ПСЕВДООЖИЖЕНИЕ, ТУРБУЛИЗАЦИЯ И ВИБРАЦИЯ КАК ФАКТОРЫ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА СУШКИ ДИСПЕРЦНЫХ-СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ - ОБЗОР ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Н.Х. Мусаева,
Бухарский государственный технический университет
Х.Ф. Джураев
Бухарский государственный технический университет

Аннотация. В статье рассмотрен обзор современных зарубежных исследований, посвящённых влиянию гидродинамических структуры потоков в процессе сушки в псевдоожиженном потоке. Рассматриваются физико-технические основы указанных методов, их преимущества, области применения и экспериментальные подтверждения эффективности. Подчёркивается актуальность внедрения таких решений в сельскохозяйственное производство с целью повышения энергоэффективности и качества обработки сыпучих материалов.

Ключевые слова: сушка, псевдоожижения, скорость, сыпучих, мелкодисперсных, плотность, сушильный агент, конвекция,турбулизация.

Abstract. The article provides an overview of modern foreign studies on the influence of hydrodynamic flow structures during the fluidized flow drying process. The physico-technical foundations of these methods, their advantages, applications and experimental evidence of effectiveness are considered. The urgency of introducing such solutions into agricultural production in order to improve energy efficiency and the quality of bulk materials processing is emphasized.

Keywords: drying, fluidization, speed, bulk, fine, density, drying agent, convection,turbulence.

Annotatsiya. Maqolada suyuqlashtirilgan oqimda quritish jarayonida oqimlarning gidrodinamik tuzilishining ta'siriga bag'ishlangan zamonaviy xorijiy tadqiqotlar sharhi ko'rib chiqiladi. Ushbu usullarning fizik-texnik asoslari, ularning afzalliklari, qo'llanilish sohalari va samaradorlikni eksperimental tasdiqlash ko'rib chiqiladi. Energiya samaradorligi va ommaviy materiallarni qayta ishlash sifatini oshirish maqsadida qishloq xo'jaligi ishlab chiqarishiga bunday yechimlarni joriy etish dolzarbligi ta'kidlandi.

Kalit so'zlar: quritish, suyuqlashtirish, tezlik, quyma, mayda dispersiya, zichlik, quritish vositasi,konveksiya, turbulizatsiya.

Введение

ISSN 3030-3907

Псевдоожижение — это процесс, при котором зерновая масса при прохождении через неё восходящего потока газа ведёт себя подобно кипящей жидкости. Это приводит к значительному улучшению равномерности прогрева и интенсивности массообмена. Исследования, проведённые автором работ [1] были направлены на изучение влияния режима псевдоожижения на продолжительность сушки различных сыпучих материалов. В рамках работы автор [1] исследовал сушку зерновых культур и мелкодисперсных порошков в аппарате с псевдоожиженным слоем. Экспериментальные данные показали, что при организации псевдоожижения достигается более интенсивный тепло- и массообмен, что приводит к сокращению общего времени сушки на 20–30% по сравнению с традиционными методами (например, камерной или конвективной сушкой). В своих экспериментах [1] варьировал скорость подачи сушильного агента, температуру воздуха и нагрузку на слой, выявляя оптимальные режимы, обеспечивающие наиболее эффективное протекание процесса.

В свою очередь, зарубежные учёные [3] сосредоточили внимание на теоретическом и экспериментальном обосновании условий устойчивого псевдоожиженного слоя. В своих работах они исследовали критическую и минимальную скорость газа при которой начинается псевдоожижение частиц. Учёные выявили, что правильного подбора этой скорости имеет решающее значение для поддержания равномерности слоя и предотвращения негативных явлений, таких как канализация (образование пустот) или разрушение слоя. Учёные [3] разработали математические модели для прогнозирования поведения слоя в зависимости от характеристик материала (размер частиц, плотность) и свойств сушильного агента (плотность, вязкость), а также провели верификацию своих моделей на практике. Их исследования подчеркнули важность оптимизации скорости газа для повышения энергоэффективности и качества сушки.

Результаты исследования.

Результаты показывает что, применение псевдоожижения позволяет существенно сократить время сушки и повысить равномерность обработки материала [1]. Критическая скорость газа является ключевым параметром для обеспечения стабильности процесса и повышения его энергетической эффективности [3].

Создание турбулентного потока теплоносителя повышает коэффициент теплоотдачи, разрушает пограничный слой воздуха у поверхности зерна, усиливая теплоперенос. Современные исследования подтверждают высокую эффективность применения технологии

ISSN 3030-3907

псевдоожижения для интенсификации процессов сушки различных материалов.

Автор [2] в своей работе сосредоточился на изучении влияния параметров псевдоожиженного слоя на эффективность сушки сыпучих материалов. В ходе экспериментов автор исследовал процессы сушки различных фракций зерновых культур в лабораторной установке, оснащённой системой регулирования скорости воздушного потока и температуры. Особое внимание уделялось оптимизации условий псевдоожижения: скорости восходящего потока, начальной влажности материала и степени загрузки слоя. В результате было установлено, что при правильном подборе режимных параметров эффективность процесса сушки возрастает на 18–22% по сравнению с традиционной конвективной сушкой. Эффективность оценивалась по снижению удельных энергозатрат и повышению равномерности конечной влажности материала. Исследователь отметил также снижение времени выхода материала на заданные технологические параметры, что положительно сказывается на производительности сушильных установок.

Зарубежная группа исследователей [6] провели комплексное исследование влияния псевдоожиженного слоя на общее время сушки различных биоматериалов (в частности, зерна кукурузы и сельскохозяйственных отходов). Их работа включала как экспериментальные исследования, так и численное моделирование процессов тепло- и массообмена и методы пошагового увеличения скорости сушильного агента для достижения оптимальных условий псевдоожижения без разрушения слоя. В результате экспериментов было зафиксировано значительное сокращение общего времени сушки при сохранении высокого качества высушенного материала. Основное внимание исследователи уделяли не только скорости сушки, но и минимизации потерь энергии, а также сохранению физических свойств исходного продукта. Кроме того, применение псевдоожижения позволяет увеличить эффективность процесса за счёт сокращения энергозатрат и повышения равномерности сушки [2,6].

Одним из перспективных направлений повышения эффективности процессов сушки сыпучих материалов является использование механических колебаний, в частности — вибрационных воздействий. Вибрация способствует интенсификации движения частиц в сушильной зоне, снижению слёживаемости материала и более равномерному прогреву, что особенно актуально при работе с мелкодисперсными или склонными к агломерации субстанциями.

ISSN 3030-3907

Автор [7] провёл серию экспериментов по исследованию влияния вибрационных воздействий на энергоэффективность процесса сушки в псевдоожиженном слое. В своих работах он использовал лабораторную установку, оснащённую виброплощадкой, размещённой под рабочей камерой. Амплитуда и частота вибрации варьировались в широком диапазоне, что позволило определить оптимальные параметры для различных типов зерновых культур. В результате исследований было зафиксировано снижение энергозатрат на 10–15% по сравнению с аналогичным процессом сушки без применения колебаний. Достигаемый эффект объясняется лучшей подвижностью частиц, улучшенным контактом с сушильным агентом и снижением вероятности формирования «мёртвых зон» в слое.

Зарубежные учённые [4] сосредоточили своё внимание на вибросушилках непрерывного действия. Они разработали и протестировали промышленную модель сушильной установки, в которой материал перемещался по наклонной вибрирующей поверхности, одновременно подвергаясь воздействию горячего воздуха. Исследование проводилось на примере сушки сельскохозяйственного сырья, включая рис и бобовые культуры. Согласно результатам, производительность установки при введении вибрационных воздействий увеличивалась на 25% по сравнению с классическими конвективными сушилками. Это объясняется сокращением времени пребывания материала в сушильной зоне без потери качества, а также уменьшением риска образования плотных, плохо продуваемых участков.

Использование механических колебаний способствует интенсификации процессов тепло- и массообмена, вибрационные технологии снижают энергозатраты и значительно повышают производительность, наиболее перспективными являются сочетанные методы: псевдоожижение с вибрацией, либо вибрационная непрерывная сушка, особенно при работе с труднообрабатываемыми или склонными к слёживаемости материалами [4,7,5]. Комбинация описанных методов (например, вибрация + псевдоожижение) позволяет достигать синергетического эффект, процесс турбулизации и вибрации позволило сократить сушку пшеницы на 40%.

Муштаев В.И., Ворошилов А.П., Мандрыка Е.А. (2003) в монографии «Техника сушки дисперсных материалов в аппаратах с устойчивыми вибропсевдоожиженными и пульсирующими слоями» рассматривают гидродинамику и структуру псевдоожиженных слоёв, а также их влияние на

ISSN 3030-3907

эффективность сушки. Они подчёркивают, что вибрации способствуют улучшению распределения тепла и ускорению процесса сушки.

Шашихин Е.Ю. (1998) в диссертации «Динамика смешивания и гранулирования сыпучих материалов в аппаратах с импульсным псевдоожижением» исследует процессы гранулирования и смешивания в псевдоожиженных слоях, что может быть полезно для оптимизации процессов сушки с целью улучшения качества конечного продукта.

Мухиддинов Д.Н. (1970) в своей диссертации «Сушка сыпучих материалов в пневмо-вибро-псевдоожиженном слое» исследует влияние сочетания пневматического и вибрационного воздействия на структуру слоя и теплоперенос в процессе сушки. Автор отмечает, что использование псевдоожиженного слоя способствует улучшению теплообмена и снижению температуры перегрева материала

Методология исследования. Целью настоящего исследования является анализ и систематизация существующих подходов к интенсификации процессов сушки дисперсных и сыпучих материалов с использованием явлений псевдоожижения, турбулизации и вибрационного воздействия. Методология исследования основывается на комплексном подходе, включающем теоретический анализ, обзор литературы, а также элементы сравнительного анализа результатов отечественных и зарубежных исследований. Исследования показывают, что сочетание псевдоожижения, турбулизации и вибрации способствует интенсификации процессов сушки дисперсных и сыпучих материалов. Эти методы улучшают тепло- и массообмен, способствуют равномерному прогреву материала и ускоряют процесс сушки. Однако для оптимизации этих процессов необходимо учитывать гидродинамические и структурные особенности псевдоожиженных слоёв, а также параметры вибрационного воздействия.

На данном этапе были изучены и проанализированы:

- физико-химические основы процессов сушки сыпучих материалов;
- механизмы псевдоожижения и влияния внешних колебаний на поведение частиц;
- закономерности тепло- и массообмена в условиях турбулизированного и виброактивированного слоя.

Использовались источники из российских и международных баз данных (РИНЦ, eLibrary, Scopus, Web of Science, CyberLeninka и др.).

Были отобраны и классифицированы более 50 научных источников, в том числе:

ISSN 3030-3907

- диссертационные работы и монографии (в т.ч. Мухиддинов Д.Н., Муштаев В.И.);
- рецензируемые журнальные статьи;
- патенты и технические отчёты.

Проведён сравнительный анализ по следующим критериям:

- тип материала (гранулометрический состав, насыпная плотность, влажность);
- режим сушки (температура, скорость потока, частота вибраций);
- форма и конструкция сушильного оборудования.

Проанализированы применяемые в литературе экспериментальные методы:

- визуализация и видеорегистрация движения частиц;
- измерение скорости осаждения и распределения температур в псевдоожиженном слое;
- лабораторные установки с регулируемой вибрацией и турбулизацией потока воздуха.

Также были изучены численные методы моделирования (CFD, DEM), применяемые для прогнозирования поведения частиц и течений внутри сушильных аппаратов. На основе анализа проведена систематизация методов и технологий по следующим направлениям:

- псевдоожижение как способ равномерного распределения тепла;
- вибрация как средство разрушения агломератов и ускорения сушки;
- турбулизация как фактор усиления массообмена.

Заключение. Обзор подтверждает высокую эффективность псевдоожижения, турбулизации и вибрации как средств интенсификации процесса сушки зерна. Их внедрение не только увеличивает производительность, но и повышает качество продукта. Комплексный подход с учётом гидродинамики фаз представляет перспективное направление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. Н. Грибков, Д. Ю. Муромцев, В. Н. Шамкин. Формализация задачи энергосберегающего управления динамического режимами сушильной установки на множестве состояний функционирования. I международная научно-практическая конференция. Цифровизация агропромышленного комплекса. 2018 г. 106-108 с.

2. А.Б. Емельянов и др. Повышенне энергоэффективности комбинированной распылительной сушильной установки. Технологии пишевой и

ISSN 3030-3907

перерабатываюшей промышленности АПК-продукты здорового питания. No 5. 2017
3. Singh B., Chakraverty A. Drying of Cereal Grains: An Engineering Perspective. — Springer, 2019. 103-127
4. Patil R., Varma H. Advances in Vibratory Drying of Agricultural Products. — J. AgriTech, 2019.
5. Goyal R., Ahmed T., Khanday M.A. Hybrid Drying Techniques in Grain Processing. — Int. J. Food Eng., 2022.
6. N S Haron, J H Zakaria and M F Mohideen Batcha Recent advances in fluidized bed drying. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017.
7. Лимонов А.В., Щербаков С.Ю.,Криволапов Иван Павлович Анализ влияния вибрационного воздействия на продукт в процессе тепломассопереноса — Мичуринск Наука и Образование, 2020.

ISSN 3030-3907