

ного воздуха. Разность между температурами наружной и внутренней стен составляла 4 °С.

Выводы

Полученные результаты показывают, что в студенческой аудитории, в которой проводились занятия, ухудшение основных параметров микроклимата seriously сказывается, по словам студентов, на качестве усвоения материала, предлагаемого преподавателем. Поля указанных параметров нестационарны в процессе проведения занятий, т.е. меняются во времени и в пространстве, что приводит к определенным трудностям в их измерении и анализе.

При невозможности установления в рабочих помещениях допустимых показателей микроклимата условия признаются вредными и опасными для человека. В такой ситуации предлагается ряд защитных мероприятий. К их числу относят: перестановка рабочих мест, исключающая негативное влияние факторов дискомфорта (окна), реконструкция системы отопления (повышение температуры воды в системе отопления), монтаж системы вентиляции.

Литература

1. Тимофеева Е.И. Экологический мониторинг параметров микроклимата. М., 2005. 194 с.
2. Ливчак А.В. Вытесняющая вентиляция в школах. М., 2004. №8. С. 46–57.
3. Сеницын В.И., Сомова М.И. О недостатках систем воздушного отопления и вентиляции в школах Москвы. М., 2009. №8. С. 36–43.
4. Маркин В.К., Просвирина И.С. Постановка задачи по определению основных параметров условий комфортности в студенческой аудитории // Энергосберегающие технологии: Наука. Образование. Бизнес. Производство: Материалы V Международной научно-практической конференции. 2011. № 1. С. 96–100.

5. Маркин В.К., Просвирина И.С. Анализ температурных полей воздуха в помещении для учебных занятий // Научный потенциал на службу модернизации. Вып. 2. Астрахань. 2012. С. 71–74.

6. Маркин В.К., Просвирина И.С. Влияние изменения микроклимата в студенческой аудитории в процессе занятий на физиологические показатели человека // Промышленное и гражданское строительство. 2012. №8. С. 48–49.

References

1. Timofeeva E.I. *Ekologicheskii monitoring parametrov mikroklimata* [Environmental monitoring of microclimate parameters]. Moscow, 2005.
2. Livchak A. V. *Vytesniajushhaia ventiliaciia v shkolah* [Displacement ventilation in schools]. Moscow, 2004, №8, pp. 46–57.
3. Sinitsyn V.I., Somova M.I. *O nedostatkakh sistem vozdušnogo otopleniia i ventiliacii v shkolah Moskvy* [On the shortcomings of air heating and ventilation systems in Moscow schools]. Moscow, 2009, №8, pp. 36–43.
4. Markin V.K., Prosvirina I.S. *Postanovka zadachi po opredeleniiu osnovnykh parametrov uslovii komfortnosti v studencheskoi auditorii* [Statement of the problem to determine the main parameters of the comfort conditions in the student audience] *Energoberegaiushchie tehnologii: Nauka. Obrazovanie. Biznes. Proizvodstvo: Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferencii* [Energy-saving technologies: Science. Education. Business. Production], 2011, № 1, pp. 96–100.
5. Markin V.K., Prosvirina I.S. *Analiz temperaturnykh polей vozduha v pomeshhenii dlia uchebnykh zaniatii* [Analysis of air temperature fields in a room for training sessions]. *Nauchnyi potentsial na sluzhbu modernizacii* [Scientific potential of the service modernization]. Astrakhan', 2012, Vol. 2, pp. 71–74.
6. Markin V.K., Prosvirina I.S. *Vliianie izmeneniia mikroklimata v studencheskoi auditorii v processe zaniatii na fiziologicheskie pokazateli cheloveka* [Effect of changes in climate in the student audience in the course of employment on the human physiological indicators]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2012, №8, pp. 48–49.

УДК 662.6/9(075.8)

**Н.Н. Сеницын, Н.В. Телин, Д.А. Домрачев, Ю.В. Антонова,
Е.Л. Никонова, Г.М. Петрова**
Череповецкий государственный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ СУШКЕ КОРЫ ДЕРЕВЬЕВ В ПЛОТНОМ СЛОЕ

Рассмотрен процесс сушки рубленой коры в плотном слое. Представлены экспериментальные данные, необходимые для расчета процесса. Получены расчетные данные по прогреву одиночных кусков коры на входе в слой в зависимости от начальной температуры газа. Установлена взаимосвязь начальной температуры газов и продолжительности нагрева кусков коры до начала выхода летучих веществ, взаимосвязь продолжительности нагрева и доли вышедшей влаги.

Кора, температура газа, плотный слой, конвективный теплообмен, влажность.

The process of drying of chopped bark in the dense layer is described in the article. Experimental data necessary for the calculation process is provided. The calculated data for heating single pieces of bark at the entrance to the layer, depending on the initial temperature of the gas, is presented. The correlation between the initial gas temperature and duration of heating pieces of bark before the volatile matter as well as the relationship between the heating time and the fraction of released moisture are proven.

Bark, gas temperature, dense layer, convective heat transfer, humidity.

Введение

Экологическая политика в сфере энергообеспечения предусматривает вовлечение в топливно-энергетический баланс возобновляемых источников энергии и отходов производства в целях уменьшения негативного влияния энергетической деятельности на окружающую среду. В развитых промышленных странах для уменьшения воздействия «парниковых» газов на климат планеты активно поощряется замена ископаемых топлив биотопливом. К биотопливу относятся древесина и отходы ее обработки: опилки, стружка, древесная пыль, щепа, кора, ветки, некондиционная древесина, древесные гранулы. На фанерно-мебельных комбинатах основным отходом производства является кора.

Для выбора оптимальной технологической схемы энергетического использования биотоплива (коры) необходимо выполнить исследования процесса сушки высоковлажной коры. При высокой исходной влажности биотоплива снижение содержания в нем влаги и повышения низшей теплоты сгорания на рабочую массу можно обеспечить в конвективных шахтных сушилках перед подачей топлива в топку котла. Основные проблемы, возникающие при сжигании биотоплива, связаны с его высокой влажностью, которая значительно уменьшает тепловую ценность топлива, ухудшает процесс горения и снижает экологические показатели работы котлов в целом, в том числе с неоднородным гранулометрическим составом. Поэтому эффективное сжигание рубленой коры в топках котлов является актуальной задачей.

Основная часть

Для нормального схода древесных отходов по топливному рукаву необходимо обеспечить требования к их гранулометрическому составу и предельной влажности, с ростом влажности и неоднородности состава отходов условия их схода значительно ухудшаются. Каскадно-лотковый топливный тракт плавных очертаний [1] благодаря разгрузке нижележащих участков слоя от давления верхних слоев значительно улучшает сход плохо сыпучего топлива. В каскадно-лотковой сушилке толщина слоя для обеспечения его продувания газами принимается равной 400–450 мм, в топливных рукавах – 700–800 мм [9].

Нагрев неподвижного слоя кусковых материалов при фильтрации через него теплоносителя базируется на решениях Шумана и Анцелиуса, представленных в [9, с. 336–347], [1, с. 306–307]. Решения выполнены для условия $t_0 = \text{const}$. Относительная температура слоя материала $\Theta_m = (t_m - t_{\text{нач}})/(t_0 - t_{\text{нач}})$ или относительная температура газа $\Theta_g = (t_g - t_{\text{нач}})/(t_0 - t_{\text{нач}})$ на графиках представлены в зависимости от критерия высоты $Y = k_v h / c_g w_0$ и критерия времени $Z = k_v \tau / [c_m (1 - f)]$.

Здесь t_m – температура массы материала после тепловой обработки его газами, °C; t_0 – температура газов на входе в слой (температура материала), °C; t_g – температура газов на выходе из слоя (материала), °C; $t_{\text{нач}}$ – начальная температура материалов, °C; h –

высота слоя, м; c_g – теплоемкость газа, кДж/(м³·K); w_0 – скорость прохождения газового потока, отнесенная к свободному сечению шихты, м/с; f – порозность слоя; τ – время, ч (при необходимости использовать множитель 3600); c_m – объемная (кажущаяся) теплоемкость материала слоя с учетом теплоты на сушку и пр., кДж/(м³·K); d – диаметр куска, м; λ_m – коэффициент теплопроводности куска, Вт/(м·K); α_v – объемный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м³·K); k_v – суммарный объемный коэффициент теплопередачи, Вт/(м³·K), учитывающий внутреннее тепловое сопротивление куска.

Температурные поля в процессах тепловой обработки плотного слоя кусковых материалов во многом зависят от величины коэффициента теплообмена, определяющего интенсивность развития тепловых явлений. При анализе слоевых процессов удобнее пользоваться объемным коэффициентом теплоотдачи α_v , Вт/(м³·K). Связь его с обычным коэффициентом теплообмена α_F относительно проста, так как поверхность 1 м³ слоя частиц сферической формы, имеющих диаметр d_m , составляет [1], м²/м³

$$F = \frac{6 \cdot (1 - f)}{d_m},$$

а для кусков неправильной формы

$$F = \frac{7,5 \cdot (1 - f)}{d_m}, \frac{\text{м}^2}{\text{м}^3}.$$

Таким образом

$$\alpha_v = \alpha_F F.$$

Суммарный коэффициент теплопередачи k_v , учитывающий как внешнее, так и внутреннее тепловое сопротивление, определяют по формуле

$$k_v = \left(\frac{1}{\alpha_v} + \frac{d^2}{A \cdot (1 - f) \lambda_m} \right)^{-1}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}},$$

в которой числовой коэффициент A принимается равным 60 для частиц сферической и 75 – для кусков произвольной формы, а λ_m – коэффициент теплопроводности вещества частиц, Вт/(м·K).

Для частиц правильной сферической или близкой к ней формы расчет коэффициентов теплоотдачи, полученных в результате обработки экспериментальных данных при нагреве термически тонких частиц, для которых величина числа Био не превышали 1,0 [1]:

$$Nu = 0,61 Re^{0,62} \text{ (для } Re > 200 \text{)};$$

$$Nu = 0,106 Re \text{ (для } Re \leq 200 \text{)}.$$

Здесь $Nu = \alpha_F d_m / \lambda_t$; $Re = w_{г0} d_m / \nu_t$; λ_t – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К); ν_t – коэффициент кинематической вязкости газа, м²/с. Свойства газа рекомендуется выбирать для средней температуры системы.

Переход от коэффициента α_F , найденного по этим формулам, к объемному или суммарному коэффициентам, осуществляется по приведенным выше выражениям.

Исследования аэродинамики плотного слоя коры ели и березы размером 10×10×5 мм, 20×20×5 мм и 40×40×50 мм показали, что порозность слоя коры имеет следующие значения (см. таблицу)

Таблица

Порозность слоя коры ели и березы

Ель	Характерный размер, мм	40	20	10
	Порозность, f	0,821	0,811	0,730
Береза	Характерный размер, мм	40	20	10
	Порозность, f	0,829	0,814	0,734

Погрешность измерения не более 2 %. Порозность определялась при свободной насыпке. Толщина пластинок изменялась в пределах 4; 4,5; 5. Влажность на рабочую массу $W = 51,9 \%$.

Для оценки аэродинамического сопротивления тела пластинчатой формы использовалась методика определения диаметра эквивалентного шара, аэродинамически подобной частице, по формуле [4]:

$$\delta_a = \frac{1,125}{1/a + 1/b + 1/c},$$

где a, b, c – линейные размеры частицы, м.

При среднем размере толщины пластины 3,5 мм число $Bi = 0,228$, т.е. большинство кусков в плотном слое являются термически тонкими телами [1]. Куски с размером более 4,5 мм являются термически массивными.

Определяющий размер реальных тел, приводимых к телам с одномерным температурным полем, найдем по формуле [1]:

$$L = k_\phi V_m / F_m'',$$

где k_ϕ – коэффициент формы, для пластины равен 1; V_m – объем материала, м³; F_m'' – часть эффективной поверхности, устанавливается в зависимости от формы тела и условий внешнего теплообмена. Если форма тела приводится к неограниченной пластине,

то в F_m'' включают эффективную поверхность, к которой перпендикулярен наименьший определяющий размер (верхнюю горизонтальную поверхность), прогреваемая толщина равна половине толщины тела при симметричном нагреве.

Чтобы рассматривать часть реального тела, имеющую одномерное температурное поле, необходимо после нахождения определяющего размера проверить, достаточно ли она удалена от эффективных поверхностей, отсутствующих у простейшего тела. Мерой достаточного удаления является для пластины $l_{пл} \geq 4S$ (где $S = V_m / F_m''$) [1].

Для получения изменения во времени температуры газа в месте его выхода из слоя задают значения τ и определяют значения критерия времени Z . С помощью этих данных и критерия высоты Y определяют значения симплекса Θ_τ и t_τ .

При необходимости нахождения значения температур материала во времени задают величину Z и, меняя критерий Y , определяют распределение температур по высоте слоя в рассматриваемый момент времени, используя график [2, с. 346].

Количество теплоты, аккумулированной слоем материала Q_m от начала его прогрева (отданное им при охлаждении), определяют по рисунку [2, с. 348] в зависимости от критериев Z и Y .

По следующим выражениям также можно определить Θ_m и Θ_τ [1]:

$$\Theta_m = \frac{t_m - t_{нач}}{t_0 - t_{нач}} = e^{-Y} \int_0^Z e^{-\varepsilon} I_0(2\sqrt{Y\varepsilon}) d\varepsilon$$

$$\Theta_\tau = \frac{t_\tau - t_{нач}}{t_0 - t_{нач}} = 1 - e^{-Z} \int_0^Z e^{-\varepsilon} I_0(2\sqrt{Y\varepsilon}) d\varepsilon,$$

где $I_0(x)$ является функцией Бесселя первого рода от мнимого аргумента. Определение интегралов может быть произведено любым из известных способов.

По данным [3, с. 47] начало выхода летучих веществ из коры деревьев происходит при $T_n = 413$ К, максимальная скорость реакции при $T_{max} = 595 \dots 668$ К (322...395 °С). Продукты сгорания отбирались после котла, имеют температуру 250...350 °С, т.е. в процессе сушки может происходить также и выход летучих веществ.

Для оценки состояния термически массивных кусков коры необходимо рассчитать распределение температуры во времени и содержание влаги в сухом материале. Расчет температуры и содержания влаги определяем по методике [5], [6], [7], [8].

Исследование влияния начальной температуры газа на продолжительность нагрева поверхности куска коры до температуры 140 °С и содержания при этом влаги в материале показано на рисунке.

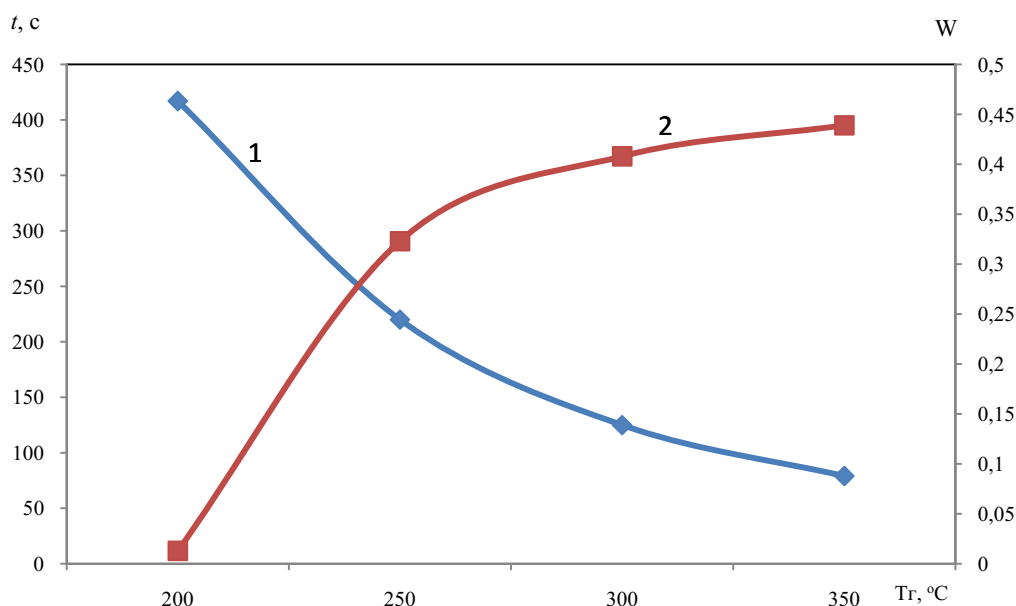


Рисунок. Влияние начальной температуры газа на процесс сушки:
1 – взаимосвязь начальной температуры газа и продолжительности прогрева до температуры поверхности, равной 140 °C; 2 – взаимосвязь начальной температуры газа и влажности материала

Из рисунка видно, что с увеличением температуры газов на входе в плотный слой уменьшается время прогрева до начала выхода летучих веществ. При этом уменьшается доля выделившейся влаги. При уменьшении начальной температуры газов увеличивается время прогрева до начала выхода летучих веществ и при этом уменьшается доля вышедшей влаги из куска коры. Температура материала на выходе газа из слоя за этот промежуток времени не успевает увеличиться до 100 °C, т.е. выхода влаги из кусков коры на выходе газа из слоя не происходит. Следовательно, необходимо уменьшать толщину слоя сушиваемого материала.

Вывод

Таким образом, предлагается методика расчета прогрева рубленой коры деревьев в плотном слое с учетом вновь полученных необходимых экспериментальных данных. В результате установлена взаимосвязь продолжительности прогрева кусков коры до начала выхода летучих веществ и доли вышедшей влаги при этом.

Литература

1. Зобнин Б.Ф., Казяев М.Д., Китаев Б.Н., Лисиенко В.Г., Телегин А.С., Ярошенко Ю.Г. Теплотехнические расчеты металлургических печей. М., 1982, 360 с.
2. Казанцев Е.Н. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. М., 1975. 368 с.
3. Любов В.К., Любова С.В. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив. Архангельск, 2010. 496 с.
4. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. и др. Основы практической теории горения. Л., 1986. 312 с.
5. Синицын Н.Н., Домрачев Д.А., Прокопьева Д.С. Исследование прогрева тонких кусков коры при сушке //

Вестник Череповецкого государственного университета. 2015. №4 (65). С. 41–44.

6. Синицын Н.Н., Кабаков З.К., Домрачев Д.А. Математическая модель сушки коры деревьев при высокоинтенсивном нагреве // Вестник Череповецкого государственного университета. 2013. №2(48). Т. 2. С. 24–28.

7. Синицын Н.Н., Кабаков З.К., Степанова А.В., Малинов А.Г. Модель замораживания железорудного концентрата // Вестник Череповецкого государственного университета. 2013. №2 (47). Т. 1. С. 19–22.

8. Синицын Н.Н., Телин Н.В., Корнилов А.Н., Нифонтова А.А., Ревякина Д.С. Математическая модель сушки шпона при высокоинтенсивном нагреве // Вестник Череповецкого государственного университета. 2015. №3 (64). С. 37–41.

9. Эксплуатация топок скоростного горения системы ЦКТИ при работе на древесных отходах: руководящие указания Центрального котлотурбинного института. Вып. 23. Л., 1969. 28 с.

References

1. Zobnin B.F., Kaziaev M.D., Kitaev B.N., Lisienko V.G., Telegin A.S., Iaroshenko Ju.G. *Teplotekhnicheskie raschety metallurgicheskikh pechei* [Thermal calculations of metallurgical furnaces]. Moscow, 1982.
2. Kazancev E.N. *Promyshlennye pechi. Spravochnoe rukovodstvo dlja raschetov i proektirovanija* [Industrial furnaces. Reference Manual for the calculation and design.]. Moscow, 1975.
3. Ljubov V.K., Ljubova S.V. *Povyshenie effektivnosti energeticheskogo ispol'zovaniia biotopliv* [Improving the energy efficiency of the use of biofuels]. Arhangel'sk, 2010.
4. Pomerancev V.V., Aref'ev K.M., Ahmedov D.B. i dr. *Osnovy prakticheskoi teorii goreniia* [Basics of practical combustion theory]. Leningrad, 1986.
5. Sinicyn N.N., Domrachev D.A., Prokop'eva D.S. *Issledovanie progreva tonkikh kuskov kory pri sushke* [Study on warm-thin pieces of bark on drying]. *Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Cherepovets State University], 2015, №4 (65), pp. 41–44.

6. Sinicyn N.N., Kabakov Z.K., Domrachev D.A. Matematicheskaya model' sushki kory derev'ev pri vysokointensivnom nagreve [A mathematical model of drying bark with high intensity heating]. *Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Cherepovets State University], 2013, №2(48), T. 2, pp. 24–28.

7. Sinicyn N.N., Kabakov Z.K., Stepanova A.V., Malinov A.G. Model' zamorazhivaniia zhelezorudnogo koncentrata [Model of freeze of iron ore concentrate]. *Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Cherepovets State University], 2013, №2 (47), T. 1, pp. 19–22.

8. Sinicyn N.N., Telin N.V., Kornilov A.N., Nifontova A.A., Reviakina D.S. Matematicheskaya model' sushki shpona

pri vysokointensivnom nagreve [The mathematical model of drying veneer with high-intensity heating]. *Vestnik Cherepoveckogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Cherepovets State University], 2015, №3 (64), pp. 37–41.

9. *Ekspluatatsiia topok skorostnogo goreniiia sistemy CKTI pri rabote na drevesnykh othodakh: rukovodiashhie ukazaniia Central'nogo kotloturbinnogo instituta* [Operation of the high-speed furnace combustion CKTI system when working on wood waste: Guidance Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment]. Leningrad, 1969, Vol. 23.