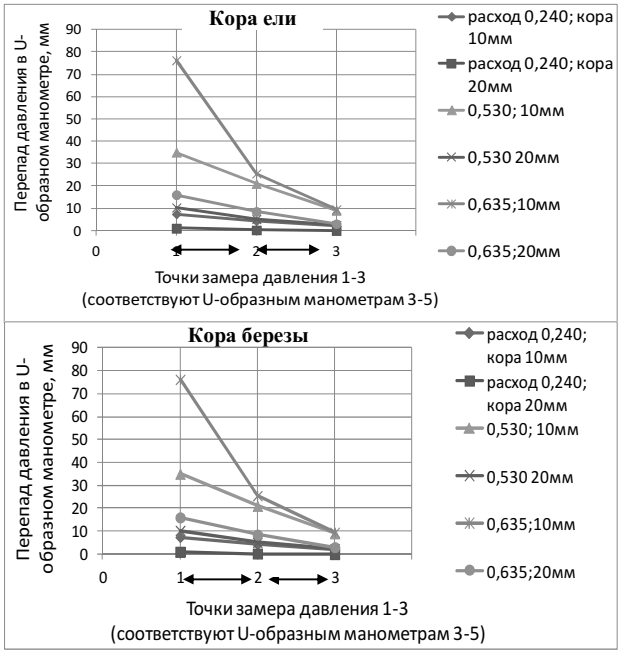


Рис. 3. Замеры давления в трех точках установки для коры ели и березы

Результаты, представленные на рис. 3, отражают зависимость между расходом воздуха (0,635 м^3/мин.; 0,530 м^3/мин. и 0,240 м^3/мин.), проходящего через слой насыпки коры размером 10 мм и 20 мм, и давлением в разных точках сечения установки.

Общее сопротивление слоя высотой H, разделенного на N начальных участков:

$$\Delta p_{\text{сл}} = \sum_{i=1}^{N} \Delta p_i .$$

Предложенная методика расчета плотного неподвижного слоя позволит проводить теплотехническую оптимизацию системы подачи твердого топлива в топку котла и выбирать такие значения параметров плотного слоя, при которых обеспечивается снижение уровня энергоемкости процесса.

Литература

1. *Зобнин, Б.Ф.* Теплотехнические расчеты металлургических печей / Б.Ф. Зобнин, М.Д. Казяев, Б.И. Китаев, В.Г. Лисиенко, А.С. Телегин, Ю.Г. Ярошенко. – М., 1982.

2. *Ключников, А.Д.* Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / А.Д. Ключников, В.Н. Кузьмин, С.К. Попов. – М., 1990.

3. *Любов, В.К.* Повышение эффективности энергетического использования биотоплив / В.К. Любов, С.В. Любова. – Архангельск, 2010.