

УДК 681.243

DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-9-13

ОСОБЕННОСТИ СУШКИ ЗЕРНА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТОПОЧНЫХ БЛОКОВ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

Павлов С.А.^{1*},
канд. техн. наук;

Дадыко А.Н.²,
инженер

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

²ООО «ОКБ по теплогенераторам», ул. 2-я Мичурина, 2а, стр. 4, г. Брянск, 241021, Российская Федерация

Использование альтернативных видов топлив для сушки зерна и разработка технических средств сушки, в том числе топочных устройств на растительных отходах, являются в настоящее время актуальной задачей. Отметим, что режим сушки с повышающейся температурой агента сушки считается оптимальным для семенного зерна повышенной влажности, поэтому в период прогрева топки и зерна использовано бесступенчатое повышение температуры агента сушки от начальной до конечной. Показали, что в начале топку разжигают с помощью жидкостной или газовой горелки, затем подают твердое топливо. В топочном блоке при подаче твердого топлива первичного и вторичного дутья возникают циклонно-вихревые контуры, в которых циркулируют твердые частицы. Определили, что при использовании в качестве топлива растительных отходов частицы подсушиваются и воспламеняются, начинается прогрев топки и агента сушки, который поступает в подогреватель и в сушилку. Агент сушки одновременно прогревает топку и высушивает зерно, которое циркулирует в сушилке. По достижении кондиционной влажности сушилку переводят на поток. Предложили для расчета длительности сушки использовать математические модели нагрева и охлаждения топки на основе теплового баланса и изменения энтальпии топочной камеры. При этом первую партию зерна высушивают при восходящем температурном режиме одновременно с прогревом топки. Совмещение прогрева топки с сушкой зерна позволяет на 15-20 процентов снизить затраты топлива, так как прогрев топочного блока занимает 1-1,5 часа. При сушке последней партии зерна осуществляется нисходящий режим, то есть одновременно с охлаждением топки происходит сушка зерна с понижающей температурой. Предложили длительность сушки рассчитывать по классическим выражениям, при этом температуру агента сушки принимать средней с учетом разогрева топки и теплообменника, последнюю партию зерна высушивать при нисходящем температурном режиме. Длительность процесса определяется температурой высушенного материала и режимом охлаждения топки. Установили, что при расчете расхода твердого топлива учитывают затраты тепла не только на сушку зерна, но и на прогрев топки, что является функцией теплотехнических параметров топки и сушилки.

Ключевые слова: зерно, сушка, топка, растительные отходы.

■ **Для цитирования:** Павлов С.А., Дадыко А.Н. Особенности сушки зерна при использовании топочных блоков на твердом топливе // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N4. С. 9-13

FEATURES OF GRAIN DRYING USING SOLID FUEL FURNACE BLOCKS

Pavlov S.A. ^{1*},
Ph. D. (Eng.);

Dadyko A.N. ²

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

²ООО «Heat generators experimental design bureau», 2nd Michurin St., 2a build. 4, Bryansk, 241021, Russian Federation

The urgent tasks in agriculture are fuels alternative types use for grain drying and development of drying technical means, including furnace devices on plant refuse. The drying mode with the increasing temperature of the drying agent is considered as optimum for wet seed grain. Therefore, grain continuously variable temperature increase of the drying agent from initial to finite is used during warming up of a fire chamber. At the beginning the fire chamber is kindled by means of a liquid or gas torch, then solid fuel is given. In the furnace unit in case of submission of solid fuel of primary and secondary blasting there are cyclonic and vortex circuits in which solid particles circulate. When using of plant refuse as fuel the particles are dried and

ignite, warming up of a fire chamber and the agent of drying which comes to a heater and to the dryer begins. The drying agent at the same time warms up a fire chamber and dries up grain which circulate in the dryer at the same time. On reaching standard humidity the dryer is transferred to a flow. The authors suggested to use for calculation of drying duration mathematical models of heating and cooling of a fire chamber on the basis of a heat balance and change of an enthalpy of the furnace camera. At the same time the first batch of grain is dried up in case of the ascending temperature condition along with warming up of a fire chamber. Combination of warming up of a fire chamber with grain drying allows to lower fuel expenses by 15-20 percent as warming up of the furnace unit takes 1-1,5 hours. When drying the last batch of grain the descending mode is carried out. Along with cooling of a fire chamber there is a drying of grain at step-down temperature. Drying duration should be calculated on classical formulas. At the same time temperature of the agent of drying is accepted as average taking into account heat-up the fire chamber and the heat exchanger. The last batch of grain should be dried up in case of the descending temperature condition. Process duration is defined by temperature of the dried-up material and the mode of cooling of a fire chamber. When calculating the expenditure of solid fuel we should consider costs of heat not only of grain drying, but also of warming up of a fire chamber that is function of thermotechnical parameters of a fire chamber and the dryer.

Keywords: Grain; Drying; Fire chamber; Plant refuse.

■ **For citation:** Pavlov S.A., Dadyko A.N. Features of grain drying using solid fuel furnace blocks. Sel'skokhozyaysrvennyye mashiny i tekhnologii. 2017; 4: 9-13. DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-9-13. (In Russian).

Использование альтернативных видов топлив для сушки зерна и разработка технических средств сушки, в том числе топочных устройств на растительных отходах, являются в настоящее время актуальной задачей. Растительные отходы в большом количестве остаются при послеуборочной обработке зерновых и крупяных культур, представляющих собой ценное биотопливо, а технические средства сжигания находят применение в сельском хозяйстве [1-6].

Известна технология сушки первой партии зерна перед запуском зерносушилки на поток, заключающаяся в том, что разжигают топку, прогревают зерно, циклически высушивают его до кондиционной влажности при пониженной температуре в течение 15-20 мин, затем сушилку переводят на поток. Температуру агента сушки регулируют изменением подачи топлива и воздуха. Недостаток этой технологии заключается в повышенных затратах тепла на розжиг и необходимость прогрева топki при переходе на твердое топливо.

Цель исследований – расчет длительности высушивания первой и последней партий зерна, а также расхода твердого топлива.

Материалы и методы. Режим сушки с повышающейся температурой (восходящий температурный режим) наиболее оптимален для семенного зерна повышенной влажности. Поэтому в период прогрева топki одновременно прогревают зерно, используя бесступенчатое повышение температуры агента сушки от начальной до конечной допустимой температуры t_k . При этом температура зерна по мере снижения влажности повышается до предельно допустимой [7].

При разогреве топki 30-35% тепла от сгорания топлива поступает на прогрев обмуровки топочного блока [8].

Для расчета расхода твердого топлива при суш-

ке первой партии составили тепловой баланс затрат топлива на сушку и поступление тепла при сжигании твердого топлива. Были получены аналитические выражения для расчета длительности сушки и расхода топлива.

Затраты тепла на сушку зерна можно записать следующим образом:

$$Q = \frac{G_s \Delta U q}{\eta}, \quad (1)$$

где G_s – вместимость сушилки по зерну, кг;

ΔU – влагосъем, кг вл./кг сух мат.;

q – удельные затраты теплоты на испарение влаги из зерна, кДж/кг;

η – доля теплоты, пошедшая на испарение влаги.

Количество теплоты, выделенное при сжигании твердого топлива, составляет:

$$Q_2 = B Q_n^p \tau \eta_0 (1 - \eta^*), \quad (2)$$

где B – расход твердого топлива, кг/ч;

Q_n^p – низшая теплота сгорания твердого топлива, кДж/кг;

τ – длительность сушки, ч;

η_0 – КПД топki;

η^* – доля теплоты, пошедшая на прогрев топki,

$\eta^* \approx 0,35$.

Приравнивая правые части выражений (1) и (2), получим:

$$B = \frac{G_s \Delta U q}{Q_n^p \eta_0 \tau \eta (1 - \eta^*)}, \quad (3)$$

$$\tau = \frac{G_s \Delta U q}{B Q_n^p \eta_0 \eta (1 - \eta^*)}. \quad (4)$$

Рассмотрим сушку первой партии зерна на примере колонковой сушилки типа СЗТ.

На *рисунке 1* приведена схема топочного блока. Первую партию зерна высушивают следующим образом (*рис. 1*).

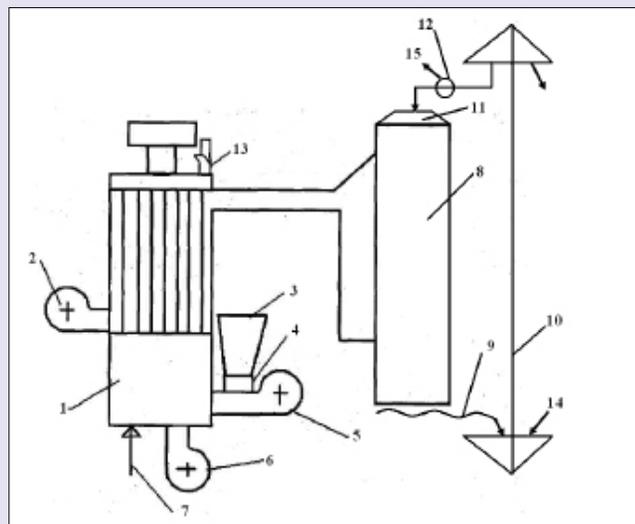


Рис. 1. Технологическая схема топочно блока в агрегате с сушилкой

Fig. 1. Process scheme of the furnace block in the unit with the dryer

Норией 10 влажное зерно 13 загружают в сушилку 8. Затем с помощью жидкостной горелки 7 разжигают топку, дозатором 4 подают из бункера 3 твердое топливо вместе с первичным дутьем 5. Дымовые газы, образующиеся при сжигании твердого топлива, поступают в воздухоподогреватель и дымососом 13 выбрасываются наружу. Вентилятор 2 засасывает наружный воздух в воздухоподогреватель 1, а затем в качестве агента сушки направляет его в сушилку 8. Зерно в сушилке высушивают циркуляционно через средство разгрузки 9, норрию 10 и клапан 12, поставленный в положение «циркуляция». Как только влажность зерна достигает кондиционной, в сушилку подают новую порцию влажного зерна 14, а сухое зерно 15 выводят, перебросив клапан 12 на в положение «поток».

В топочном блоке при подаче твердого топлива, первичного и вторичного дутья возникают циклонно-вихревые контуры, в них циркулируют твердые частицы. При использовании в качестве топлива растительных отходов частицы подсушиваются и воспламеняются, начинается прогрев топки и агента сушки, который направляется в сушилку [9].

Контроль за сушкой и горением топлива осуществляют по температуре агента сушки в диффузоре сушилки, которая должна составлять в колонковых и шахтных сушилках не более $t = Q_{пл} + (15...20)$, где $Q_{пл}$ – предельно допустимая температура нагрева зерна, °С.

Результаты и обсуждение. Для расчета длительности сушки первой партии зерна при постоянной температуре агента сушки можно использовать выражение [10, 11]:

$$\tau = \frac{\Delta U q k}{\alpha f (t_q - \theta_q) \eta}, \tag{5}$$

где k – коэффициент, $k = H/h_i$ (H_i и h_i – толщина слоя зерна в сушилке и толщина элементарного слоя зерна, м.); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·°С; f – удельная поверхность материала, м²/кг; t_{cp} – средняя температура агента сушки, $t_{cp} = (t_n - t_k)/2$, где t_n и t_k – начальная и конечная его температура, °С; Q_{cp} – средняя температура зерна, $Q_{cp} = (Q_n + Q_k)/2$, °С.

Q_n, Q_k – начальная и конечная температура зерна, °С.
Примем $W_n = 22\%$, $W_k = 14\%$ (W_n, W_k – начальная и конечная влажность зерна), $\alpha = 23$ Вт/м²·°С; $f = 1,1$ м²/кг. Температуру агента сушки в начале прогрева примем $t_n = 25$ °С, в конце – $t_k = 60$ °С, температуру зерна в начале прогрева примем $Q_n = 25$ °С, в конце – $Q_k = 35$ °С и среднюю – $Q_{cp} = 30$ °С; также примем $q = 4,6$ кДж/кг; $\eta = \Delta U q / (\Delta U q + \Delta \theta c) = 0,8$ (c – теплоемкость зерна, равная 1,89 кДж/кг·°С); $\eta^0 = 0,35$; $q = 2500$ кДж/кг, $H = 0,2$; $h = 0,01$ м. После расчетов по (5) получим $\tau_0 = 0,9$ ч.

Совмещение прогрева топки с сушкой зерна позволит на 15-20% снизить затраты топлива, так как прогрев топочно блока занимает 1-1,5 ч.

При сушке последней партии зерна осуществляется нисходящий режим, то есть одновременно с охлаждением топки происходит сушка зерна с понижающейся температурой.

Последняя партия зерна высушивается из допущений: потери тепла в окружающую среду отсутствуют, и температура обмуровки одинакова по длине и толщине.

Длительность сушки последней партии зерна можно рассчитать из баланса теплоты и изменения энтальпии при охлаждении топочной камеры по формуле [7]:

$$\alpha = (T - T_0) F dt = G c_{об} dT, \tag{6}$$

где T, T_0 – текущая температура топки и температура воздуха, °С;

G, F – масса обмуровки топки (кг) и ее поверхность (м²);

$c_{об}$ – теплоемкость обмуровки, кДж/кг·°С.

Из (6) получим длительность сушки последней партии зерна:

$$\tau_1 = \frac{G c \ln \frac{T_n - T_0}{T_k - T_0}}{\alpha F}, \tag{7}$$

где T_n, T_k – начальная и конечная температура топки °С на моменты прекращения подачи топлива и окончания сушки, °С.

Выражение (7) можно переписать в виде:

$$\tau_1 = \frac{\sigma^* \rho c_{об} \ln \frac{T_n - T_0}{T_k - T_0}}{\alpha}, \tag{8}$$

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

Температуру T_k можно принять равной темпе-

ратуре высушенного зерна. Если дополнительно охлаждать зерно в сушилке, то конечная температура T_K будет на 6-8°C выше температуры T_0 . Величину ϵ^* можно определить совместным решением уравнения (8) с уравнением прогрева шамотной стенки:

$$\epsilon^* = \sqrt{\frac{\tau_1 a}{0,35}},$$

где a – коэффициент температуропроводности шамотной стенки, $a \approx 0,002 \text{ м}^2/\text{ч}$ [9].

Длительность сушки последней партии зерна зависит от T_H , T_K и соответствует длительности охлаждения топki. Зависимость τ_1 от T_H и T_K при $T_0 = 20^\circ\text{C}$ представлена на рисунке 2.

Выводы. Первую партию зерна высушивают при восходящем температурном режиме одновременно с прогревом топki, длительность сушки рассчитывают по классическим выражениям, но температуру агента сушки принимают средней с учетом разогрева топki и теплообменника.

В расходе твердого топлива следует учитывать затраты тепла не только на сушку зерна, но и на прогрев топki, поскольку он является функцией теплотехнических параметров топki и сушилки.

Последнюю партию зерна высушивают при нисходящем температурном режиме, ее длительность

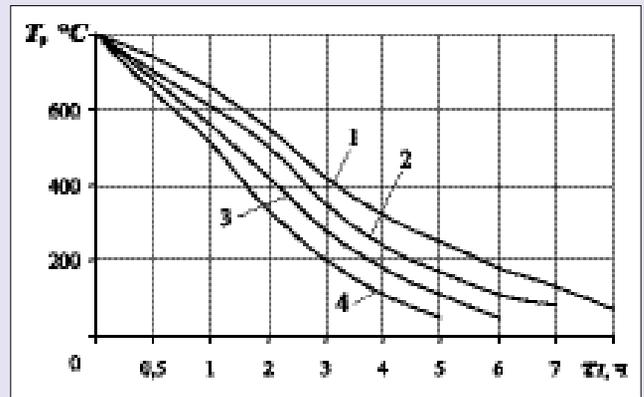


Рис. 2. К расчету длительности сушки последней партии зерна:

1 – охлаждение топki без зерна и продувки;
2, 3, 4 – охлаждение топki с продувкой, соответственно, при $\alpha = 10, 20$ и $40 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

Fig. 2. Duration of drying of the last batch of grain:

1 – cooling of a fire chamber without grain and a blowdown;
2, 3, 4 – cooling of a fire chamber with a blowdown, respectively, at $\alpha = 10$ and $40 \text{ W}/\text{sq.m} \cdot ^\circ\text{C}$

определяется охлаждением топki до температуры высушенного материала и режимом охлаждения топki.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 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 докладов Международной научно-технической конференции. Ч. 1. М.: ВИМ, 2013. С. 9-12.
- 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. N4. С. 8-11.
- Анискин В.И., Голубкович А.В. Перспективы использования растительных отходов в качестве биотоплив // Теплоэнергетика. 2004. N5. С. 60-65.
- Анискин В.И., Голубкович А.В., Сотников В.И. Сжигание растительных отходов в псевдоожиженном слое // Теплоэнергетика. 2004. N6. С. 60-63.
- Анискин В.И., Голубкович А.В. Топочные устройства на растительных отходах // Техника в сельском хозяйстве. 1999. N2. 27 с.
- Витоженец 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.
- Тинькова С.М., Прошкин А.В., Сторожев Ю.И. Задачи по теплотехнике. Красноярск: ГАЦМиЗ, 1996. С. 14.
- Голубкович А.В. Топки на растительных отходах: процессы, конструкции, режимы, расчеты. М.: ВИМ, 2011. 172 с.
- Сажин Б.С. Основы техники сушки. М.: Химия, 1984. 79 с.
- Мамыкин П.С., Стрелов К.К. Топки, печи и сушилки огнеупорных заводов. М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по черной и цветной металлургии, 1950. С. 140.
- Дадыко А.Н. Моделирование аэродинамики факельно-вихревого режима в топке для растительных отходов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. N2. С. 32-35.

REFERENCES

- 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 Ros-sii: Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Vol. 1. Moscow: VIM, 2013: 9-12. (In Russian)
- Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Sizov O.A. Long-term ways of use of energy and environmentally efficient



machine technologies and techniques. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2013; 4: 8-11. (In Russian)

3. Aniskin V.I., Golubkovich A.V. Prospects of use of plant refuse as biofuels. *Teploenergetika*. 2004; 5: 60-65. (In Russian)

4. Aniskin V.I., Golubkovich A.V., Sotnikov V.I. Burning of plant refuse in a fluidized bed. *Teploenergetika*. 2004; 6: 60-63. (In Russian)

5. Aniskin V.I., Golubkovich A.V. Furnace systems on plant refuse. *Tekhnika v sel'skom khozyaystve*. 1999; 2: 27. (In Russian)

6. 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 drugih kul'tur v semenovodcheskikh khozyaystvakh [Recommendations about use of material and technical resources for drying of seeds of grain and other crops in seed-growing farms]. Moscow: Kolos, 1983: 16-17. (In Russian)

7. Tin'kova S.M., Proshkin A.V., Storozhev Yu.I. Zadachi po teplotekhnike [Heat-process engineering tasks]. Krasnoyarsk: GATsMiZ, 1996: 14. (In Russian)

8. Golubkovich A.V. Topki na rastitel'nykh otkhodakh: protsessy, konstruktsii, rezhimy, raschety [Fire chambers on plant refuse: processes, designs, modes, calculations]. Moscow: VIM, 2011: 172. (In Russian)

9. Sazhin B.S. Osnovy tekhniki sushki [Bases of drying technology]. Moscow: Khimiya, 1984: 79. (In Russian)

10. Mamykin P.S., Strelov K.K. Topki, pechi i sushilki ognepurnykh zavodov [Fire chambers, furnaces and dryers in fire-resistant plants]. Moscow: Gos. nauch.-tekhn. izd-vo lit. po chernoy i tsvetnoy metallurgii, 1950: 140. (In Russian)

11. Dadyko A.N. Modeling of aerodynamics of flare and vortex mode in a fire chamber for vegetable waste. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2016; 2: 32-35. (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.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

объявляет набор

на бюджетные и платные места

высшее образование – программа подготовки научно-педагогических кадров

в аспирантуру

на 2017-2018 учебный год

Лицензия №2498 от 15.02.2016

Государственная аккредитация № 2475 от 19 января 2017 года

По направлению подготовки 35.06.04

**Технология, средства механизации и энергетическое оборудование
в сельском, лесном и рыбном хозяйстве.**

Профиль: Машины, агрегаты и процессы (по отраслям);

Профиль: Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве;

Профиль: Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве.

Профиль: технологии и средства механизации сельского хозяйства.

высшее образование – программа Магистратуры на платные места

Лицензия №2498 от 15.02.2016

Адрес института: 109428, Москва, 1-й Институтский проезд, 5. Телефон для справок: 8 (499) 709-33-68.