

УДК 621.18

DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-3-8

ПРИБЛИЖЕННАЯ МОДЕЛЬ СУШКИ ВЛАЖНОЙ ЧАСТИЦЫ

Голубкович А.В.*,
докт. техн. наук;

Дадыко А.Н.,
аспирант

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, 1-й Институтский проезд, 5, Москва, 109428, Российская Федерация, *e-mail: vim@vim.ru

При сжигании растительных отходов процесс сушки топлива переносится в топочную камеру. Сушка крупных частиц топлива с самого начала протекает в периоде падающей скорости процесса, сопровождается углублением фронта испарения внутрь материала, выделением, зажиганием летучих компонентов и коксового остатка. Выявили, что в условиях конвективного и лучистого теплообмена с дымовыми газами, находящимися при высокой температуре, частица практически сразу же прогревается до температуры кипения воды. При этом начинается процесс интенсивного испарения влаги, фронт которого с течением времени перемещается вглубь материала. Внутри частицы образуются «сухая» и «мокрая» зоны. В процессе углубления зоны испарения начинается прогрев, выделение летучих компонентов и их воспламенение в «сухой» зоне. Отметим, что для случая горения в топке крупной частицы влажного топлива радиусом более 1 мм в предлагаемой модели предусмотрены три периода сушки: до воспламенения летучих компонентов; видимого горения летучих компонентов до воспламенения кокса на поверхности; сушки, протекающей параллельно с выгоранием кокса. Каждому из этих периодов соответствует определенное положение зоны испарения, по которому можно рассчитать остаточное влагосодержание частицы и длительность сушки. Определили, что суммарное время сушки представляет собой длительность зажигания частицы. Рассчитали процессы сушки и зажигания частиц с разной начальной влажностью и при различных условиях теплоотдачи. Установили, что в крупной влажной частице растительных отходов при поступлении в топочную камеру одновременно происходят процессы сушки, выделения и воспламенения летучих компонентов, а также и горения коксового остатка. Показали, что длительность зажигания определяется временем окончания горения коксового остатка и может быть рассчитана по выражению полного высушивания частицы. В топочном блоке ТБР-2,0 сушка и зажигание влажных мягких частиц растительных остатков радиусом менее 0,25 мм происходит менее чем за 2 с, сушка с последующим зажиганием частиц радиусом 1-3 мм занимает до 30 с.

Ключевые слова: растительные отходы, сжигание, сушка, длительность зажигания частицы.

■ **Для цитирования:** Голубкович А.В. Дадыко А.Н. Приближенная модель сушки влажной частицы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N4. С. 3-8

APPROXIMATE MODEL OF WET PARTICLE DRYING

Golubkovich A.V.*,
Dr. Sc. (Eng.);

Dadyko A.N.

Federal Scientific Agricultural Engineering Center VIM, 1st Institutskiy proezd, 5, Moscow, 109428, Russian Federation, *e-mail: vim@vim.ru

When plant refuse burning process of drying of fuel is transferred to the furnace camera. Drying of large particles of fuel from the very beginning proceeds in the period of the drooping combustion rate. At the same time the front of evaporation goes deep in material, volatile components and coke residual are separated and firing. In the conditions of convective and radiant heat exchange with the combustion gases which are in case of high temperature, the particle practically at once gets warm to a water boiling temperature. At the same time process of intensive evaporation of moisture which front moves deep into material begins. «Dry» and «wet» zones are formed in a particle. Warming up, separation of volatile components and their inflaming in «dry» zone begin in the course of a deepening of evaporation zone. Three periods of drying are provided for burning of a large particle of the wet fuel with a radius more than 1 mm: before inflaming of volatile components; visible burning of volatile components before inflaming of coke on a surface; the drying proceeding in parallel with coke burning-off. A certain location of an evaporation zone corresponds to each of these periods. And we can calculate particle dryness and drying duration. Summary time of drying represents duration of particle ignition. Processes of particles drying and ignition with different initial humidity and under various conditions of a heat emission were calculated. Drying, separation

and inflaming of volatile components, as well as burning of coke residual take place at the same time in a large wet particle of plant refuse in case of arrival into the furnace camera. Duration of ignition is defined by end time of burning of coke residual and can be calculated according to complete drying of a particle. In the furnace unit TBR-2.0 drying and ignition of the wet soft plant refuse particles with a radius less than 0.25 mm takes less than for 2 s, drying with the subsequent ignition of particles with a radius of 1-3 mm continues 30 s.

Keywords: Plant refuse; Burning; Drying; Duration of particle ignition.

For citation: Golubkovich A.V., Dadyko A.N. Approximate model of wet particle drying. *Sel'skokhozyaystvennyye mashony i tekhnologii*. 2017; 4: 3-8. DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-3-8. (In Russian)

Сжигание растительных отходов (РО), в избытке остающихся на предприятиях пищевой, деревообрабатывающей промышленности и в сельскохозяйственном производстве, в топках теплотехнических устройств позволит существенно снизить затраты жидкого и газообразного топлива [1-4].

Для мелких частиц (радиус $\leq 0,3$ мм) интенсивный выход летучих веществ начинается практически только в конце стадии прогрева частицы, когда ее температура уже близка к температуре потока дымовых газов. Это позволяет применить для таких частиц изотермическую модель расчета выхода летучих компонентов. Для частиц $R = 0,3-1$ мм этот расчет необходимо проводить по неизотермической модели, но можно не учитывать градиент температур по сечению частицы. Для частиц $R > 1$ мм необходимо учитывать нестационарность процесса выхода летучих веществ во времени и по сечению частицы. При этом в расчетах прогрева необходимо учитывать переменность теплофизических характеристик (плотности, теплоемкости и др.) [5, 6].

При нестационарном воспламенении угольных частиц выделен ряд последовательных стадий: инертный прогрев до температуры начала испарения влаги; испарение влаги; выход летучих веществ; зажигание твердого кокса [7, 8]. Такие же стадии можно выделить при рассмотрении процесса воспламенения частиц РО.

При расчетах высокоскоростного прогрева топливных частиц и выхода из них летучих компонентов в условиях топочной камеры можно пренебречь влиянием экзо- и эндотермических реакций термической деструкции, так как их доля в суммарном теплоподводе меньше 10%, а в большинстве случаев не превышает 5%.

Цель исследования – теоретическое обоснование процессов тепломассопереноса при нагреве частицы твердого топлива и расчет длительности зажигания.

Материалы и методы. При решении задачи принимали следующие упрощающие допущения (не накладывающие существенных ограничений на общность постановки задачи):

- при термическом разложении РО учитывают

наличие газообразного компонента;

- термохимическое взаимодействие РО и водяных паров не рассматривают;

- теплофизические характеристики РО не зависят от температуры;

- частица нагревается за счет конвекции;

- выделение смол при термической деструкции органической части РО не учитывают.

Влияние ряда факторов, отраженных в допущениях, ранее исследована при решении задач зажигания ряда топлив, например водоугольных [2]. Сделаны выводы о правомерности принятых допущений.

Приняли следующие условия сушки:

- теплота, выделяемая в результате реакции термического разложения, существенно ниже поступающей при сжигании топлива и не учитывается.

- на границе системы частицы «РО – среда» выполняется условие $dT/dR = 0$, где T – температура, R – радиус частицы, мм.

При сжигании процесс сушки топлива переносится в топочную камеру, так как пневмоподача топлива, а тем более другой вид подачи не позволяют существенно снизить влажность частиц топлива.

Сушка крупных частиц топлива с самого начала протекает в периоде падающей скорости сушки, сопровождается углублением фронта испарения внутрь материала, выделением и зажиганием летучих компонентов. Приближенная теория процесса высокотемпературной сушки и горения влажных топлив предполагает, что частица РО имеет форму шара радиусом R . В условиях конвективного и лучистого теплообмена с дымовыми газами, находящимися при высокой температуре T_c , частица прогревается до температуры кипения воды $T_{\text{н}}$. При этом начинается процесс интенсивного испарения влаги, фронт которого с координатой $r = \xi(\tau)$ с течением времени τ перемещается вглубь материала. Внутри частицы образуются «сухая» и «мокрая» зоны. Температуру «мокрой» зоны ($r < \xi$) будем считать постоянной и равной $T_{\text{н}}$. В «сухой» зоне ($\xi < r \leq R$) температурное поле неравномерно, и все точки этой зоны, включая поверхность частицы, продолжают нагреваться. Влагосодержание материала в «сухой» зоне примем равным нулю, а в «мокрой» – начальному W_0 . В процессе углубления зоны испарения начинается прогрев, выделение летучих веществ и

их воспламенение в «сухой» зоне [9, 10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для вывода уравнения зажигания рассмотрим температурное поле «сухой» зоны частицы. В предположении о том, что коэффициент теплоотдачи α одинаков по всей поверхности, это поле будет одномерным: $T = T(r, \tau)$.

Уравнение теплопроводности, описывающее одномерное стационарное температурное поле в телах сферической формы, может быть записано в виде:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0. \quad (1)$$

На поверхности частицы ($r = R$) происходит конвективный теплообмен со средой, описываемый граничным условием третьего рода:

$$\lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial r} + \alpha T(R, \tau) = \alpha T_c(\tau), \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности «сухой» области материала.

На поверхности раздела зон ($r = \xi$) температура равна температуре кипения (граничное условие первого рода):

$$T(\xi, \tau) = T_n. \quad (3)$$

Решение задачи (1)-(3) имеет вид [4]:

$$T(r, \tau) = T_n + \frac{T_c - T_n}{1 - \frac{\xi}{R} \left(1 - \frac{1}{Bi} \right)} \left(1 - \frac{\xi}{r} \right). \quad (4)$$

В правой части выражения (4) функции времени представлены температурой среды $T_c(\tau)$ и координатой границы раздела зон $\xi(\tau)$. При изменяющемся во времени коэффициенте теплоотдачи α переменным будет и значение критерия Био $Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$.

Для нахождения временной зависимости положения фронта интенсивного испарения $\xi(\tau)$ воспользуемся условием Стефана:

$$-\lambda \frac{\partial T(\xi, \tau)}{\partial r} = L \gamma_c W_0 \frac{d\xi}{d\tau}, \quad (5)$$

где L – удельная теплота испарения воды; γ_c – плотность частицы.

Подставляя (4) в условие (5) и полагая $Bi = const$, проинтегрируем (5) с учетом начального условия $\xi(0) = R$. После преобразований получим уравнение:

$$\int_0^t \theta_c(\vartheta) d\vartheta = 1 + \frac{2}{Bi} - 3\eta^2 + 2 \left(1 - \frac{1}{Bi} \right) \eta^3, \quad (6)$$

где введены следующие безразмерные величины:

- относительное время $t = \tau_3 / \tau^*$ (τ_3 – время сушки;
- время сушки частицы τ^* при $Bi \rightarrow \infty$;
- относительная избыточная температура среды

$$\theta_c = \frac{T_c - T_n}{T_{c0} - T_n};$$

- начальная температура среды T_{c0} ;

- относительная координата фронта интенсивного испарения $\eta = \xi / R$.

Установим связь между средним влагосодержанием частицы $\bar{W}$ и величиной η . Согласно принятой модели, вся масса влаги m сосредоточена в объеме «мокрой» зоны и равна:

$$m_s = W_0 \gamma_c \frac{4}{3} \pi \xi^3,$$

где γ_c – удельная масса сухого вещества.

Определяем массу сухого вещества частицы:

$$m_c = \gamma_c \frac{4}{3} \pi R^3.$$

Тогда $\bar{W} = \frac{m_s}{m_c} = W_0 \frac{\xi^3}{R^3} = W_0 \eta^3$, а относительное влагосодержание:

$$y_k = \frac{\bar{W}}{W_0} = \eta^3.$$

С учетом найденного соотношения имеем $\eta = y_k^{1/3}$ и после подстановки в (6) получим уравнение кинетики сушки частицы:

$$\int_0^t \theta_c(\vartheta) d\vartheta = 1 + \frac{2}{Bi} - 3y_k^{2/3} + 2 \left(1 - \frac{1}{Bi} \right) y_k. \quad (7)$$

Если температура топочного газа T_c постоянна и равна T_{c0} , то $\theta_c \equiv 1$, и уравнение (7) принимает вид:

$$t = 1 + \frac{2}{Bi} - 3y_k^{2/3} + 2 \left(1 - \frac{1}{Bi} \right) y_k. \quad (8)$$

Безразмерное время τ_3 , необходимое для сушки частицы, найдем, положив в (8) величину $y_k = 0$:

$$t = 1 + \frac{2}{Bi}. \quad (9)$$

Из полученного выражения следует, что время τ_3 зависит от значения критерия Bi . При очень интенсивном теплообмене поверхности частицы с газом ($Bi \rightarrow \infty$) это время минимально: $t = 1$, что соответствует времени τ^* .

Величину τ^* можно определить, если принять во внимание уравнения теплопроводности и испарения влаги из частицы за счет поступающего тепла. Первое выражение имеет вид:

$$Q = \frac{\lambda (T_c - T_n)}{R} F, \quad (10)$$

где Q – тепло, Вт;

F – поверхность частицы, м.

Второе выражение:

$$Q = \frac{m_c \Delta W L}{\tau} \eta, \quad (11)$$

где m_c – масса сухого вещества.

Отсюда время сушки частицы:

$$\tau^* = \frac{m_s \Delta U L R}{\lambda (T_c - T_s) F} = \frac{\Delta U L R}{\lambda (T_c - T_s) f \eta} \quad (12)$$

где ΔU – влагосъем, кг влаги/кг сухого вещества, $\Delta U = U_0 - U_k$ (U_0 , U_k – начальное и конечное влагосодержание);

f – удельная поверхность частицы $f = F/m$, м²/кг;

Отметим, что время τ^* – это минимально возможное время сушки частицы.

Зажигание частицы может произойти и при продолжающейся подсушке, а коэффициент теплоотдачи α в реальных условиях имеет конечное значение. Тогда длительность сушки τ_3 , в соответствии с (8), будет равна:

$$\tau_3 = \tau^* \left[1 + \frac{2}{Bi} - 3 y_*^{2/3} + 2 \left(1 - \frac{1}{Bi} \right) y_* \right], \quad (13)$$

где τ^* определяется выражением (11); $y_k = \bar{W}_k / W_0$ ($\bar{W}_k$, W_0 – конечное и начальное влагосодержание, кг/кг).

При $T_c < T_{c0}$, что происходит в реальной топке, величина $\theta_c \neq 1$. Величину T_c можно определить из баланса теплоты, приняв, что основные ее затраты приходится на испарение влаги, тогда:

$$T_c' = T_{c0} - \frac{r B W_0 f}{c_s V_g \alpha_s (1 + W_0)} (1 - y_*), \quad (14)$$

где B – расход топлива, кг/ч;

V_0 – стехиометрический расход воздуха на горение, кг/ч;

α_s – избыток воздуха безразмерная величина;

c_s – теплоемкость материала, кДж/(кг·°C).

Выражение (13) в этом случае для комплекса частиц примет вид:

$$\tau_3 = \frac{T' - T_s}{T_{c0} - T_s} \tau^* \left[1 + \frac{2}{Bi} - 3 y_*^{2/3} + 2 \left(1 - \frac{1}{Bi} \right) y_* \right].$$

Моделирование сушки частицы в условиях топки. Для случая горения крупной частицы влажного топлива ($R > 10$ мм) можно выделить условно три периода сушки:

τ_1 – сушка в период до воспламенения летучих веществ;

τ_2 – сушка в период видимого горения летучих компонентов до воспламенения кокса;

τ_3 – сушка, протекающая параллельно с выгоранием кокса.

Каждому из этих периодов будет соответствовать определенное положение зоны испарения, по которому можно рассчитать остаточное влагосодержание частицы y_k и определить τ_3 (13).

Приближенно суммарное время сушки для всех трех периодов будет равно $\tau_s = \tau_1 + \Delta \tau_2 + \Delta \tau_3$, что и представляет собой длительность зажигания частицы.

Рассчитаем процессы сушки (зажигания) частиц

с разной начальной влажностью и при различных α . Например, в топочном блоке ТБР-2,0 примем $T_c = 900^\circ\text{C}$, а $T_n = 110^\circ\text{C}$. Расчеты показали, что у частиц радиусом $R < 1$ мм при $W < 10\%$ воспламенение летучих компонентов и горение коксового остатка начинается после подсушки. Если же $R > 1$ мм при $W > 10\%$, то воспламенение летучих веществ начинается не раньше, чем заканчивается процесс сушки. При $R > 2$ мм и $W > 10\%$ процесс сушки завершается в период горения коксового остатка.

Согласно (12), продолжительность процесса τ^* обратно пропорциональна разности температур ($T_c - T_n$). Поэтому при прочих равных условиях увеличение температуры газа ведет к интенсификации процесса. Эту разность можно изменять лишь в достаточно узких пределах. Параметры, которыми также можно управлять, – это коэффициент теплоотдачи и размер частиц. Из уравнения (9) следует, что время сушки сокращается с увеличением критерия Bi , а значит, и коэффициента теплоотдачи; согласно (12), величина τ^* прямо пропорциональна R и обратно пропорциональна f . Повысить α можно в ходе увеличения относительной скорости потока газа, обтекающего частицу, создания тангенциальных потоков, завихрений, а также путем измельчения частиц РО.

Математическая модель позволяет количественно оценить роль обоих этих факторов на разных стадиях процесса зажигания. Влияние величин R и α на продолжительность процесса можно проанализировать с помощью уравнений (8) и (12). Результаты расчетов свидетельствуют о том, что время сушки существенно зависит от размеров частиц и, в меньшей степени, от коэффициента теплоотдачи. В первую очередь это относится к крупным частицам.

Таким образом, при ограниченных возможностях изменения коэффициента теплоотдачи сократить время сушки можно только двумя способами: использованием мелких частиц (гранул) или предварительной подсушкой их вне топки (рис. 1-3).

Тестовые задачи сушки. Приближенные решения (13) выполнены при менее сложных моделях тепломассопереноса.

Одномерный перенос на основе коэффициента теплоотдачи. Пренебрегая теплопроводностью для частиц $R > 1$ мм, уравнение теплового баланса при сушке можно записать в следующем виде [13]:

$$\alpha S (T_c - \theta) \eta = \frac{dU}{d\tau} M L, \quad (15)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·°C;

S , M – поверхность и масса частиц, м² и кг;

η – доля теплоты, пошедшей на испарение влаги;

T_c , θ – температура среды и материала, °C;

U – влагосодержание частиц РО, кг/кг;

τ – длительность сушки, ч.

Из уравнения (15) следует:

$$\tau = \frac{\Delta U L}{f \alpha (T - \theta_{cp}) \eta}, \quad (16)$$

где θ_{cp} – средняя температура частиц, °C.

Так как температура частиц возрастает в процессе сушки, то вместо θ примем θ_{cp} . Если температура среды не остается постоянной, то также необходимо выбрать среднюю величину. Как установлено, подсушка протекает параллельно с выделением летучих компонентов и горением коксового остатка, поэтому целесообразно конечное влагосодержание частиц принять равным $W_k \approx 0$ и выражение (16) переписать в виде:

$$\tau = \frac{A U_0}{f \alpha (T_{cp} - \theta_{cp}) \eta}, \quad (17)$$

где A – численный коэффициент, учитывающий комплекс допущений, принятых при расчете, определяется в ходе эксперимента.

Одномерный перенос на основе коэффициента теплопроводности. При малых размерах $R < 0,25$ мм частица практически сразу принимает скорость топочных газов, и конвективный теплообмен существенно ниже теплопроводности. Следовательно, длительность сушки вычисляют по формуле (12).

Так как при расчете τ было принято допущение по низкой эффективности теплообмена, то коэффициент теплопроводности играет существенную роль и подлежит уточнению в ходе эксперимента.

Для сопоставления результатов исследования по длительности сушки в топке и изотермической модели запишем их отношение. Допуская, что форма частицы неизменна, а коэффициент α не зависит от $(T_{cp} - \theta_{cp})$, запишем эту величину в виде:

$$\kappa = \frac{\eta_z (T_{cp} - \theta_{cp})_z}{(T_{cp} - \theta_{cp})_m \eta_m}, \quad (18)$$

где индексами «т» и «м» обозначены величины, относящиеся, соответственно, к топке и модели.

Величина η может быть записана как:

$$\eta = \frac{\Delta U L}{\Delta \theta c_t + \Delta U L}, \quad (21)$$

где ΔU – съем влаги при сушке, кг/кг;

$\Delta \theta$ – перепад температур в частице, °C;

c_t – теплоемкость частицы, кДж/кг·°C.

Рассматривая сушку РО (лузга подсолнечника) при $\Delta U = 0,1$ кг/кг; $(T_{cp} - \theta_{cp})_t = 785^\circ\text{C}$; $(T_{cp} - \theta_{cp})_m = 30^\circ\text{C}$; $\Delta \theta = \theta_k - \theta_m$ ($\theta_k = 100^\circ\text{C}$; $\theta_m = 20^\circ\text{C}$); $c_t = 1,47$ кДж/(кг·°C); $L = 2,5$ МДж/кг, получим: $\eta_t = 0,68$; $\eta_m = 0,84$ и $\kappa = 21,2$.

Следовательно, при моделировании сушки в изотермической модели время сушки должно быть снижено в 21,2 раза, чтобы соответствовать реальной продолжительности сушки.

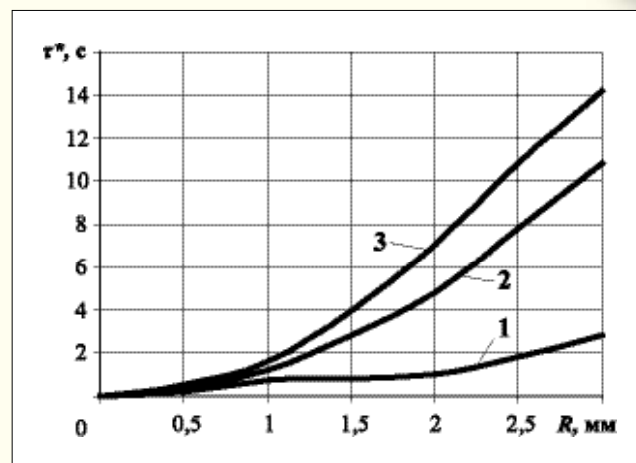


Рис. 3. Зависимость τ^* от R при 1 – $W_0 = 10\%$, 2 – $W_0 = 15\%$, 3 – $W_0 = 20\%$; $\lambda = 0,83$ кДж/кг·°C; $(W_k/W_0) = 0$; $T_c = 900^\circ\text{C}$
Fig. 3. Depending τ^* on R when 1 – $W_0 = 10\%$, 2 – $W_0 = 15\%$, 3 – $W_0 = 20\%$; $\lambda = 0,83$ кДж/кг·°C; $(W_k/W_0) = 0$; $T_c = 900^\circ\text{C}$

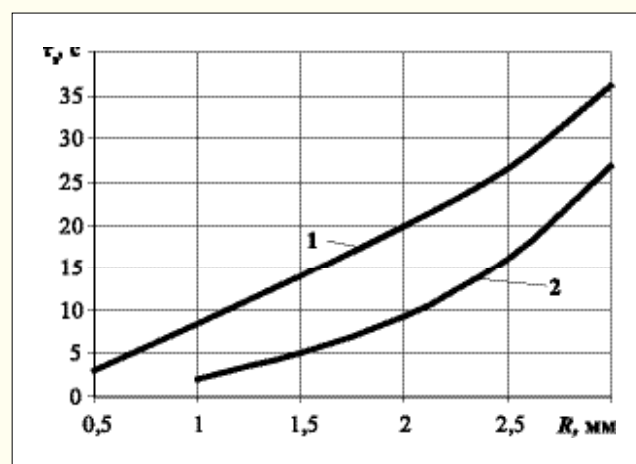


Рис. 4. Зависимость τ_3 от R при $\alpha = 40$ Вт/(м²·°C); $T_c = 900^\circ\text{C}$: 1 – $(W_k/W_0) = 0$; 2 – $(W_k/W_0) = 0,5$
Fig. 4. Depending τ_3 on R when $\alpha = 40$ Вт/(м²·°C); $T_c = 900^\circ\text{C}$: 1 – $(W_k/W_0) = 0$; 2 – $(W_k/W_0) = 0,5$

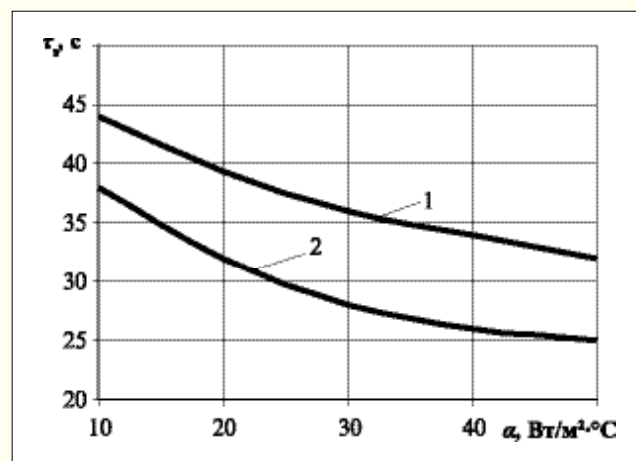


Рис. 5. Зависимость τ_3 от α при $R = 1,5$ мм; $T_c = 900^\circ\text{C}$: 1 – $(W_k/W_0) = 0$; 2 – $(W_k/W_0) = 0,5$
Fig. 5. Depending τ_3 on α when $R = 1,5$ мм; $T_c = 900^\circ\text{C}$: 1 – $(W_k/W_0) = 0$; 2 – $(W_k/W_0) = 0,5$

Выводы. В крупной влажной частице растительных отходов ($R > 1$ мм) при поступлении в топочную камеру одновременно происходят процессы сушки, выделения и воспламенения летучих компонентов и горение коксового остатка.

На процесс сушки существенное влияние оказывает размер частицы, эта зависимость близка к квадратичной. С повышением коэффициента теплоотдачи сокращается время сушки: чем меньше размер частиц, тем быстрее проходит сушка.

Сформулирована и решена нестационарная за-

дача сушки частицы РО в условиях топочного блока ТБР-2,0 в рамках модели, учитывающей совместное протекание основных процессов термической подготовки: нагрев частиц, испарение влаги, конвективный теплоперенос.

Теоретически и экспериментально исследованы основные закономерности теплопереноса при за-
жигании частиц РО. Проведен анализ влияния на условия и характеристики за-
жигания таких параметров, как температура внешней среды, размеры частицы, условия теплообмена с внешней средой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. Система технологий и машин для инновационного развития АПК России // Система технологий и машин для инновационного развития АПК России: Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции Ч. 1. М.: ВИМ, 2013. С. 9-12.
2. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. Сизов О.А., Перспективные пути применения энерго- и экологически эффективных машинных технологий и технических средств // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. № 4. С. 8-11.
3. Сыродой С.В. Термическая подготовка и за-
жигание частиц водоугольного топлива применительно к топкам котельных агрегатов: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Томск, 2014. 130 с.
4. Беляев А.А. Сжигание высокозольных топлив в топках с кипящим слоем промышленных котлов. М.: МЭИ, 2004. 69 с.

МЭИ, 2004. 69 с.

5. Петров-Денисов В.Г. К теории углубления фронта фазового превращения и образования избыточного давления во влажных материалах в процессе сушки // Химическая промышленность. 1979. №6. С. 348-351.

6. Sadjad Abasi, Saied Minaei. Effect of drying temperature of mechanical properties of dried corn. *Drying technology*. 2017. Vol. 32; 7: 774-780. (In English)

7. Вильямс Ф.А. Теория горения. М.: Наука, 1971. 615 с.

8. Кумагаи С. Горение. М.: Химия, 1979. 255 с.

9. Dagaut P., Cathonnet M. The ignition, oxidation, and combustion of kerosene: A review of experimental and kinetic modeling. *Progress in energy and combustion science*. 2006; 32: 48-92.

10. Сажин Б.С. Основы техники сушки. М.: Химия, 1984. 320 с.

REFERENCES

1. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P. System of technologies and machinery for innovative development of agrarian and industrial complex of Russia. *Sistema tekhnologiy i mashin dlya innovatsionnogo razvitiya APK Rossii: Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Vol. 1. Moscow: VIM, 2013: 9-12. (In Russian)
2. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Sizov O.A. Long-term ways of use of energy and environmentally efficient machine technologies and techniques. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2013; 4: 8-11. (In Russian)
3. Syrodoy S.V. Termicheskaya podgotovka i zazhiganie chastits vodougol'nogo topliva primenitel'no k topkam kotel'nykh agregatov [Thermal preparation and ignition of particles of water-coal fuel in relation to fire chambers of boiler units]: Avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk. Tomsk, 2014: 130. (In Russian)
4. Belyaev A.A. Szhiganie vysokozol'nykh topliv v topkakh s kipyashchim sloem promyshlennykh kotlov [Combustion of high-ash fuels in fire chambers with fluidized

bed of industrial boilers]. Moscow: MEI, 2004: 69. (In Russian)

5. Petrov-Denisov V.G. To theory of deepening of front of phase transformation and formation of plus pressure in wet materials in course of drying. *Khimicheskaya promyshlennost'*. 1979; 6: 348-351. (In Russian)

6. Sadjad Abasi, Saied Minaei. Effect of drying temperature of mechanical properties of dried corn. *Drying technology*. 2017. Vol. 32; 7: 774-780. (In English)

7. Vil'yams F.A. Teoriya gorenija [Theory of burning]. Moscow: Nauka, 1971: 615. (In Russian)

8. Kumagai S. Gorenije [Burning]. Moscow: Khimiya, 1979: 255. (In Russian)

9. Dagaut P., Cathonnet M. The ignition, oxidation, and combustion of kerosene: A review of experimental and kinetic modeling. *Progress in energy and combustion science*. 2006; 32: 48-92. (In English)

10. Sazhin B.S. Osnovy tekhniki sushki [Bases of drying technology]. Moscow: Khimiya, 1984: 320. (In Russian).

Критерии авторства. Все авторы несут ответственность за представленные в статье сведения и плагиат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution. The authors are responsible for information and plagiarism avoiding.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.