

АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание ученой степени доктора философии PhD по специальности 6D072400 – Технологические машины и оборудование

Джанобаев Даурен Жумагалиевич

Разработка и расчет процесса фильтрационной сушки материалов волокнистой структуры

Актуальность диссертационного исследования. Известно, что процесс удаления влаги из материала сопровождается нарушением связи ее с материалом, на что затрачивается значительное количество энергии. Во время сушки хлопка-сырца важно выбрать оптимальный режим сушки, поскольку при несоответствующих параметрах сушки, наблюдается обрыв волокна, уменьшение его длины, в результате чего снижается качество волокна.

Одним из высокоинтенсивных методов удаления как свободной, так и связанной влаги является фильтрационная сушка. Это обусловлено тем, что при фильтрационной сушке тепловой агент фильтруется сквозь пористую структуру влажного материала. При фильтрационной сушке действительная скорость движения теплового агента относительно элементов слоя значительно выше, чем в случае сушки любыми другими методами. Большая поверхность тепло - и массообмена и скорость теплового агента в порах и каналах стационарного слоя влажного материала обеспечивают высокие коэффициенты тепло - и массоотдачи и соответственно интенсивность фильтрационной сушки.

Вместе с этим суммарные затраты энергии на процесс фильтрационной сушки состоят из потерь давления в стационарном слое и нагрева теплового агента (воздух) до заданной температуры. Учитывая выше сказанное важно установить зависимость потерь давления в стационарном слое влажного волокна хлопка от фиктивной скорости фильтрации теплового агента, как важного фактора определяющего интенсивность и экономическую эффективность фильтрационной сушки.

Поэтому использование фильтрационного способа при сушке хлопка сырца и экспериментальные, теоретические исследования гидродинамики, сокращение энергетических расходов, сохранение исходного качества хлопка – сырца является актуальной задачей при переработке хлопка и имеет большое значение для развития хлопкового кластера Республики Казахстан.

Предметом исследований явились гидродинамические закономерности, кинетика процесса сушки и тепло и массообмен при фильтрационной сушке хлопка – сырца.

Цель работы: разработка научных основ процесса фильтрационной сушки материалов волокнистой структуры, создание научно-обоснованных методов их расчета и проектирования и апробация полученных результатов в опытно-промышленных условиях с реализацией в промышленности.

Научная новизна исследования:

- исходя из определенной геометрической формы волокон хлопка-сырца и гидродинамических закономерностей фильтрации теплового агента через

стационарный слой волокнистых частиц неправильной формы установлено явление «усадки» под давлением напора теплового агента и получены уравнения для расчета поверхности, начальных и текущих удельных поверхностей волокон хлопка и эквивалентного диаметра пор и каналов;

- на основании зависимости Дарси-Вейсбаха выведена формула для расчета гидравлического сопротивления пористого стационарного слоя и получены уравнения для расчета коэффициента гидравлического сопротивления, учитывающие поверхность, начальные и текущие удельные поверхности и эквивалентный диаметр пор и каналов волокон хлопка-сырца;

- получены расчетные зависимости порозности слоя от фиктивной скорости теплового агента, коэффициента гидравлического сопротивления волокон хлопка и числа Эйлера от числа Рейнольдса на основании обобщения экспериментальных и теоретических данных степенной функции;

- установлены периоды полного и частичного насыщения теплового агента на основе исследования закономерностей фильтрации теплового агента через стационарный слой хлопка –сырца и обоснован механизм фильтрационной сушки;

-изучены закономерности кинетики фильтрационной сушки волокон хлопка-сырца в стационарном слое и рассчитана минимальная высота слоя, на которой тепловой агент полностью насыщается влагой, и определена ее зависимость от скорости фильтрации теплового агента;

-на основании теории подобия предложены критериальные зависимости чисел Нуссельта и Шервуда для определения коэффициентов теплоотдачи от теплового агента к слою сухих волокон хлопка-сырца и коэффициентов тепло- и массотдачи от теплового агента к влажному слою хлопка сырца при фильтрационной сушке.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что на основе теоретических и экспериментальных исследований закономерностей фильтрационной сушки научно обоснована методология расчета фильтрационной сушильной установки для сушки волокнистых материалов.

Практическая ценность. Разработана конструкция фильтрационной сушильной установки и предложен способ сушки хлопка сырца.

Разработаны методики расчета, рекомендации по проектированию и эксплуатации фильтрационных сушильных установок для сушки хлопка-сырца.

Публикации по теме исследования. По теме диссертации опубликованы 10 статей, из них 6 статей в материалах международных конференций, 1 статья в издании входящем в международную базу научных журналов SCOPUS (процентиль 29) , 3 статьи в журналах, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере образования и науки МОН РК. Материалы статей охватывают основное содержание диссертации.

Во введении дана оценка современному состоянию решаемой научной проблемы, основание и исходные данные для разработки темы, обоснование необходимости проведения научно-исследовательской работы, сведения о планируемом научно-техническом уровне разработки и метрологическом обеспечении диссертации, актуальность и новизна темы, связь данной работы с

другими научно-исследовательскими работами, цель, объект и предмет, задачи исследования, методологическая база, положения, выносимые на защиту, практическая ценность и апробация практических результатов.

В первом разделе проведен анализ существующих технологий сушки и типов оборудования, рассмотрены особенности сушки волокнистых материалов и разработки в области теории и практики фильтрационной сушки различных материалов, а также методики их расчета. Проанализированы качественные и количественные требования, предъявляемые к хлопку-сырцу при сушке. На основании проведенного анализа осуществлена постановка задач исследований.

Во втором разделе дано описание экспериментальной установки для исследования гидродинамических параметров, кинетики и тепломассообменных характеристик при фильтрационной сушке хлопка-сырца, приведено описание конструкций и принципа работы фильтрационной установки. Приведены методики экспериментального исследования пористой структуры, насыпной плотности, суммарной и удельной поверхности слоя волокон. Представлены результаты исследования хлопка сырца многоцелевым растровым электронным микроскопом, которые позволили определить геометрические характеристики волокон хлопка-сырца и температурные зависимости эффективных удельной изобарной теплоемкости C_p , коэффициента теплопроводности λ и коэффициента температуропроводности α хлопка-сырца и его компонентов.

Диапазон изменения режимных параметров в проводимых исследованиях: скорость теплового агента газа $w_r = 0,5 \div 2,5$ м/с; температура теплового агента $t_{\text{теп. аг.}} = 20 \div 100$ °С; высота стационарного слоя хлопка сырца $H_{\text{ст}} = 0,001 \div 0,011$ м; время проведения сушки составляла 90 – 120 с; потеря массы образца за время эксперимента составляла менее 0,2%, масса высушиваемого хлопка сырца $m = 0,1 \div 0,11$ кг.

В третьем разделе приведены результаты исследований гидродинамических характеристик фильтрационной сушки хлопка-сырца.

Как показали эксперименты, при движении теплового агента через стационарный слой под действием перепада давлений изменяется эквивалентный диаметр каналов, через которые движется тепловой агент, порозность слоя и соответственно действительная скорость теплового агента. Изменение действительной скорости фильтрации газового потока v приводит к росту потерь давления в слое ΔP , а высота слоя волокна хлопка H – к росту объемной плотности ρ_v (аналог насыпной плотности для дисперсных материалов). То есть: $H = f(\Delta P)$; $d_e = f(\Delta P)$; $\varepsilon = f(\Delta P)$; $\rho_v = f(\Delta P)$; $\Delta P = f(v)$. При этом постоянными величинами остаются лишь масса навески волокна и $G_v = \text{const}$ и внешняя поверхность всех волокон хлопка $F = \text{const}$.

Предполагая, что в экспериментальной емкости находится N одинаковых ворсинок длиной L_v , внешнюю поверхность всех волокон представили с учетом геометрической формы в виде:

$$F = 2 \cdot (a + b) \cdot L_v \cdot \frac{G_v}{\rho_v \cdot a \cdot b \cdot L_v} = \frac{2 \cdot (a + b) \cdot G_v}{\rho_v \cdot a \cdot b} \quad (1)$$

Определены начальные и текущие удельные поверхности условно стационарного слоя волокна хлопка, который находится в экспериментальной емкости, как отношение общей поверхности к объему:

$$S_0 = \frac{F}{S \cdot H_0} = \frac{2 \cdot (a+b) \cdot G_v}{\rho_v \cdot a \cdot b \cdot S \cdot H_0}, \quad (2)$$

соответственно, получили расчетную формулу текущей удельной поверхности:

$$S_{\text{тек}} = S_0 \cdot \frac{H_0}{H} = \frac{2 \cdot (a+b) \cdot G_v}{\rho_v \cdot a \cdot b \cdot S \cdot H} = \frac{2 \cdot (a+b) \cdot H_v \cdot S \cdot \rho_v}{\rho_v \cdot a \cdot b \cdot S \cdot H} = \frac{2 \cdot (a+b)}{a \cdot b} \cdot \frac{H_v}{H} \quad (3)$$

Для эквивалентного диаметра d_e пор и каналов, через которые фильтруется теплоноситель, с учетом (3) получено уравнение:

$$d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon_l}{S_{\text{тек}}} = \frac{2 \cdot a \cdot b \cdot \varepsilon_l}{(a+b)} \cdot \frac{H}{H_v}, \quad (4)$$

Для определения потери давления в пористом стационарном слое преобразовали известную зависимость Дарси-Вейсбаха, с учетом уравнения (4) и можно представить в виде:

$$\Delta P = \lambda_l \cdot \frac{H}{d_e} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} = \lambda_l \cdot \frac{H \cdot (a+b) \cdot H_v}{2 \cdot a \cdot b \cdot H \cdot \varepsilon_l} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} = \lambda_l \cdot \frac{(a+b) \cdot H_v}{2 \cdot a \cdot b \cdot \varepsilon_l} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (5)$$

где v_0 – фиктивная скорость фильтрования теплового агента $v_0 = v \cdot \varepsilon_l, \text{ м/с}$;

В уравнении (5) для расчета ξ – коэффициента гидравлического сопротивления пористого слоя получена формула:

$$\xi = \lambda_l \cdot \frac{(a+b) \cdot H_v}{2 \cdot a \cdot b \cdot \varepsilon_l}, \quad (6)$$

Аппроксимация экспериментальных данных степенной функцией позволила получить зависимость порозности слоя ε от фиктивной скорости v_0 теплового агента :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot v_0^{-0.025} \quad (7)$$

Обобщение экспериментальных данных гидродинамики фильтрации теплового агента сквозь слой хлопка представлены в виде зависимости безразмерного числа Эйлера и в виде зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса:

$$Eu = 84 \cdot 10^3 \cdot Re_e^{-1.18}, \quad (8)$$

$$\xi = 16 \cdot 10^4 \cdot Re_e^{-1.16} \quad (9)$$

В четвертом разделе приведены результаты исследований кинетических параметров и механизма фильтрационной сушки хлопка-сырца, установлено что с увеличением фиктивной скорости теплового агента начинает резко возрастать насыпная плотность хлопка -сырца, что приводит к значительному взаимному экранированию поверхности, большому росту неравномерности фильтрования и в конечном результате к увеличению времени сушки. Это непосредственно оказывает влияние на кинетику процесса фильтрационной сушки. Доказано, что скорость фильтрационной сушки мало зависит от высоты

слоя материала, исходя из этого рассчитана минимальная высота h_{\min} , на которой тепловой агент полностью насытится влагой.

Экспериментально установлено, что при фильтрационной сушке волокон хлопка-сырца в начале формируется фронт высотой h_{\min} . На этой высоте тепловой агент, фильтруясь сквозь пористую структуру влажного слоя волокнистого материала, отдает свое тепло материалу, а сам насыщается влагой. Если высота слоя является значительной, а влаги достаточно, то через некоторое время влагосодержание теплового агента достигает насыщения, вследствие этого его температура уменьшается до температуры мокрого термометра. В дальнейшем тепловой агент под действием перепада давления продолжает фильтроваться сквозь пористую структуру слоя, но участия в массообмене он уже не принимает.

Из приведенного нами механизма фильтрационной сушки установлено, что до достижения фронта массообмена перфорированной перегородки имеем полное насыщение теплового агента парами влаги. По достижении фронтом массообмена перфорированной перегородки количество влажного материала уменьшается, и тепловой агент лишь частично насыщается парами влаги. Аналогично, как и в первом случае, этот этап целесообразно назвать периодом частичного насыщения теплового агента.

В пятом разделе приведены результаты исследований тепломассообмена при сухом и влажном слое хлопка –сырца и на основе теорий подобия получены уравнения для расчета коэффициента теплоотдачи в сухом слое волокон хлопка-сырца в критериальной форме:

$$Nu = 6,6 \cdot 10^{-3} \cdot Re_{\text{экв}}^{1,17} \cdot Pr^{0,33}, \quad (10)$$

для влажного волокнистого материала число Нуссельта будет иметь вид:

$$Nu = 4,5 \cdot 10^{-2} \cdot Re_e^{0,1} \cdot Pr^{0,33}, \quad (11)$$

для расчета коэффициента массоотдачи число Шервуда:

$$Sh = 4,5 \cdot 10^{-2} \cdot Re_e^{0,1} \cdot Sc^{0,33} \quad (12)$$

Как видно из уравнений (11) и (12), для обоих случаев уравнение в безразмерных комплексах характеризуются одинаковыми показателями степени у числа Рейнольдса, что указывает на одинаковое влияние гидродинамики на эти коэффициенты.

Следует отметить, что для полностью увлажненной поверхности области тепло-и массообмена практически одинаковы, так что температура поверхности близка к температуре влажного термометра, для частично увлажненной поверхности эффективная площадь массообмена уменьшается с увеличением влажности поверхности.

Полученные результаты дают возможность прогнозировать значения чисел Нуссельта и Шервуда, а соответственно и рассчитать коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи при фильтрационной сушке волокон хлопка-сырца

с точностью $\pm 9,0\%$ в пределах изменения числа Рейнольдса ($10 \leq Re \leq 100$). Позволяют прогнозировать затраты тепловой энергии на процесс фильтрационной сушки волокнистого материала, эксплуатационные затраты на этапе ее проектирования и установить экономическую целесообразность применения фильтрационного метода сушки.

В шестом разделе приведены рекомендации по проектированию и внедрению фильтрационной сушильной установки при сушке хлопка-сырца.

Рекомендации по проектированию содержат сведения о выборе режимных и конструктивных параметров.

По результатам проведенных исследований разработана конструкция промышленной фильтрационной сушильной установки, которая внедрена на ТОО «Хлопкоперерабатывающий завод Мырзакент» в технологической схеме первичной переработки хлопка-сырца. При этом за счет снижения температуры сушильного теплового агента до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ снижен расход электроэнергии на 1 тонну перерабатываемого хлопка до 631,77 кВт·ч.

В заключении даны краткие выводы по результатам диссертационных исследований, оценка полноты решений поставленных задач, разработаны рекомендации и исходные данные по конкретному использованию результатов, дана оценка технико-экономической эффективности внедрения и научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области.

Условные обозначения:

a и b – средняя ширина и толщина ворсинок хлопка, соответственно, м; G_v – масса навески, кг; S – площадь поперечного сечения экспериментальной емкости, м^2 ; S_0 , $S_{\text{тек}}$ – начальные и текущие удельные поверхности слоя волокна, $\text{м}^2/\text{м}^3$; ρ_v – удельная плотность волокна хлопка, $\text{кг}/\text{м}^3$; H_v – высота слоя волокна с плотностью ρ_v , м; H – текущая высота слоя волокна, в зависимости от потерь давления, м; ε_l – порозность слоя, $\text{м}^3/\text{м}^3$; ΔP – потери давления в слое материала, Па; ρ – плотность газового потока, $\text{кг}/\text{м}^3$; v – действительная скорость движения газового потока, $\text{м}/\text{с}$. ν – коэффициент кинематической вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; $Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda}$ – число Нусельта; $Re_e = \frac{v \cdot d_e}{\nu}$ –

число Рейнольдса; $Pr = \frac{\nu}{a}$ – число Прандтля; $Sh = \frac{\beta \cdot d_3}{D}$ – число Шервуда;

$Sc = \frac{\nu}{D}$ – число Шмидта.