

СУШКА ЗЕРНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОПОК НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

DRYING GRAIN USING SOLID FUEL

А.В. ГОЛУБКОВИЧ¹, д.т.н.

С.А. ПАВЛОВ¹, к.т.н.

Р.А. МАРИН²

А.Н. ДАДЫКО²

¹ ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Москва, Россия, vim@vim.ru

² ООО «ОКБ по теплогенераторам», Брянск, Россия

A.V. GOLUBKOVICH¹, DSc in Engineering

S.A. PAVLOV¹, PhD in Engineering

R.A. MARIN²

A.N. DADYKO²

¹ Federal scientific agro-engineering center VIM, Moscow, Russia, vim@vim.ru

² Experimental Design Bureau for Heat Generators, Bryansk, Russia

Использование альтернативных источников жидкого (газообразного) топлива для получения теплоносителя, в том числе для сушки зерна, исследовано в отличие от сжигания традиционных видов топлива недостаточно, что сдерживает их применение. Характерной особенностью использования топочных блоков для сжигания растительных отходов является достаточно длительный розжиг и прогрев, предшествующие сушке. При этом в обмуровке топки аккумулируется большое количество теплоты, которое может быть частично использовано при периодической сушке для следующих партий зерна и полностью для последней, что повысит эффективность процесса. Сушка является одной из основных операций в послеуборочной обработке зерна, от качественной сушки во многом зависит судьба урожая. В хозяйствах распространены как поточная, так и периодическая сушка. На периодической сушке, как правило, используют те же самые сушилки, что и для поточной, или специализированные. Технология этой сушки в сушилках, оснащенных жидкостными или газовыми топками, хорошо отработана и не вызывает затруднений: разжигают топку, циклически высушивают зерно до кондиционной влажности, отключают подачу топлива, циклически охлаждают и разгружают сушилку. Пауза между сушками соседних партий без розжига и прогрева топки определяется временем охлаждения обмуровки до температуры устойчивого воспламенения и горения летучих плюс 150–200 °С в зависимости от влажности твердых частиц растительных отходов. Длительность розжига есть функция массы обмуровки топки, ее теплоемкости, температуры топочных газов и коэффициента теплоотдачи. При розжиге жидкого топлива ее длительность составляет не менее 20 мин. Для высушивания последней партии зерна масса обмуровки топки должна быть не менее 0,7 массы зерна в сушилке. Длительность прогрева топки завершается стабилизацией температуры топочных газов на выходе дымососа, но составляет не менее 1 часа.

Ключевые слова: сушка, зерно, розжиг, прогрев топки.

The use of alternative sources of liquid (gaseous) fuel to produce a coolant, including for grain drying, has been studied in contrast to burning conventional fuels, which hinders their use. A characteristic feature of the use of combustion units for burning plant waste is a sufficiently long ignition and preheating, preceding the drying. At the same time, a large amount of heat is accumulated in the furnace casing, which can be partially used for batch drying for the next batch of grain and completely for the latter, which will increase the efficiency of the process. Drying is one of the main operations in post-harvest grain processing, the fate of the crop depends largely on the quality of drying. Both flow and periodic drying are common in farms. Periodic drying, as a rule, uses the same dryers as for flow or specialized. The technology of this drying in dryers equipped with liquid or gas furnaces is well developed and does not cause difficulties – kindle the furnace, cyclically dry the grain to the conditioned moisture, cut off the fuel supply, cyclically cool and unload the dryer. The pause between the drying of adjacent lots without ignition and heating of the furnace is determined by the cooling time of the masonry to the temperature of stable ignition and burning of volatiles plus 150–200 °C, depending on the moisture content of solid particles of plant waste. The duration of ignition is a function of the mass of the furnace chamber, its heat capacity, the temperature of the flue gases and the heat transfer coefficient. At ignition of liquid fuel its duration is not less than 20 min. To dry the last batch of grain, the mass of the burnt chamber must be at least 0.7 times the mass of the grain in the dryer. The duration of heating the furnace is completed by stabilizing the temperature of the flue gases at the outlet of the exhaust fan, but not less than 1 hour.

Keywords: drying, grain, ignition, heating of the furnace.

Введение

Рассмотрим особенности использования топки на твердом топливе при периодической сушке: топку последовательно розжигают, прогревают, высушивают партию зерна, разгружают, вновь загружают и высушивают следующую партию зерна, но без розжига и прогрева, а последнюю партию высушивают аккумулярованным в топке теплом.

Цель исследования

Целью исследования является расчет длительности розжига и прогрева топки, допустимой паузы между сушками партий зерна, параметров топки, экспериментальная проверка.

Материалы и методы исследования

При решении этих задач принимались следующие упрощающиеся допущения, не накладывающие существенных ограничений на расчет параметров, теплофизические характеристики твердой частицы приняты неизменными и нагреваются конвективно, лучистый теплообмен не учитывают в виду сравнительно низкой температуры поверхности топки по окончании розжига, теплота, выделяемая при сгорании частицы, не учитывается. Так как при обосновании математических моделей расчета был сделан ряд допущений, то были проведены экспериментальные исследования на топочном блоке ТБР-2,0 мощностью 2 МВт.

Сушка является одной из основных операций в послепосевной обработке зерна, от качественной сушки во многом зависит судьба урожая. В хозяйствах распространены как поточная, так и периодическая сушка [1, 2]. На периодической сушке, как правило, используют те же самые сушилки, что и для поточной, или специализированные. Технология этой сушки в сушилках, оснащенных жидкостными или газовыми топками, хорошо отработана и не вызывает затруднений: розжигают топку, циклически высушивают зерно до кондиционной влажности, отключают подачу топлива, циклически охлаждают и разгружают сушилку [3, 4].

При прогреве в обмуровке топки аккумуляруется большое количество теплоты, которое может быть частично использовано при сушке следующих партий зерна и полностью в последней, что повысит эффективность процесса. Использованию топок на растительных отходах во многом препятствует неизученность процессов розжига и прогрева топки, которые пред-

шествуют запуску сушилки [5–7]. Исключение периодичности розжига и прогрева позволит повысить безопасность и экономичность процесса. Это обусловлено снижением расхода высокорекреационного топлива (ВТ) и исключением необходимости охлаждения обмуровки до безопасной температуры перед розжигом.

Проиллюстрируем работу топочного блока мобильной зерносушилки, широко распространенной на примере в сельском хозяйстве России (рис. 1).

Работа устройства осуществляется в следующем порядке.

Загрузочным средством 12 влажное зерно 18 загружают в сушильную камеру 8, розжигают топку 16 горелкой 4, прогревают, затем включают дозатор 2, дымовые газы при этом отводят в отводную трубу 15. Запускают шнек 10 и осуществляют циркуляцию зерна. После того как зерно достигает кондиционной влажности, подачу топлива прекращают, а высушенное зерно 19 разгружают при помощи средства 13 и охлаждают стационарно в плотном слое (на схеме охладитель не указан). После разгрузки сушилка готова для загрузки новой партии зерна, причем если длительность паузы не затягивается, то повторный розжиг не требуется. Длительность паузы зависит от массы обмуровки (масса огнеупорного кирпича): чем больше масса, тем более длительной допускается пауза. Последняя партия зерна может быть досушена без подачи топлива за счет аккумулярованного в обмуровке тепла.

Циклическое охлаждение зерна в сушильной камере при периодической работе нецелесообразно, так как топка охлаждается длительное время, а розжиг топки с температурой более 40 °С на жидком топливе не допускается.

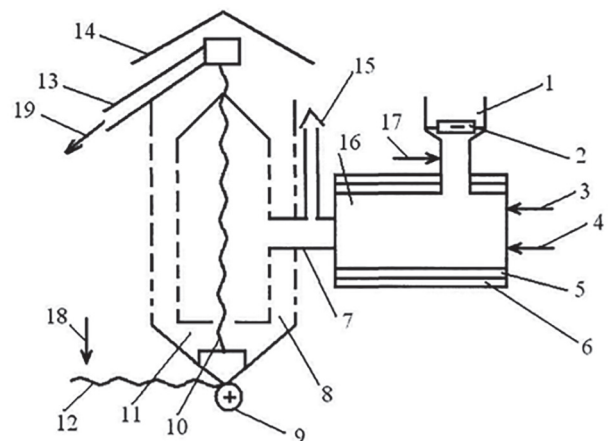


Рис. 1. Технологическая схема сушилки с топочным блоком

Физические основы расчета длительности допустимой паузы $\tau_{\text{пауза}}$:

– потерями тепла в окружающую среду пренебрегаем, так как топочный блок снаружи теплоизолирован;

– на момент прекращения подачи топлива обмуровка прогрета, ее температура как по высоте, так и по толщине выровнена;

– теплообмен в обмуровке рассматривается как в «термически тонком теле».

Длительность охлаждения топки при паузе можно рассчитать из баланса теплоты и изменения энтальпии топочной камеры по формуле [8]:

$$\alpha (T - T_0) F d\tau = G c dT, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С); G, F – масса обмуровки топки, кг, и ее поверхность, м²; τ – длительность, ч; c – теплоемкость обмуровки, кДж/(кг·°С); T, T_0 – текущая температура топки и температура воздуха, °С.

Из выражения (1) получим длительность паузы:

$$\tau_{\text{паузы}} = \frac{G c}{\alpha F} \ln \frac{T_1 - T_0}{T_2 - T_0}, \quad (2)$$

где T_1, T_2 – температура топки на моменты прекращения подачи топлива и воспламенения с устойчивым горением растительных отходов, °С.

Выражение (2) можно переписать в виде:

$$\tau_{\text{паузы}} = \frac{b^* \rho c}{\alpha} \ln \frac{T_1 - T_0}{T_2 - T_0}, \quad (3)$$

где b^* – глубина охлаждения обмуровки топки; ρ – плотность обмуровки топки, кг/м³.

Величину b^* можно определить совместным решением выражения (3) с выражением прогрева шамотной стенки $b^* = \sqrt{\frac{\tau \alpha}{0,35}}$, где α – коэффициент температуропроводности ($\alpha \approx 0,002$ м²/ч) [9].

Температуру T_2 можно записать в виде: $T_2 = k T_b$, где T_b – температура начала воспламенения летучих, °С; k – коэффициент; $k = 1,1 \dots 1,5$ и зависит от влажности растительных отходов (РО).

Например, для типичных условий сжигания РО при $\alpha = 40$ Вт/(м²·°С); $c = 1,0$ кДж/(кг·°С); $\rho = 2000$ кг/м³; $T_0 = 20$ °С; $T_1 = 800$ °С; $T_b = 250$ °С [10]; $k = 1,2$; $T_2 = 300$ °С; $b^* = 0,125$ м, длительность паузы τ , при котором не требуется растопка и прогрев, составит 1,8 ч. Длительность $\tau_{\text{паузы}}$ можно изменять величиной T_1 . Кроме того, длительность охлаждения можно регулировать изменением скорости воздуха и, соответственно, изменением α , входящим в выражение (3). Графики зависимости $\tau_{\text{паузы}}$ от температуры T_1 и условий охлаждения топки при паузе приведены на рис. 2.

Сушку последней партии зерна от исходной до кондиционной влажности осуществляют без подачи топлива за счет аккумулированной теплоты в обмуровке топки. Определим массу обмуровки. Для этого запишем тепловой баланс топки при ее охлаждении:

$$Q_{\tau} = G c (T_2 - T'_0), \quad (4)$$

где T'_0 – температура топочного блока по достижении зерном кондиционной влажности, °С.

Это количество теплоты будет потрачено на сушку зерна:

$$Q_{\tau} = k G_3 \left(\frac{W_n - W_k}{100 - W_k} \right) \frac{q}{\eta}, \quad (5)$$

где $k = 1,1 \dots 1,2$; G_3 – масса зерна, кг; W_n, W_k – начальная и конечная влажность зерна, %; q – удельная теплота испарения влаги, кДж/кг; η – доля теплоты, пошедшей на испарение влаги.

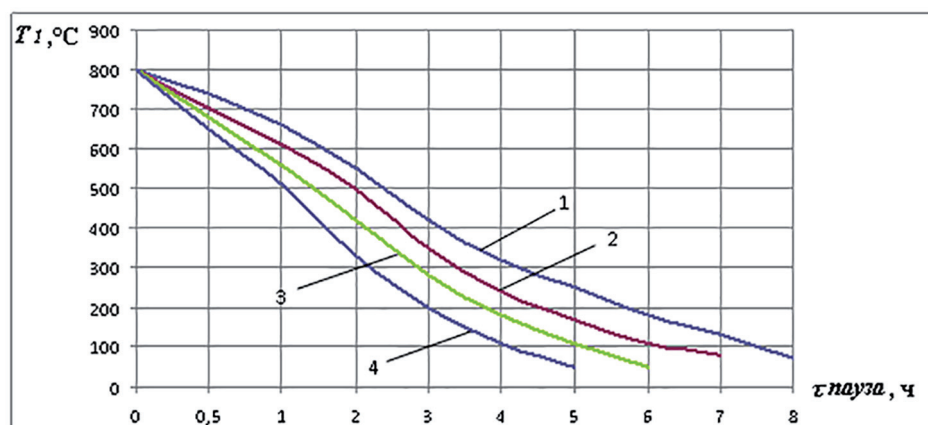


Рис. 2. Зависимость температуры T_1 от $\tau_{\text{паузы}}$:
1 – охлаждение без продувки; 2, 3 и 4 – с продувкой при $\alpha = 10, 20$ и 40 Вт/(м²·°С)

Приравняв правые части выражений (4) и (5), получим:

$$G = \frac{k_0 G_3 \left(\frac{W_n - W_k}{100 - W_k} \right) q}{c (T_n - T_k) \eta}, \text{ Т} \quad (6)$$

где k_0 – коэффициент усушки зерна.

Из выражения (6) вместимость сушилки по зерну составит:

$$G_3 = \frac{G c (T_2 - T_0) \eta}{k \left(\frac{W_n - W_k}{100 - W_k} \right) q}. \quad (7)$$

Исследуем полученные выражения (6) и (7). Для этого построим графики зависимости G_3/G от ΔT , где $\Delta T = T_2 - T_0$ (рис. 3). С повышением ΔT величина G_3/G возрастает, а также масса обмуровки снижается с понижением q .

Для стандартного влагосъема в $\Delta W = 6\%$ (при сушке зерна пшеницы от 20 до 14 %) для современных зерносушилок с $q = 4,4$ МДж/кг исп. вл. $\eta = 0,8 \dots 0,9$ и температурой устойчивого воспламенения летучих не ниже 300–320 °С, масса обмуровки топочного блока – не менее 0,7 его зерновой вместимости.

Перед запуском сушилки разжигают и прогревают топку подачей ВТ, частицы низкорекреационного топлива (НР) подают в прогретую топочную камеру, после зажигания отключают подачу ВТ. Нагрев частиц инициирует процесс испарения влаги, начинается интенсивный рост температуры, воспламеняются летучие, затем происходит зажигание и горение коксового остатка [11].

Ставится задача определить длительность розжига и температуру топки, при которой происходит устойчивое воспламенение и горение твердых частиц.

Потери теплоты на сжигание твердого топлива при розжиге можно записать в виде:

$$Q_\Sigma = Q_1 + Q_2 + Q_3, \text{ кДж}, \quad (8)$$

где Q_1 – потери на прогрев сухих частиц до воспламенения, кДж ($Q_1 = G_0 c_\text{ч} \Delta T'$, где G_0 – масса взвешенных частиц, кг; $c_\text{ч}$ – теплоемкость частиц, кДж/(кг·°С); $\Delta T'$ – степень нагрева частиц до уверенного выхода летучих, °С; $\Delta T' = T''_0 - T'_\text{н}$; T''_0 – температура воспламенения летучих; $T'_\text{н}$ – начальная температура частиц (топки), °С; для сланцев $T''_0 \approx 250$ °С [10]); Q_2 – потери на нагрев влаги и паров, кДж ($Q_2 = G_0 c_\text{в} \Delta T' \frac{W_n - W_k}{100 - W_k}$, где $c_\text{в}$ – теплоемкость влаги и паров, кДж/(кг·°С); W_n, W_k – начальная и конечная влажность частиц, %); Q_3 – потери на испарение влаги, кДж ($Q_3 = 0,01 \cdot G_0 W_n r$, где r – удельная теплота испарения влаги, кДж/кг).

Потери теплоты по выражению (8) запишем в виде:

$$Q_\Sigma = G_0 f \alpha \Delta T' \tau_0, \quad (9)$$

где f – удельная поверхность частиц, м²/кг; F – поверхность частиц, м²; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С); τ_0 – время нахождения частиц в топке, ч; $\Delta T' = T_\text{к} - T''_0$ ($T_\text{к}$ – конечная температура топки при розжиге, °С).

Приравнявая правые части выражений (8) и (9), получим:

$$G_0 \left(c_\text{ч} \Delta T'_0 + c_\text{в} \Delta T' \left(\frac{W_n - W_k}{100 - W_k} \right) + 0,01 W_n r \right) = G_0 f \alpha \Delta T' \tau_0. \quad (10)$$

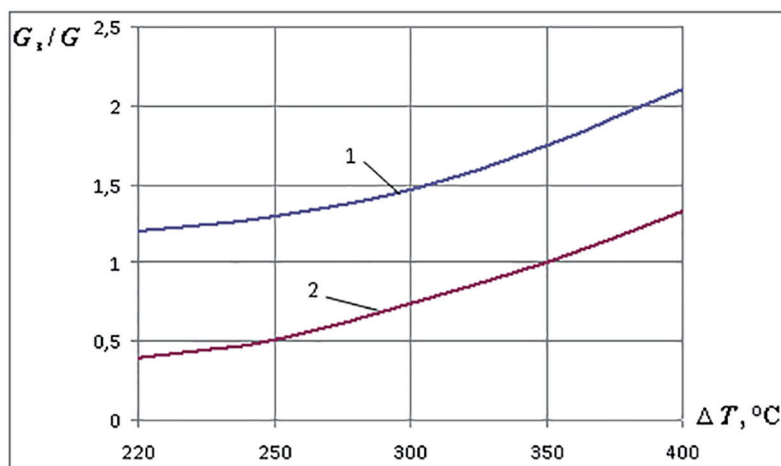


Рис. 3. Зависимость G_3/G от ΔT :
1 – $\Delta W = 6\%$; 2 – $\Delta W = 12\%$; $q = 4,2$ МДж/кг исп. вл.

Выражение (10) перепишем в виде:

$$T_k = \frac{(c_{\text{ч}} \Delta T' + c_{\text{в}} \Delta T') \left(\frac{W_{\text{н}} - W_{\text{к}}}{100 - W_{\text{к}}} \right) + 0,01 W_{\text{н}} r}{\tau_0 f \alpha} + T_0.$$

Определив величину τ_0, f и α , например из [5], подставив известные значения $W_{\text{н}}$ (при $W_{\text{к}} \approx 0$), можно рассчитать $T_{\text{к}}$ из выражения (4).

Так как при розжиге глубина топки b^* сравнительно не велика, то топку можно рассматривать как термически тонкое тело и записать тепловой баланс нагрева аналогично выражению (3):

$$\tau_p = \frac{G c}{F \alpha} \ln \frac{T_1 - T_{\text{н}}}{T_1 - T_{\text{к}}}, \quad (11)$$

где τ_p – длительность розжига, ч; $T_1, T_{\text{н}}, T_{\text{к}}$ – топочных газов, начальная и конечная температура топки, °С.

Выражение (11) перепишем в виде:

$$\tau_p = \frac{b^* \rho c}{\alpha} \ln \frac{T - T_{\text{н}}}{T - T_{\text{к}}}. \quad (12)$$

Решение (12) можно выполнить, если использовать выражение определяющее глубину прогрева b^* из выражения (3).

После розжига необходимо для устойчивой работы прогреть обмуровку топки. В общем случае время прогрева определяется условием достижения фронта температуры противоположной стенки:

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{b \rho c}{\alpha} \ln \frac{T_1 - T_{\text{н}}}{T_1 - T_{\text{к}}}.$$

На практике прогрев топки занимает достаточно длительное время: так, например, на глубину 0,25 м оно займет примерно 2,4 ч, что необходимо иметь ввиду при организации сушки зерна. Длительность прогрева завершается стабилизацией температуры топочных газов на выходе дымососа.

Программа и методика исследований

Экспериментальные исследования по розжигу и прогреву проведены в топочном блоке ТБР-2,0, установленном на Борисоглебском маслозаводе. Для розжига использовали горелку жидкого топлива мощностью 1,5 МВт. Опыты проводили на луге подсолнечника с $Q_{\text{н}}^p = 15$ МДж/кг; $W = 7$ %; $f = 3,0$ м²/кг. При розжиге (подача жидкого топлива) избыток воздуха $\alpha_{\text{ж}} = 1,05$, после розжига подачи РО повышали до $\alpha_{\text{т}} = 1,2...1,6$. Температуру топочных газов на выходе топки ограничивали

$T = 900 \pm 20$ °С и 1300 ± 20 °С. Производительность топочного устройства по луге П меняли от 100 до 320 кг.

Замеряли температуру топки (при включенной и отключенной запальной горелке) выше факела и температуру топочных газов на выходе дымососа. Температуру замеряли каждые 2–3 мин. По истечении 5, 7, 10, 12 и 15 мин отключали подачу ВТ, включали подачу НР и наблюдали горение РО и снижение температуры топочных газов в топке и на выходе дымососа. При затухании горения отключали подачу РО и снова включали подачу жидкого топлива. Момент, когда температура топочных газов в топке и на выходе дымососа после некоторого падения поднималась и стабильно возрастала, принимали за конец розжига.

Температуру поверхности топки при розжиге замеряли пирометром. Отмечали, при какой температуре продолжается или прекращается горение РО при различном расходе. Время завершения прогрева топки определяли по стабилизации температуры топочных газов на выходе из дымососа.

Обсуждение результатов

На рис. 4 приведены зависимости температуры газов в топке $T_{\text{т}}$ и на выходе дымососа $T_{\text{д}}$ от времени τ_p .

Испарение влаги, фильтрация паров к поверхности частицы и охлаждение твердого остатка, остающегося после завершения процесса удаления летучих, приводит к более высокой температуре розжига топки по сравнению с температурой зажигания летучих. На основании вышеизложенного можно сделать вывод о необходимости использования при анализе условий и характеристик зажигания РО математических моделей, учитывающих процессы при сжигании РО в топочной камере.

Разжигают и прогревают топку подачей высокорекреационного (ВТ) топлива, частицы низкорекреационного (НР) топлива подают в прогретую топочную камеру, после зажигания отключают подачу ВТ. Нагрев частиц инициирует процесс испарения влаги, начинается интенсивный рост температуры, воспламеняются летучие, затем происходит зажигание и горение коксового остатка.

При температуре топки, меньшей $T_{\text{к}}$, розжиг либо не происходит, либо горение неустойчивое и затухает. При $T \geq T_{\text{к}}$, несмотря на первоначальное падение температуры топки на

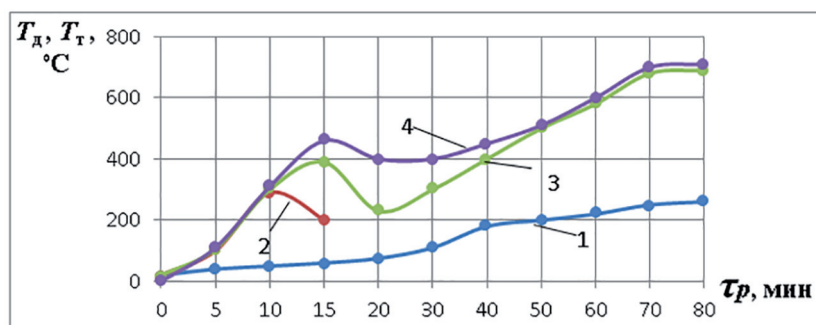


Рис. 4. Зависимость T_d и T_r от τ_p при розжиге:
 $\Pi = 230$ кг/ч; 1 – температура отходящих газов после дымососа;
 2, 3, 4 – температура топочных газов при $\tau = 8, 10, 16$ мин

100–200 °C процесс аутермичен, происходит розжиг и прогрев топки. Прогрев топки можно считать законченным, когда температура T_d стабилизируется во времени. Малозначительную роль в ее нагреве играет излучение и горение летучих частиц, так как температура в топочной камере при розжиге сравнительно не высока.

Установлено достаточно близкое, с погрешностью не более $\pm 15\%$, совпадение длительности розжига τ_p с результатами расчета по выражению (12) при величине $\Pi \geq 150$ кг/ч. При этом циркуляционные вихри в топке насыщаются твердой фазой, что обуславливает устойчивое зажигание. Время розжига τ_p имеет куполообразную зависимость от производительности, максимум приходится на диапазон $150 \leq \Pi \leq 250$ кг/ч.

После отключения подачи топлива длительность паузы не должна превышать длительности охлаждения обмуровки до температуры устойчивого воспламенения РО.

Заключение

Пауза между сушками соседних партий зерна без розжига и прогрева топки определяется временем охлаждения обмуровки до температуры устойчивого воспламенения и горения летучих плюс 150–200 °C в зависимости от влажности твердых частиц РО. Длительность розжига есть функция массы обмуровки топки, ее теплоемкости, температуры топочных газов и коэффициента теплоотдачи. При розжиге жидкого топлива ее длительность – не менее 20 мин. Для высушивания последней партии зерна масса обмуровки топки должна быть не менее 0,7 массы зерна в сушилке. Длительность прогрева завершается стабилизацией температуры топочных газов на выходе дымососа, но составляет не менее 1 часа.

Литература

- Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. Система технологий и машин для инновационного развития АПК России // Система технологий и машин для инновационного развития АПК России: Сб. докл. междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. М.: ВИМ, 2013. С. 9–12.
- Елизаров В.П., Антышев Н.М., Бейлис В.М., Шевцов В.Г. Исходные требования на технологические операции в растениеводстве // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2011. № 1. С. 11–14.
- Анискин В.И., Окунь Г.С. Технологические основы сушки работы зерносушильных установок: М.: ГНУ ВИМ, 2003. 167 с.
- Витоженц Э.Н., Окунь Г.С., Чижиков А.Г., Добычин Н.А. Рекомендации по использованию материально-технической базы для сушки семян зерновых и других культур в семеноводческих хозяйствах. М.: Колос, 1983. С. 16–17.
- Голубкович А.В. Топки на растительных отходах: процессы, конструкции, режимы, расчеты. М.: ГНУ ВИМ, 2011. 172 с.
- Дадыко А.Н. Моделирование аэродинамики факельно-вихревого режима в топке для растительных отходов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. № 2. С. 32–35.
- Беляев А.А. Сжигание высокозольных топлив в топках с кипящим слоем промышленных котлов. М.: МЭИ, 2004. 69 с.
- Тинькова С.М., Прошкин А.В., Сторожев Ю.И. Задачи по теплотехнике. Красноярск: ГАЦМиЗ, 1996. 128 с.
- Мамыкин П.С., Стрелов К.К. Топки, печи и сушки огнеупорных заводов. М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по черной и цветной металлургии, 1950. 140 с.
- Баскаков А.П., Мацнев В.В., Распопов И.В. Котлы и топки с кипящим слоем. М.: Энергоатомиздат, 1995. 298 с.

11. Хидиятов А.М., Осинцев В.В., Гордеев С.В. Результаты перевода пылеугольного котла паропроизводительностью 89 кг/с на сжигание водоугольной суспензии // Теплоэнергетика. 1987. № 1. С. 5–11.

References

1. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P. System of technologies and machines for innovative development of the agro-industrial complex of Russia. Sistema tekhnologiy i mashin dlya innovatsionnogo razvitiya APK Rossii: Sb. dokl. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf [System of technologies and machines for innovative development of the agroindustrial complex of Russia: Collection of abstracts of international scientific and technical conference]. Ch. 1. Moscow: VIM Publ., 2013, pp. 9–12 (in Russ.).
2. Elizarov V.P., Antyshev N.M., Beylis V.M., Shevtsov V.G. Initial requirements for technological operations in crop production. Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii. 2011. No 1, pp. 11–14 (in Russ.).
3. Aniskin V.I., Okun' G.S. Tekhnologicheskie osnovy sushki raboty zernosushil'nykh ustanovok [Technological bases of drying of grain dryers]. Moscow: GNU VIM Publ., 2003. 167 p.
4. Vitozhents E.N., Okun' G.S., Chizhikov A.G., Dobychin N.A. Rekomendatsii po ispol'zovaniyu material'no-tekhnicheskoy bazy dlya sushki semyan zernovykh i drugikh kul'tur v semenovodcheskikh khozyaystvakh [Recommendations on the use of the material and technical base for drying seeds of cereals and other crops in seed farms]. Moscow: Kolos Publ., 1983, pp. 16–17.
5. Golubkovich A.V. Topki na rastitel'nykh otkhodakh: protsessy, konstruksii, rezhimy, raschety [Furnace on plant waste: processes, structures, regimes, settlements]. Moscow: GNU VIM Publ., 2011. 172 p.
6. Dadyko A.N. Modeling of the aerodynamics of the flare-vortex regime in the furnace for vegetable wastes. Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii. 2016. No 2, pp. 32–35 (in Russ.).
7. Belyaev A.A. Szhiganie vysokozol'nykh topliv v topkakh s kipyashchim sloem promyshlennykh kotlov [Burning of high-ash fuels in furnaces with boiling layer of industrial boilers]. Moscow: MEI Publ., 2004. 69 p.
8. Tin'kova S.M., Proshkin A.V., Storozhev Yu.I. Zadachi po teplotekhnike [Tasks for heat engineering]. Krasnoyarsk: GATsMiZ Publ., 1996. 128 p.
9. Mamykin P.S., Strelov K.K. Topki, pechi i sushilki ogneupornykh zavodov [Furnaces, ovens and driers of refractory plants]. Moscow: Gos. nauch.-tekhn. izd-vo lit. po chernoy i tsvetnoy metallurgii Publ., 1950. 140 p.
10. Baskakov A.P., Matsnev V.V., Raspopov I.V. Kotly i topki s kipyashchim sloem [Boilers and furnaces with fluidized bed]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1995. 298 p.
11. Khidiyatov A.M., Osintsev V.V., Gordeev S.V. The results of transfer of a pulverized coal boiler with a steam production capacity of 89 kg / s for burning a coal-water suspension. Теплоэнергетика. 1987. No 1, pp. 5–11 (in Russ.).