

УДК 630*839

О.Д. Мюллер¹, В.И. Малыгин¹, В.К. Любов²¹Филиал «Севмашвтуз» С.-Петербургского государственного технического университета²Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Мюллер Оскар Давыдович родился в 1948 г., окончил в 1973 г. Ленинградский политехнический институт, кандидат технических наук, доцент кафедры океанотехники и энергетических установок филиала «Севмашвтуз» С.-Петербургского государственного технического университета. Имеет 50 научных работ.
E-mail: oscar@mail/ru



Малыгин Владимир Иванович родился в 1952 г., окончил в 1979 г. Университет дружбы народов им. П. Лумумбы, доктор технических наук, профессор, действительный член АИН РФ, проректор по научной работе филиала «Севмашвтуз» С.-Петербургского государственного морского технического университета. Имеет более 180 научных работ в области математического моделирования физических процессов при резании.

E-mail: rector@sevmashvtuz.edu.ru



Любов Виктор Константинович родился в 1954 г., окончил в 1976 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. Имеет более 190 публикаций в области совершенствования энергохозяйства промышленных предприятий.

Тел.: 8 (8182) 21-61-75



ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ДРЕВЕСНЫХ ГРАНУЛ

Рассмотрена математическая модель тепловых процессов при производстве древесных гранул и проанализировано влияние некоторых конструктивных параметров технологического оборудования на качественные показатели гранулированного топлива.

Ключевые слова: отходы обработки и переработки древесины, древесная мука, пресс-гранулятор, матрица, фильера, древесные топливные гранулы (пеллеты), биотопливо, давление, температура.

Производство биотоплива из отходов обработки и переработки древесины за последние годы приобретает все больший размах. В настоящее время в России уже действуют более 100 заводов по производству древесных топливных гранул, выпускающих около 900 тыс. т гранул (пеллет) в год. При этом из них около 260 тыс. т идет на внутренний рынок, а остальное экспортируется в страны Западной Европы.

Древесные топливные гранулы в основном применяют для сжигания в автоматизированных котлах, технологические процессы, используемые в них, предъявляют высокие требования к качеству топлива. Качественные пеллеты – это ровные гранулы, без трещин, блестящие, хорошо спрессованные, имеющие высокую энергоемкость. Некачественные пеллеты – неоднородные гранулы, с трещинами, рассыпающиеся при транспортировке, с пониженной теплотой сгорания. Гладкая, блестящая, не имеющая трещин и вздутий поверхность гранул свидетельствует об их прочности и малом истирании. Высокая истираемость гранул может быть причиной потерь при обработке груза, повышения пожарной опасности, снижения их объемного веса, эффективности и надежности работы теплогенерирующего оборудования.

Целью настоящего исследования является определение основных факторов технологического процесса производства гранул, обеспечивающих их качественные показатели.

В общем виде процесс изготовления древесных гранул можно разбить на два следующих друг за другом этапа:

повышение плотности древесного сырья и давления в клиновом зазоре между цилиндрической поверхностью прессовочного ролика и поверхностью матрицы до плотности спрессованного материала ρ_n и давления прессования p_n ;

вырезание гранулы из спрессованного древесного материала, на что расходуется часть достигнутого давления прессования $\Delta p_{ср}$, и продавливание ее через фильеру матрицы, на которое расходуется давление $p_{пр}$.

На первом этапе прессовочный ролик, прокатываясь по поверхности матрицы, уплотняет находящуюся на ней древесную муку за счет пластической деформации измельченных частиц древесины. Работа по деформации древесных частиц превращается в конечном итоге в тепловую энергию, которая почти полностью идет на нагрев спрессованной древесной массы. Так как процесс прессования древесной муки является объемным, то и подвод теплоты к спрессованному материалу можно рассматривать как равномерный по всему объему от внутренних источников теплоты.

При достижении в слое уплотненной древесной муки давления p_n , превышающего давление вырезания и продавливания гранулы через фильеру матрицы, происходит вдавливание части спрессованной древесной муки в фильеру и проталкивание остальной части сформированной гранулы по ее каналу. На этом этапе пластические деформации отсутствуют, а вся работа по проталкиванию гранулы расходуется на преодоление работы сил трения гранулы о внутреннюю поверхность цилиндрического канала фильеры. Работа сил трения в конечном итоге превращается в тепловую энергию, которая подводится к сформированной грануле через ее цилиндрическую поверхность.

Если рассматривать под микроскопом поперечное сечение высококачественной гранулы, изготовленной без связующих добавок, то можно увидеть, что она состоит из плотно спрессованных кусочков древесного материала 1 (рис. 1), которые окружены застывшей лигниновой оболочкой 2. Именно застывшая цилиндрическая лигниновая оболочка придает прочностные характеристики изготовленным гранулам и защищает их от истирания и разрушения при транспортировке и хранении.

С одной стороны, лигниновая оболочка не должна быть очень тонкой, чтобы гранулы не истирались и не разрушались при хранении, транспортировке и перегрузках, с другой – не должна быть очень толстой, так как это затруднит их воспламенение и осложнит процессы горения в котлах малой мощности. Известно, что выделение лигнина из древесины без его термического разложения происходит при температуре 150...200 °С.

Из приведенного выше анализа видно, что процесс подвода теплоты к грануле через ее поверхность осуществляется на участке проталкивания гранулы через фильеру. Рассмотрим распределение температуры по толщине гранулы на выходе из фильеры.

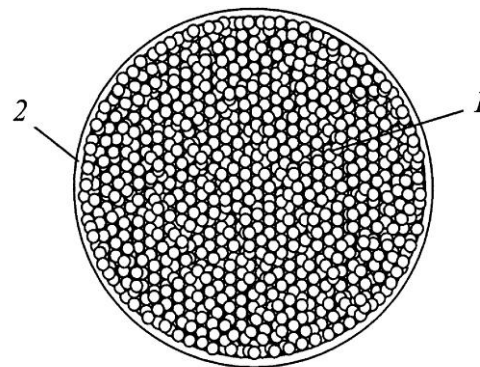


Рис. 1. Структура поперечного сечения древесной топливной гранулы: 1 – спрессованная сердцевина; 2 – лигниновая оболочка

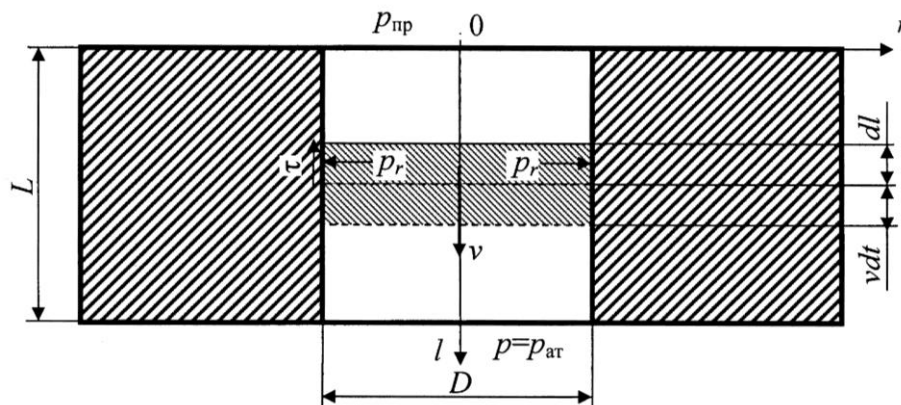


Рис. 2. Расчетная схема для определения работы по проталкиванию гранулы

Определим работу, затрачиваемую на проталкивание гранулы через матричный канал. Предположим, что гранула в матричном канале движется с некоторой средней скоростью v . В действительности гранула по каналу матрицы движется рывками во время прохождения прессовочного ролика над матричным каналом, и закон изменения ее скорости во времени близок к синусоидальному (похож на временной график силы тока после выпрямителя).

Выберем бесконечно малый промежуток времени dt и выделим бесконечно малый цилиндрический элемент гранулы диаметром D и толщиной $dl = vdt$ (рис. 2).

Пусть плотность выделенного элемента ρ , а его масса

$$m = \frac{\rho \pi D^2 dl}{4}. \quad (1)$$

Так как процесс формирования гранулы является непрерывным (в виде бесконечного шнура), то и рассматривать происходящие в нем тепловые процессы следует как для бесконечно длинного цилиндра. Тепловые потоки в грануле распространяются только в радиальном направлении. На боковую цилиндрическую поверхность выделенного элемента действует касательное напряжение трения τ и нормальное давление p_r . Так как выделенный элемент, в соответствии с допущением, движется с постоянной скоростью, то нормальные давления на его торцевых поверхностях при определении работы проталкивания не рассматриваются.

Выберем бесконечно малый промежуток времени dt . За это время выделенный элемент переместится на расстояние $vdt = dl$ и при движении совершит работу трения

$$dA_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} vdt = \tau \pi D dl vdt. \quad (2)$$

Разделив правую и левую части уравнения (2) на dt и боковую поверхность выделенного элемента $\pi D dl$, а также учитывая тот факт, что работа сил трения превращается в теплоту, получим плотность теплового потока на поверхности гранулы:

$$q_{\text{п}} = \tau v. \quad (3)$$

Ранее было показано, что напряжение трения

$$\tau = k \varepsilon p_{\text{ат}} \exp\left(\frac{4k\varepsilon(L-l)}{D}\right). \quad (4)$$

где k – коэффициент трения поверхности гранулы о цилиндрическую поверхность фильеры;

ε – коэффициент Пуассона для материала гранулы.

С учетом, что $l = vt$, получим

$$q_n = k\varepsilon\nu p_{\text{ат}} \exp\left(\frac{4k\varepsilon(L-vt)}{D}\right). \quad (5)$$

Таким образом, имеется задача по расчету нестационарного поля температур в круглом цилиндре бесконечной длины с граничными условиями второго рода при переменном тепловом потоке на поверхности $q_n = \varphi(t)$.

Дифференциальное уравнение теплообмена для выделенного элемента цилиндра

$$\frac{\partial(r,t)}{\partial\tau} = a \left(\frac{\partial^2\theta(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial\theta(r,t)}{\partial r} \right), \quad (6)$$

где a – коэффициент температуропроводности, $a = \frac{\lambda}{c\rho}$;

λ – коэффициент теплопроводности;

c – теплоемкость.

Начальное условие:

$$\theta(R,0) = f(r) = \theta_0. \quad (7)$$

Граничные условия:

$$-\partial\theta(R,t)/\partial r + q_n/\lambda = 0; \quad (8)$$

$$\partial\theta(0,t)/\partial r = 0. \quad (9)$$

Решение уравнения (6) при начальном (7) и граничных (8) и (9) условиях принимает следующий вид*:

$$\begin{aligned} \theta(r,t) = & \frac{2}{R^2} \int_0^R r f(r) dr + \frac{2a}{\lambda} \int_0^t q(t) dt + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right)}{J_0^2(\mu_n)} \exp(-\mu_n^2 Fo) \frac{2}{R^2} \int_0^R r f(r) J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) dr + \\ & + \frac{a}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right)}{J_0^2(\mu_n)} \exp(-\mu_n^2 Fo) \frac{2}{R} \int_0^t q(t) \exp\left(\mu_n \frac{at}{R^2}\right) dt, \end{aligned} \quad (10)$$

где μ_n – корни характеристического уравнения $J_0'(\mu) = J_1(\mu) = 0$; (11)

Fo – число Фурье.

Значения μ_n для 10 первых членов ряда приведены в таблице.

Корни характеристического уравнения $J_1(\mu) = 0$

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
μ_n	3,8317	7,0156	10,1735	13,3237	16,4706	19,6159	22,7601	25,9037	29,0468	32,1897

Вычислим входящие в уравнение (10) интегралы:

$$\frac{2}{R^2} \int_0^R r f(r) dr = \frac{2}{R^2} \int_0^R r \theta_0 dr = \theta_0; \quad (12)$$

* Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 600 с.

$$\begin{aligned} \frac{2a}{\lambda} \int_0^t q(t) dt &= \frac{2a}{\lambda} \int_0^t k\varepsilon\nu p_{\text{ар}} \exp\left(\frac{4k\varepsilon}{D} \bullet - \nu t\right) dt = \\ &= \frac{2ak\varepsilon\nu p_{\text{ар}} \exp\left(\frac{4k\nu L}{D}\right)}{\lambda} \int_0^t \exp\left(-\frac{4k\varepsilon\nu}{D} t\right) dt = \frac{-aDp_{\text{ар}} \exp\left(\frac{4k\varepsilon L}{D}\right)}{2\lambda L} \left[\exp\left(-\frac{4k\varepsilon\nu t}{D}\right) - 1 \right]; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\frac{2}{R^2} \int_0^R r f(r) J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) dr = \frac{2}{R^2} \int_0^R \theta_0 r J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) dr = \frac{2\theta_0}{\mu_n} J_1\left(\mu_n\right). \quad (14)$$

Так как μ_n являются корнями уравнения (11), то уравнение (14) примет следующий вид:

$$\frac{2}{R^2} \int_0^R r f(r) J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) dr = \frac{2\theta_0}{\mu_n} J_1\left(\mu_n\right) = 0; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{2}{R^2} \int_0^t q(t) \exp\left(\mu_n \frac{at}{R^2}\right) dt &= \frac{2}{R} \int_0^t k\varepsilon\nu p_{\text{ар}} \exp\left(\frac{4k\varepsilon}{D} \bullet - \nu t\right) \exp\left(\mu_n \frac{at}{R^2}\right) dt = \\ &= \frac{2k\varepsilon\nu p_{\text{ар}}}{R} \exp\left(\frac{2k\varepsilon L}{R}\right) \int_0^t \exp\left[\left(\mu_n \frac{a}{R^2} - \frac{2k\varepsilon\nu}{R}\right) t\right] dt = \\ &= \frac{p_{\text{ар}} \exp\left(\frac{2k\varepsilon L}{R}\right)}{\mu_n \frac{a}{2k\varepsilon\nu R} - 1} \left(\exp\left[\left(\mu_n \frac{a}{R^2} - \frac{2k\varepsilon\nu}{R}\right) t\right] - 1 \right). \end{aligned} \quad (16)$$

Подставим (12), (13), (15) и (16) в (10):

$$\begin{aligned} \theta(r,t) &= \theta_0 - \frac{aDp_{\text{ар}} \exp\left(\frac{4k\varepsilon L}{D}\right)}{2\lambda L} \left[\exp\left(-\frac{4k\varepsilon\nu t}{D}\right) - 1 \right] + \\ &+ \frac{a}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right)}{J_0^2\left(\mu_n\right)} \exp\left(\mu_n^2 \text{Fo}\right) \frac{p_{\text{ар}} \exp\left(\frac{2k\varepsilon L}{R}\right)}{\mu_n \frac{a}{2k\varepsilon\nu R} - 1} \left(\exp\left[\left(\mu_n \frac{a}{R^2} - \frac{2k\varepsilon\nu}{R}\right) t\right] - 1 \right). \end{aligned} \quad (17)$$

Данное уравнение позволяет определить температуру в любой точке выделенного цилиндрического элемента гранулы от момента входа его в фильеру до выхода из нее. Для практических исследований представляет интерес температура поверхности гранулы на выходе из фильеры, т. е. при $r = R$.

Если площадь поверхности матрицы, обкатываемой прессовочным роликом $S_{\text{ср}}$, количество фильер N , число прессовочных роликов z , а число оборотов водила роликов в минуту n , то секундная производительность фильеры по сформированной грануле

$$V_1 = \frac{\pi n}{30N} z S_{cp} h_{cp}, \quad (18)$$

где h_{cp} – толщина вырезаемого слоя спрессованной древесной муки.

Так как объем фильеры $V_f = \pi D^2 L / 4$, то время прохождения выделенного элемента через фильеру

$$t_0 = \frac{V_f}{V_1} = \frac{7,5ND^2L}{nzS_{cp}h_{cp}}. \quad (19)$$

Средняя скорость выпрессовки гранулы

$$v = \frac{L}{t_0} = \frac{nzS_{cp}h_{cp}}{7,5ND^2}. \quad (20)$$

Запишем число Фурье для данного случая:

$$Fo = \frac{at_0}{R^2} = \frac{4at_0}{D^2}. \quad (21)$$

Таким образом, температура поверхности гранулы на выходе из фильеры:

$$\theta(R, t_0) = \theta_0 + \frac{2ap_{at}k\varepsilon L}{\lambda} \left(1 + \frac{2}{D} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{J_0(\mu_n)} \exp\left(-\mu_n^2 Fo\right) \frac{1}{\mu_n} \left[\exp(\mu_n Fo) - 1 \right] \right). \quad (22)$$

Полученное уравнение (22) позволяет с учетом начальной температуры древесной муки определить температуру поверхности древесной топливной гранулы на выходе из фильеры матрицы по геометрическим характеристикам фильер и прессовочных роликов гранулятора.

Знание температуры поверхности гранулы и характера ее распределения в поверхностном слое позволит определить основные геометрические характеристики прессов-грануляторов и параметры технологического процесса гранулирования для получения качественного биотоплива.

Выводы

1. Получены теоретические зависимости, позволяющие определить распределение температуры по радиусу древесной гранулы на всем пути ее продвижения по фильере. Знание температурного поля в грануле позволит определить начало выделения лигнина и образования лигниновой оболочки вокруг гранулы, а также ее толщину.

2. Данные теоретического анализа позволяют уточнить направления экспериментальных исследований для определения основных параметров процесса, обеспечивающих получение древесных гранул заданного качества. Для проверки обоснованности допущений, принятых при проведении теоретического анализа, необходимо провести ряд экспериментальных исследований

Поступила 01.02.11

O.D. Myuller¹, V.I. Malign¹, V.K. Lyubov²

¹«Sevmashvtuz» Branch of Saint-Petersburg State Marine Technical University

²Northern (Arctic) Federal University named after M.B. Lomonosov

Determination of Technological Surface Temperature of Wood Pellets

A mathematical model of heat processes employed to produce wood pellets has been considered. The influence of some technological equipment design parameters on qualitative indices of pellet fuel has been analyzed.

Keywords: timber processing waste, wood flour, press granulator, die, wood pellets, biofuel, pressure, temperature.
