

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени доктора философии PhD по 6D072400 –
«Технологические машины и оборудование»

Кобеева Загира Сапарбековна

Гидродинамика и тепломассообмен при фильтрационной сушке измельченной древесины

Цель диссертационного исследования: разработка теоретических основ гидродинамики, кинетики и динамики тепломассообменных процессов фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка, их экспериментальное подтверждение и на основе полученных научных результатов создание методики, порядка расчета и рекомендации по проектированию фильтрационной сушильной установки, а также испытание в производственных условиях с внедрением в промышленность.

Задачи исследования:

- определение физико- химических характеристик, фракционного состава полидисперсной смеси измельченных стеблей хлопка, пористости, плотности и установление формы частиц;
- экспериментальное исследование гидравлического сопротивления пористой структуры слоя измельченных стеблей хлопка под воздействием теплового агента и получение расчетной функциональной зависимости числа Эйлера от числа Рейнольдса, определение опытных коэффициентов модифицированного уравнения Эргуна;
- экспериментальное исследование кинетики фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка при изменении скорости, температуры теплового агента и высоты слоя;
- получение зависимостей для расчета времени достижения критической влажности и времени сушки при частичном и полном насыщении теплового агента, а также определение общего времени фильтрационной сушки;
- изучение процессов тепломассообмена между тепловым агентом и сухих, а также влажных измельченных стеблей хлопка при фильтрационной сушке и обобщение результатов экспериментальных исследований в безразмерной форме;
- разработка методики и порядка расчета фильтрационной сушильной установки для сушки измельченных стеблей хлопка основанных на полученных результатах, а также рекомендаций по эксплуатации и проектированию;
- испытание результатов исследований в опытно-промышленных условиях и внедрение в промышленности.

Методы исследования: методы ситового анализа и электронной микроскопии для определения гранулометрического состава и структурного строения, современные методы физического и математического моделирования для получения опытных данных по гидродинамике, модель идеального вытеснения для расчета кинетических параметров, теплофизическое моделирование для исследования тепломассообмена, числовые и аналитические методы для решения дифференциальных уравнений, пакеты прикладных

программ для обработки и обобщения результатов экспериментальных исследований.

Основные положения (доказанные научные гипотезы и другие выводы, являющиеся новыми знаниями), выносимые на защиту:

- конструкция фильтрационной установки для сушки измельченных стеблей хлопка;

- результаты исследования гидравлического сопротивления при фильтрации теплового агента через стационарный слой измельченных стеблей хлопка, опытные коэффициенты модифицированного уравнения Эргуна, а также полученная функциональная зависимость в виде безразмерных комплексов Эйлера и Рейнольдса;

- установленные периоды полного и частичного насыщения теплового агента, а также полученная зависимость для определения значения кинетического коэффициента “ η ” для измельченных стеблей хлопчатника;

- зависимости для расчета времени достижения критической влажности и времени сушки при частичном и полном насыщении теплового агента, расчетное уравнение для определения общего времени фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка от начального до конечного влагосодержания;

- уравнения для определения коэффициента теплоотдачи в зависимости от скорости движения теплового агента через сухой слой и коэффициентов тепло- и массоотдачи через влажный слой измельченных стеблей хлопка при фильтрационной сушке;

- методика и порядок расчета, проектирования и эксплуатации промышленных фильтрационных сушильных установок для сушки измельченных стеблей хлопчатника.

Описание основных результатов исследования.

С помощью многоцелевого растрового электронного микроскопа определены физико-химические характеристики, фракционный состав, пористость, насыпная и истинная плотность, установлены геометрические формы измельченных стеблей хлопка.

При проведении лабораторных исследований фильтрационной сушильной установки получены графические зависимости и расчетные уравнения гидравлического сопротивления, времени сушки в периодах частичного и полного насыщения теплового агента влагой, параметров массо- и теплообмена при фильтрации теплового агента через слой измельченных стеблей хлопка.

Принимая во внимание, что коэффициент гидравлического сопротивления λ_1 является функцией числа Рейнольдса, для расчета его представляют в виде двухчленного уравнения, которое учитывает потери на трение и потери на локальное сопротивление:

$$\Delta P = A \cdot \frac{\mu \cdot a^2}{32 \cdot \varepsilon^3} \cdot N_e \cdot v_0 + B \cdot \frac{\rho \cdot a}{8 \cdot \varepsilon^3} \cdot N_e \cdot v_0^2, \quad (1)$$

где A и B – опытные коэффициенты; μ – коэффициент динамической вязкости газового потока, Па·с; a – эффективная удельная площадь поверхности неподвижного слоя измельченного материала, м²/м³; ε – доля пустот на единицу объема неподвижного слоя измельченного материала, м³/м³; v_0 – фиктивная

скорость фильтрации газа, м/с; H_e – эквивалентная длина каналов, по которым движется поток газа, м; ρ – плотность газового потока, кг/м³;

Для определения опытных коэффициентов A и B уравнения (1) следует привести к линейному виду относительно фиктивной скорости фильтрации газового потока и представить в виде:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = A^* + B^* \cdot v_0 \quad , \quad (2)$$

где $A^* = A \cdot \frac{\mu \cdot a^2}{32 \cdot \varepsilon^3}$ и $B^* = B \cdot \frac{\rho \cdot a}{8 \cdot \varepsilon^3} \cdot v_0$

Опытные коэффициенты уравнения (2) для стеблей хлопка были определены экспериментально в условиях эксперимента:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = 9800 + 15000 \cdot v_0 \quad . \quad (3)$$

Для получения расчетных зависимостей в виде безразмерных комплексов результаты экспериментов были представлены в виде функциональной зависимости числа Эйлера от числа Рейнольдса и геометрического симплекса. Аппроксимация экспериментальных данных степенной функцией позволила определить показатель числа Рейнольдса и опытный коэффициент A :

$$Eu = 105 \cdot Re_e^{-0,4} \cdot \frac{H_e}{d_e} \quad . \quad (4)$$

Эта зависимость справедлива при значении числа Рейнольдса $40 \ll Re \ll 180$. Показано, что максимальная относительная погрешность не превышает 8 %.

Анализ результатов исследований кинетики сушки показывают, что критическое влагосодержание измельченных стеблей хлопчатника зависит как от температуры и скорости фильтрования теплового агента, так и высоты стационарного слоя. Установлены периоды полного и частичного насыщения теплового агента влагой. Получена зависимость для определения значения кинетического коэффициента “ η ”, для измельченных стеблей хлопчатника:

$$\eta = 3,3 \cdot 10^{-4} \cdot t^{0,54} \cdot v_0^{2,8} \quad . \quad (5)$$

С учетом зависимости (5) получено уравнение для расчета времени достижения критического влагосодержания, которое дает возможность прогнозировать интенсивность фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопчатника в периоде полного насыщения теплового агента влагой и является справедливой до достижения измельченными стеблями хлопчатника критического влагосодержания $w_{кр}^c$:

$$\frac{w^c}{w_0^c} = 1 - 3,3 \cdot 10^{-4} \cdot t^{0,54} \cdot v_0^{2,8} \cdot e^{-20,74 \cdot H} \quad , \quad (6)$$

с учетом уравнения (6) получено уравнение для расчета времени достижения $\tau_{кр}$ измельченными стеблями хлопчатника критической влажности:

$$\tau_l = \frac{(w^c - w_{кр}^c)}{w_0^c \cdot 3,3 \cdot 10^{-4} \cdot t^{0,54} \cdot v_0^{2,8} \cdot \tau \cdot e^{-20,74 \cdot H}} \quad , \quad (7)$$

а для расчета времени сушки в периоде частичного насыщения теплового агента влагой получена зависимость:

$$\tau_{II} = \frac{1}{\chi \cdot N} \cdot (1 + \ln \chi (w^c - w_k^c)) =$$

$$= \frac{1}{(1,1 \cdot w_0^c \cdot 3,3 \cdot 10^{-4} \cdot t^{0,54} \cdot v_0^{2,8} \cdot \tau \cdot e^{-20,74 \cdot H})} \times (1 + \ln(1,1 \cdot N \cdot (w^c - w_k^c))). \quad (8)$$

Общее время фильтрационной сушки измельченных стеблей хлопка можно рассчитать, как сумму зависимостей (7) и (8).

$$\tau = \tau_I + \tau_{II} = \frac{(w_0^c - w_k^c p^c)}{(w_0^c \cdot A \cdot t^n \cdot v_0^m \cdot e^{-a \cdot H})} + \frac{1}{\chi \cdot N} \cdot (1 + \ln \chi (w^c - w_{kp}^c)), \quad (9)$$

где, w^c , w_p^c , w_{kp}^c - соответственно, текущее, равновесное и критическое значения влагосодержания материала; кг Н₂О/кг сух.мат.; τ - время сушки, с; “ η ” и “ a ”- кинетические коэффициенты; N -скорость сушки в периоде полного насыщения теплового агента влагой, кг Н₂О/кг сух.мат.; χ -относительный коэффициент сушки, кг Н₂О/кг сух.мат.

Коэффициент теплоотдачи от теплового агента к сухим частицам измельченных стеблей хлопка при различных скоростях движения теплового агента рассчитывали согласно зависимости:

$$Nu = 0,35 \cdot Re_e^{0,88} \cdot Pr^{0,33}, \quad (10)$$

где: $Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda}$ – критерий Нуссельта; $Re_e = \frac{v \cdot d_e}{\nu}$ – критерий Рейнольдса; $Pr = \frac{\nu}{a}$ – критерий Прандтля; λ – коэффициент теплопроводности теплового агента, Вт/м·К; v – действительная скорость фильтрации теплового агента, м/с; ν – коэффициент кинематической вязкости теплового агента, м²/с; a – коэффициент температуропроводности теплового агента, м²/с.

Зависимость для определения коэффициента теплоотдачи от теплового агента к влажным частицам измельченных стеблей хлопка имеет вид:

$$Nu = 0,061 \cdot Re_e^{0,65} \cdot Pr^{0,33}, \quad (11)$$

Зависимость для определения коэффициента массоотдачи в тонком слое измельченных стеблей хлопка учитывающая геометрические параметры слоя и аппарата представлена в виде:

$$Sh = 0,061 \cdot Re_e^{0,65} \cdot Sc^{0,33} \quad (12)$$

Приведенные зависимости (11) и (12) позволяют определить коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи при фильтрационной сушке в стационарном слое измельченных стеблей хлопка в широких пределах изменения числа Рейнольдса

($10 \leq Re \leq 100$) и прогнозировать затраты тепловой энергии на реализацию процесса фильтрационной сушки и, соответственно, эксплуатационные затраты на этапе проектирования установки фильтрационной сушки. Максимальное значение относительной погрешности не превышает 9 %.

Предложены инженерно-технические решения при разработке фильтрационной сушильной установки для сушки измельченных стеблей хлопка в производстве композитных древесно-стружечных плит, которые внедрены в ТОО «Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент». Эти решения предполагают замену барабанной сушильной установки на фильтрационную сушильную установку, на которую получен патент РК на полезную модель.

Устройство отличается конструкцией пластины и крышкой камеры сушки с дифференциальной перфорацией с уменьшением живого сечения в направлении движения высушиваемого материала. Система распределения теплоносителя размещена непосредственно в камере сушки расположенной с уменьшающим шагом в направлении движения высушиваемого материала.

Предлагаемые инженерные решения позволяют создать одинаковое гидравлическое сопротивление вдоль всей камеры разрежения и уменьшить материалоемкость установки. Размещение системы распределения теплоносителя непосредственно в камере сушки обеспечивает равномерную сушку материала, исключая его перегрев, что приведет к уменьшению эксплуатационных затрат и повысит эффективность процесса.

На основе полученных уравнений и известных зависимостей в области тепло- и массопереноса разработана методика и порядок расчета гидравлического сопротивления, параметров кинетики, тепломассообмена фильтрационной сушильной установки, которая передана в ТОО «Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент» для расчета и модернизации сушильной установки.

Разработаны рекомендации по проектированию и эксплуатации промышленных образцов аппаратов для проведения процессов сушки и проведен анализ технических характеристик предлагаемой фильтрационной установки с расчетом материальных и эксплуатационных затрат.

Обоснование новизны и важности полученных результатов. Новизна предложенных уравнений для расчета гидравлического сопротивления, расчетных зависимостей в виде безразмерных комплексов (функциональная зависимость критерия Эйлера от критерия Рейнольдса и геометрического симплекса, коэффициентов массоотдачи и теплоотдачи в критериальной форме), зависимость для определения значения кинетического коэффициента, уравнения для расчета времени достижения критического влагосодержания, обосновывается тем, что они учитывают закономерности движения, температуру теплового агента и высоту слоя, гранулометрический состав, пористость, насыпную и истинную плотности, установленные геометрические формы измельченных стеблей хлопка, а также конструктивные параметры установки, на которую имеется патент РК на полезную модель и получены на основе известных законов гидродинамики и тепло – и массопередачи. Важность полученных уравнений состоит в том, что они составляют основу инженерной методики и порядка расчета и позволяют рассчитать технологические параметры фильтрационной сушильной установки.

Соответствие направлениям развития науки или государственным программам. Работа выполнялась в соответствии с направлением исследований Комитета науки МОН РК по приоритету «Устойчивое развитие агропромышленного комплекса и безопасность сельскохозяйственной продукции», по специализированному научному направлению «Переработка и хранение сельскохозяйственной продукции и сырья».

Описание вклада докторанта в подготовку каждой публикации. По теме диссертации опубликовано 10 статей. Общий объем вклада докторанта составляет 55-60%. Вклад в статьи представляют такие составляющие, как проведение экспериментальных исследований, обработка результатов в виде табличных значений и графических зависимостей, получение расчетных уравнений.