

Состояние вопроса самонагрева хлебной массы в скирдах

*А.Р. Сухаева, к.т.н., С.Н. Шуханов, д.т.н.,
ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ*

Реализация программы инновационного развития агропромышленного комплекса предполагает создание технических средств и технологий, отвечающих современным требованиям [1–3]. Одной из ключевых проблем является совершенствование технологии уборки зерновых культур.

Материал и методы исследования. Проведённый литературный обзор и анализ позволил установить, что хлебная масса классифицируется как твёрдый дисперсный органический материал. Этот вид материалов подвержен самонагреванию. Характер процесса самонагрева подчиняется законам тепломассообмена и коррелирует от таких свойств хлебной массы, как плотность, химический состав, воздухопроницаемость, влажность, теплопроводность и температура окружающего воздуха. Многочисленные исследования показали, что подавляющее большинство органических материалов нагреваются по законам тепловой теории [4] и для расчёта процесса нагрева можно её использовать. Обычно исходная влажность хлебной массы в скирдах находится в пределах 40–45%, и, как следствие, подвержена биохимическому самонагреванию.

Результаты исследования. Собственно процесс самонагрева влажных органических материалов состоит из трёх этапов. На первом этапе повышение температуры происходит по причине тепловыделений от биохимических реакций в скирдах, где самонагревание является итогом жизнедеятельности микроорганизмов. Интенсивность возрастания температуры ускоряется с увеличением влажности. Второй этап сопровождается пульсацией температуры на уровне максимально достигнутой на первом этапе в пределах 5–10°C. После этого следует третий этап, в котором повышение температуры вызывается химическими процессами. Для нормального прохождения процесса созревания и сушки хлебной массы в скирдах интерес представляет первый этап, в котором температура может достигать 50–80°C, т.е. больше критических температур для семенного зерна 45°C и 55°C для товарного и фуражного зерна.

На современном этапе исследований известны различные подходы к количественному описанию условий самонагрева твёрдых дисперсных материалов.

С целью определения критических условий теплового самонагрева твёрдых веществ и пыли применяется методика ВНИИПО [5], включённая в ГОСТ 12.1044-89, смысл которой заключается в установлении корреляции между температурой,

при которой происходит тепловое самонагревание веществ, его размерами и временем достижения критической температуры:

$$\lg \tau_c = A_p + n_p \lg S, \quad (1)$$

$$\lg c = A_p - n_b \cdot \lg \tau, \quad (2)$$

где t_c – критическая температура самонагрева хлебной массы, °C;

S – удельная площадь вещества, м⁻¹;

τ – время достижения критической температуры, ч;

A_p, n_p, A_b, n_b – коэффициенты, определяемые экспериментальным путём.

Преимуществом методики является малая трудоёмкость в изготовлении лабораторной установки и простота обработки полученных данных, а также проведение экспериментов в воздушной среде. Недостатки методики заключаются в относительной длительности проведения опытов и экстраполяции эмпирической зависимости, полученной в высокотемпературной области, на низкотемпературную область при расчёте критических условий самонагрева. Кроме того, в методике не в полной мере учитываются особенности самонагрева хлебной массы, склонной к биохимическому самонагреванию при влажности более 30%. Это приводит к тому, что в ряде случаев предложенные формулы для определения критических условий самонагрева недостаточно корректны.

Подобный подход к исследованию склонности к самонагреванию твёрдых материалов имеют методики, разработанные в МИХМе. К.С. Кольцовым внесены уточнения в методику ВНИИПО и модернизировано оборудование. Это позволило повысить экспрессивность экспериментальных исследований, но сущность методики осталась прежней.

Математические зависимости, описывающие процесс самонагрева, разработанные при некоторых допущениях [6], позволяют количественно определить опасность конкретных скоплений, но для их выполнения также необходимо знать перечень свойств материалов, которые должны быть определены опытным путём.

Наиболее пристального внимания заслуживают те подходы исследования условий самонагрева, которые используют кинетику процесса. При нахождении критических условий обычно изучают уравнение теплопроводности с внутренними источниками теплоты [6]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T - \frac{Qc^v}{c_p \rho} \cdot k_o \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (3)$$

где a – коэффициент, учитывающий проводимость температуры, м²/с;

Q – тепловой эффект реакции, Дж/моль;

c – концентрация действующего компонента, моль/м³;
 ν – порядок реакции;
 c_p – удельная теплоёмкость, Дж/кгК;
 ρ – плотность, кг/м³;
 κ_o – предэкспонента константы скорости реакции;
 E – энергия активации, Дж/моль;
 R – универсальная газовая постоянная, Дж/мольК;
 T – температура, К.
 τ – время, с.

Рядом авторов было показано, что температурное поле в скоплениях хлебной массы с внутренними источниками тепловыделения при стационарном распределении подобно температурному полю инертного тела при охлаждении на его этапе регулярного теплового режима первого рода [7, 8]. Поэтому при температурной зависимости адиабатической скорости самонагревания P^+ вычисляется по формуле:

$$P^+ = C \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (4)$$

где P^+ – скорость самонагревания в адиабатических условиях, К/с;

C – предэкспоненциальный множитель, К/с;
 E – энергия активации процесса самонагревания, Дж/моль;
 R – универсальная газовая постоянная, Дж/мольК;
 T – температура наиболее нагретого элемента хлебной массы, К;
 e – основание натурального логарифма.

Скорость охлаждения P^- вычисляется как:

$$P^- = \kappa_{охл.} \cdot \Delta T, \quad (5)$$

где $\kappa_{охл.}$ – коэффициент охлаждения, с⁻¹;
 ΔT – разность температур наиболее нагретого элемента тела хлебной массы в скирдах и окружающей среды, К.

Отсюда следует, что дифференциальное уравнение с внутренними источниками тепловыделения (3) для наиболее нагретой точки можно привести к виду в форме баланса [8]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = C \cdot e^{-\frac{E}{RT}} - \kappa_{охл.} \cdot \Delta T. \quad (6)$$

Для критического состояния $T=T_o$, условиям самонагревания хлебной массы соответствует формула:

$$\frac{E}{RT_o^2} \cdot C \cdot e^{-\frac{E}{RT_o}} \geq \kappa_{охл.}. \quad (7)$$

Зависимость (7) является математическим выражением, описывающим условия самонагревания веществ и хлебной массы при экспоненциальной корреляции скорости тепловыделения от температуры. При некоторых условиях тепломассообмена она преобразуется в известные зависимости Н.Н. Семёнова и другие, в том числе теоретические модели ВНИИПО [9].

В этой связи отличие формулы (7) от формулы Н.Н. Семёнова – О.М. Тодеса заключается в том, что в ней учтена неравномерность разогрева материала при критическом состоянии, а от аналогичной формулы Д.А. Франк-Каменецкого – учтён коэффициент теплоотдачи от площади скопления к окружающей среде.

Таким образом, основное достоинство обобщённой формулы (7) перед всеми другими состоит в том, что в ней теплообмен определяется тем же уравнением, что и инертного тела в стадии регулярного режима первого рода. Это способствует тому, что значение коэффициента охлаждения $\kappa_{охл.}$ легко и просто вычислять и определять экспериментально по зависимостям и способам регулярного теплового режима [9, 10].

В формуле (7) левая часть показывает процесс накопления теплоты в скидах, а правая – потери. Коэффициент охлаждения коррелирует от условий тепломассообмена хлебной массы с окружающей средой. Вычислив значение $\kappa_{охл.}$ в скирдах, можно определить критические условия самонагревания органических материалов применительно к различным технологическим процессам, в том числе хлебной массы в скирдах.

Вывод. Обзор и анализ литературных источников позволил выявить основные параметры, оказывающие влияние на процесс самонагревания хлебной массы в скирдах.

Литература

1. Бутенко А.Ф., Асатурян А.В., Чепцов С.М. Экспериментальное определение параметров активного питателя ленточного метателя зерна // Вестник АПК Ставрополя. 2015. № 1. С. 17–21.
2. Шуханов С.Н. Некоторые показатели теплообменного процесса при работе охладителя зерна вихревого типа // Пермский аграрный вестник. 2015. № 3. С. 44–47.
3. Шуханов С.Н. Разделение зернового вороха на фракции с помощью лопастного метателя зерна // Пермский аграрный вестник. 2016. № 4. С. 76–80.
4. Баум А.Е., Резчиков В.А. Сушка зерна. М.: Колос, 1983. 222 с.
5. Киселев Я.С., Хараев А.Б. Самовозгорание растительных материалов с биохимическим саморазогреванием // Техническое обслуживание и диагностика сельскохозяйственной техники: сб. науч. трудов. Иркутск: ИСХИ, 1987. С. 34–39.
6. Удилов В.П., Киселев В.Я., Ширабдоржиев Ц.Ц. Кинетические характеристики процесса самовозгорания некоторых зерновых и бобовых культур // Техническое обслуживание и диагностика с.-х. техники: сб. науч. тр. Иркутск: ИСХИ, 1987. С. 39–46.
7. Упкунов Ю.Н., Хараев А.Б., Филиппов А.С. Варианты обмолота на стационаре // Земля сибирская дальневосточная. 1988. № 8. С. 48–49.
8. Кузнецов А.В. Основные направления исследования процессов уборки зерновых культур и семян трав с их обмолотом на стационаре в условиях Сибири // Научно-технический бюллетень / Со ВАСХНИЛ. Новосибирск, 1986. Вып. 27. С. 28–34.
9. Киселев Я.С., Хараев А.А. Методика определения склонности сельскохозяйственных культур к самовозгоранию // Техническое обслуживание и диагностика сельскохозяйственной техники: сб. науч. тр. Иркутск: ИСХИ, 1988. С. 35–38.
10. Чубарева М.В., Упкунов Ю.Н. Исследования процесса сушки и дозревания хлебной массы в скопления // Механизация сельскохозяйственного производства в начале XXI века: сб. науч. тр. Новосибирск: НГАУ, 2001. С. 116–121.