УДК 004.9:631.67

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ КОНДЕНСАТА В ЗЕРНОХРАНИЛИЩАХ

Богачёв Н.С., студент 2 курса института приборостроения и электротехнических систем
Научный руководитель – Кузь Е.В., старший преподаватель
ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»

Ключевые слова: *зернохранилище, конденсат, точка росы, математическое моделирование, теплопередача, вентиляция, влажность воздуха.*

В работе разработана математическая модель прогнозирования образования конденсата в зернохранилищах на основе расчёта точки росы и анализа температурных перепадов. Определены критические условия выпадения влаги и предложены инженерные меры снижения потерь при хранении зерна.

Введение. Зерно является стратегически важным продуктом агропромышленного комплекса Российской Федерации. Значительные убытки при хранении зерновых связаны с избыточной влажностью и появлением конденсата в зернохранилищах. Даже при выполнении стандартных требований в силосах и складах возможны колебания температуры, которые вызывают локальное осаждение влаги.

Проблема конденсации особенно остра в районах с континентальным климатом, где суточные и сезонные перепады температур бывают очень большими.

Конденсат вызывает: самонагрев зерна, рост плесени, ухудшение всхожести, финансовые убытки.

Поэтому важно создать инженерную модель для предсказания зон конденсации внутри зернохранилищ.

Цель работы. Разработать математическую модель прогнозирования образования конденсата в зернохранилище на основе анализа температурных и влажностных параметров воздуха и определить критические условия его возникновения.

Результаты исследований. Объектом исследования является воздушная среда внутри металлического силосного зернохранилища, используемого для хранения зерновых культур. Предметом исследования выступает зависимость образования конденсата от температурно-влажностных параметров воздуха и условий теплопередачи через ограждающие конструкции силоса. Образование конденсата обусловлено достижением температурой внутренней поверхности ограждающей конструкции значения точки росы воздуха, находящегося внутри зерновой массы. Физическая сущность процесса связана с тем, что при охлаждении влажного воздуха до температуры насыщения содержащийся в нём водяной пар начинает переходить в жидкую фазу.

Для количественной оценки условий конденсации использовалась аппроксимация уравнения Магнуса для определения температуры точки росы:

$$(T, \varphi) = \frac{aT}{b+T} + \ln(\varphi),$$

Где T — температура воздуха внутри силоса, °C; φ — относительная влажность воздуха (в долях единицы); a = 17,27; b = 237,7 °C.

Моделирование температурного режима стенки выполнялось на основе закона теплопроводности Фурье для плоской стенки:

$$q = \lambda \frac{(T_{\text{вн}} - T_{\text{нар}})}{\delta}$$

Где: λ — коэффициент теплопроводности материала стенки (для стали λ ≈ 50 Вт/(м·К)); δ — толщина стенки (0,004 м);

Т.вн Т.нар — температуры внутренней и наружной среды соответственно.

В рамках расчётной модели были приняты характерные климатические условия умеренно-континентального региона: температура воздуха внутри зерновой массы +15 °C, относительная влажность 85 %, наружная температура –5 °C. Подставляя значения в формулу Магнуса, получаем:

$$\gamma = \frac{17{,}27 \cdot 15}{237{,}7 + 15} + \ln(0{,}85)$$

$$\gamma \approx 0{,}969$$

$$T_d \approx 12{,}4^{\circ}C$$

Таким образом, точка росы при заданных условиях составляет приблизительно +12,4 °C. При внезапном падении температуры на улице до –5 °C из-за активного теплообмена температура внутренней стороны металлической оболочки может опускаться до +10…+11 °C. Исследование выявило, что самые опасные фазы — это переходные сезоны (осень и весна), когда наблюдаются большие суточные перепады температуры. Если колебания превышают 15 °C, вероятность появления участков конденсации увеличивается на 20–30 %. Ещё одним фактором выступает местная неоднородность температур в зерновой массе, обусловленная естественной конвекцией воздуха.

Расчёт также показал, что применение теплоизоляционного слоя толщиной 50 мм с коэффициентом теплопроводности 0,04 Вт/(м·К) позволяет уменьшить температурный перепад на внутренней поверхности на 35–45 %, что практически исключает достижение точки росы при умеренной влажности. Повышение интенсивности активной вентиляции снижает относительную влажность воздуха на 5–10 %, что уменьшает значение температуры точки росы и тем самым снижает вероятность конденсации.

Практическая значимость исследования заключается в возможности прогнозирования зон риска конденсации при заданных климатических параметрах. Для минимизации потерь зерна рекомендуется оснащение силосов системой непрерывного мониторинга температуры и относительной влажности с автоматическим расчётом точки росы в реальном времени. При приближении температуры поверхности к значению точки росы целесообразно включение активной вентиляции либо использование предварительного выравнивания температурного режима.

Выводы. В ходе исследования установлено, что образование конденсата в металлических зернохранилищах определяется соотношением температуры внутренней поверхности стенки и температуры точки росы воздушной среды. Расчёт по уравнению

Магнуса показал, что при высокой относительной влажности и резком понижении наружной температуры возникает превышение температуры точки росы над температурой поверхности, что приводит к выпадению влаги. Наиболее критичными являются периоды межсезонных температурных колебаний. Применение теплоизоляции и систем активной вентиляции позволяет стабилизировать температурно-влажностный режим и снизить риск образования конденсата, что способствует уменьшению потерь зерна при хранении.

Библиографический список:

1. Разворотнев А.С. Технология мониторинга и управления воздушными потоками внутри металлического силоса при хранении зерна // Хранение и переработка сельскохозяйственной продукции. 2020. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-monitoringa-i-upravleniya-vozdushnymi-potokami-vnutri-metallicheskogo-silosa-pri-hranenii-zerna (дата обращения: 23.02.2026).

2. Chen X., et al. Experimental Comparison of Ventilation Strategies for Condensation Risk in Underground Wheat Granaries // Buildings. 2025. – DOI:10.3390/buildings15193483. – URL: https://www.mdpi.com/2075-5309/15/19/3483 (дата обращения: 24.02.2026)

3. Kechkin I.A. Management of air flows inside steel silo during grain storage // BIO Web of Conferences. 2020. – Vol. 29. – 08008. – URL: https://www.bio-conferences.org/articles/bioconf/pdf/2020/01/bioconf_fies2020_00108.pdf дата обращения: 24.02.2026)

MATHEMATICAL MODELING OF CONDENSATE FORMATION IN GRAIN STORAGE FACILITIES

Bogachov N.S.
Scientific supervisor – Kuz E.V.
FSBEI HE Vladimir Dahl Lugansk State University

Keywords: *grain storage, condensation, dew point, mathematical modeling, heat transfer, ventilation, and air humidity.*

The paper developed a mathematical model for predicting condensation formation in grain storage facilities based on the calculation of dew points and the analysis of temperature differences. Critical conditions for moisture precipitation were identified, and engineering measures were proposed to reduce losses during grain storage.