

УДК 677.027.162

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ СУШКИ СЛОЯ ЛЬНЯНОЙ ТРЕСТЫ

Ю.В.ВАСИЛЬЕВ, Н.В.КИСЕЛЁВ, Е.Л.ПАШИН

(Костромской государственной технологической университет)

E-mail: kstu-tplv@ya.ru

Предложена новая схема сушки стланцевой льняной тресты и модель этого процесса, протекающего в рабочей зоне сушильной машины.

The new scheme of the drying of a flax straw layer and the model of this process, proceeding in a working zone of a drying machine, is offered.

Ключевые слова: снижение затрат тепла, совершенствование оборудования, новая схема сушки, разработка способов моделирования, домены, входные и выходные данные.

Повышению энергоэффективности технологического оборудования в настоящее время придается первостепенное значение. Затраты тепловой энергии на килограмм испаренной влаги как обобщенный показатель энергоэффективности в сушильных машинах СКП-1-10ЛУ, СКП-1-10ЛУ1, СЛП-140-ЛС по паспортным данным превышают 5000 кДж/кг испаренной влаги [1], что более чем в 2 раза превосходит теоретический предел, равный удельной теплоте парообразования. Это заставляет искать пути снижения удельных затрат тепла за счет совершенствования оборудования и режимов сушки.

Для решения этой задачи целесообразна разработка способов моделирования изучаемого объекта и процесса с последующей экспериментальной проверкой конструктивных и технологических решений, полученных на базе анализа моделей.

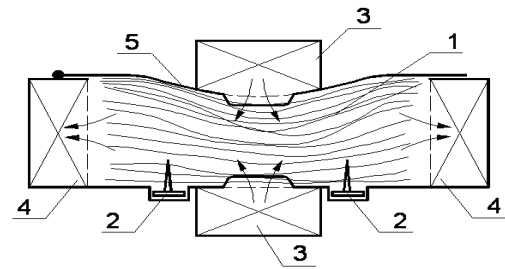


Рис. 1

Нами предлагается новая схема сушки стланцевой льняной тресты (рис. 1: 1 – слой стеблей, 2 – колковые транспортеры для перемещения слоя, 3 – воздуховоды для подачи теплоносителя, 4 – воздуховоды для отвода отработанного теплоносителя, 5 – крышка рабочей камеры) и модель этого процесса, протекающего в рабочей зоне. Использована схема подвода воздуха, сочетающая продольную продувку, дающую лучшие показатели по энергозатратам, с горизонтальным расположением слоя, удобного для сопряжения с мять-

но-трепальным агрегатом. При этом подвод воздуха в среднюю часть слоя обеспечивает ее ускоренную сушку и дифференциацию влажности по длине стебля с целью повышения выхода длинного волокна при последующей механической обработке. Модель разработана в среде CAE-системы ANSYS CFX 12.0 и учитывает основные геометрические характеристики объекта, параметры слоя материала и сушильного агента.

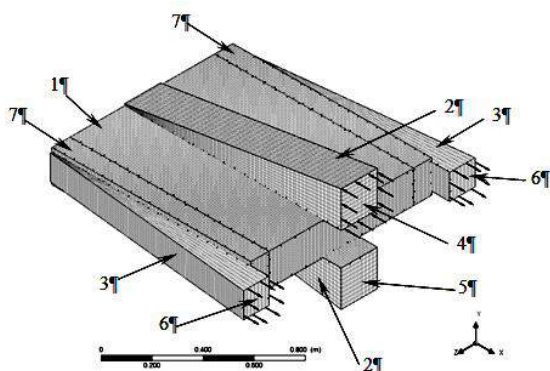


Рис. 2

Область моделирования (на рис. 2 представлена геометрия области моделирования с конечно-элементной сеткой: 1 – слой тресты (Porous Domain), 2 – подводящие воздухопроводы (Fluid Domain), 3 – отводящий воздухопровод (Fluid Domain), 4 – входное сечение (IN), 5 – входное сечение (IN1), 6 – выходное сечение (OUT), 7 – воздушная полость) представлена в виде доменов: слой тресты – как область пористого материала с распределенными свойствами (Porous Domain), воздухопроводы – как области жидкости (Fluid Domain). Геометрия секции предельно схематизирована.

В силу ограниченности вычислительных ресурсов персональных компьютеров прямое моделирование стеблевой структуры слоя тресты, не говоря уже о структуре самого стебля, в настоящее время невозможно. Поэтому (в соответствии с принципом гомогенизации) слой тресты рассматривался как пористая среда с распределенными параметрами, а для расчета массообмена использовались критериальные уравнения, полученные Н.Д. Хомуцким при экспериментальном изучении

сушки слоя льнотресты [2]. При этом полагалось, что эти уравнения справедливы и для отдельного элемента слоя, что дает возможность учесть различия в интенсивности массообмена, связанные, в частности, с неравномерностью поля скоростей сушильного агента и изменением параметров его при прохождении через слой тресты.

Для учета массообмена в слое создан субдомен, в котором введена дополнительная переменная $W_{\text{лага}}$ [кг/м³], представляющая массу влаги в единице объема слоя. Для нее в пределах субдомена решается уравнение чисто диффузионного переноса с небольшим коэффициентом диффузии, так как диффузионный перенос влаги в самой тресте не является объектом изучения.

В модели использованы следующие материалы: Gas (смесь газов переменного состава (Variable Composition Mixture), который состоит из воздуха (Air Ideal Gas) и водяного пара (Wate). Массовая доля пара в смеси M участвует в расчете как внутренняя переменная ANSYS CFX. Влагосодержание воздуха введено внешней переменной d и рассчитывается как

$$d = M / (1 - M). \quad (1)$$

Компонент Wate представлен как смесь постоянного состава (Fixed Composition Mixture), состоящая из одного компонента (Water Ideal Gas) с массовой долей 1. Для компонента Wate в области моделирования решается общее уравнение конвективно-диффузионного переноса, коэффициент диффузии пара в воздухе вычислялся по формуле [1, с.76]:

$$D_k = D_0 \left(\frac{T_{\text{cp}}}{273} \right)^2,$$

где D_0 – коэффициент диффузии пара при 0°C и нормальном барометрическом давлении $P_0 = 101,4$ кПа; при испарении воды в воздух $D_0 = 2,2 \cdot 10^{-5}$ м²/с.

Физические свойства воздуха и пара взяты из встроенной базы данных мате-

риалов. Для моделирования турбулентного течения использована модель RNG k-epsilon, являющаяся обобщением стандартной модели.

Пористость слоя тресты рассчитывается как $1 - P_y / \beta_c$, где P_y – объемная плотность загрузки, $\text{кг}/\text{м}^3$; β_c – тяжеловесность стеблей тресты, $\text{кг}/\text{м}^3$. Проницаемость слоя может задаваться внешней функцией, зависящей от координат для учета неоднородности фильтрационных свойств по разным направлениям.

В субдомене вводились источниковые члены уравнения переноса. Источник Wate.mf (массовая доля пара в воздухе), характеризующий удельную объемную скорость испарения $m[\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})]$, задавался с учетом [2, (2)]:

$$m = \frac{\text{Nu}' P_v D_k (C_n - \rho M) \cdot 4 \cdot 101300}{(p + 101300) d_3 \beta_c d_{cp}},$$

где Nu' – диффузионное число Нуссельта; p – избыточное давление в данной точке слоя; C_n – плотность водяного пара в воздухе при насыщении; аппроксимировалась формулой $C_n = \rho 8,6658 \cdot 10^{-9} \exp(0,0497393T)$ по данным [1, прил.1]; ρ – плотность смеси газов.

Диффузионный критерий Нуссельта рассчитывался по формуле [2, (1)]:

$$\text{Nu}' = 0,57 \psi \text{Re} \text{Pr}_d^{0,33} D_3 / H_c, \quad (2)$$

где ψ – безразмерная относительная скорость сушки [4]:

$$\psi = \frac{(w_{\text{тек}} - w_{\text{равн}})^{0,9}}{0,462 + 0,68(w_{\text{тек}} - w_{\text{равн}})^{0,9}};$$

Re – число Рейнольдса: $\text{Re} = \frac{\omega_{\text{сл}} D_3}{\nu}$; Pr_d –

диффузионное число Прандтля: $\text{Pr}_d = \frac{\nu}{D_k}$;

D_3 – гидравлический диаметр слоя: $D_3 = 4S/P$.

Здесь $S = ab$, $P = \pi d_{cp} n$; $n = 4ab P_y / (\beta_c \pi d_{cp})$; (ab – площадь сечения слоя перпендикулярно стеблям%; P – смоченный периметр;

n – число стеблей в сечении; d_{cp} – текущий диаметр стебля; $H_{\text{ст}}$ – длина стебля), окончательно $D_3 = \beta_c d_{cp} / P_y$; H_c – высота слоя, при продольном течении воздуха $H_c = H_{\text{ст}}$, если слой состоит из одного стебля по длине; $w_{\text{тек}}$ – текущая влажность тресты в данной точке слоя; $w_{\text{равн}}$ – равновесная влажность тресты, соответствующая влажности воздуха в данной точке слоя, по данным [3] аппроксимировалась функцией $w_{\text{равн}} = 0,001113 \exp(5,05542\phi) + 0,0708165$, где ϕ – относительная влажность воздуха; $\omega_{\text{сл}}$ – средняя скорость воздуха в слое; ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха.

Для относительной скорости сушки использована формула Г.К.Филоненко с эмпирическими коэффициентами Н.Д.Хомуцкого, определенными для льнотресты моченцовой при вертикальном слое, так как фильтрация воздуха в модели идет преимущественно вдоль стеблей [4, с.47.]

Относительная влажность воздуха рассчитывалась по известной формуле:

$$\phi = \frac{d(p + 101300)p_{\text{нас}}}{d + 0,622},$$

где $p_{\text{нас}}$ – давление насыщенных паров воды, определяемое по эмпирической формуле [5]:

$$p_{\text{нас}} = 1000 \exp \left(\frac{(16,57(T-273,15) - 115,72)}{(233,77 + 0,997(T-273,15))} \right).$$

В субдомене вводился также источниковый член, учитывающий изменение концентрации влаги в слое за единицу времени за счет испарения и задаваемый внешней функцией m_w :

$$m_w = -m \rho.$$

Таким образом, при сушке изменение влажности материала за единицу времени пропорционально интенсивности изменения массовой доли влаги в воздухе с обратным знаком.

Поглощение энергии сушильного агента для указанного субдомена при испаре-

нии влаги учтено источниковым членом в уравнении энергии, представленным внешней функцией E_n , выражающей изменение энергии единицы объема за единицу времени:

$$E_n = -mr.$$

Здесь r – удельная теплота парообразования при атмосферном давлении, Дж/кг.

Влияние испаренной в слое влаги на движение воздуха учитывалось заданием источникового члена в уравнении сохранения массы, равного вышеуказанной внешней переменной m , влияние испарившейся влаги на импульс и параметры турбулентности воздуха не вводились за малостью данных эффектов. Сжимаемость воздуха, теплота трения и вклад свободной конвекции также не учитывались.

Для оценки потребления тепловой энергии при сушке энтальпии воздуха на входе (i_{in}) и выходе (i_{out}) из зоны сушки определялись внешними функциями по формулам [6, (426)]:

$$i_{in} = 1000(t_{in} + (2500 + 1,96t_{in})d_{in}),$$

$$i_{out} = 1000(t_{out} + (2500 + 1,96t_{out})d_{out}),$$

где $t_{in} = \text{const}$ – температура по Цельсию на входе в зону сушки; t_{out} – средняя по сечению температура по Цельсию на выходе из зоны; d_{in}, d_{out} – влагосодержание воздуха на входе и выходе их зоны сушки.

В свою очередь, массовые доли влаги на входе и выходе из зоны сушки определялись через внутренние переменные с CEL-функциями ANSYS CFX усреднения по сечению:

$$M_{in} = \text{areaAve}(M)@IN,$$

или

$$\text{areaAve}(M)@IN1,$$

в зависимости от того, куда подается горячий воздух;

$$M_{out} = \text{areaAve}(M)@OUT.$$

Массовая доля влаги на входе в зону сушки M_0 на каждом временном слое определялась с учетом рециркуляции сушильного агента. При смешении возвратного и свежего воздуха на входе в калорифер с учетом, что при нагреве влагосодержание не меняется, имеем [6, с.172]:

$$d_{in} = (m_1 d_{out} + m_2 d_{atm}) / (m_1 + m_2),$$

где m_1, m_2 – массовые расходы возвратного и свежего воздуха соответственно.

При этом степень рециркуляции $n_{recirc} = m_1 / m_2$. Переходя от влагосодержания к массовым долям по формуле (1) и исключая m_1 и m_2 , после преобразований получаем:

$$M_0 = 1 / (1 + (n_{recirc} + 1) / (n_{recirc} M_{out} / (1 - M_{out}) + M_{atm} / (1 - M_{atm}))),$$

где M_{atm} – массовая доля влаги в атмосферном воздухе.

Изменения полных энтальпий воздуха за единицу времени на входе и выходе из калорифера с учетом рециркуляции определялись из следующих соотношений. Для воздуха, выходящего из калорифера (и входящего в зону сушки):

$$I_{кал\ out} = i_{in}(m_1 + m_2) = i_{in}G.$$

Для входящего воздуха:

$$I_{кал\ in} = i_{out}m_1 + i_{atm}m_2.$$

Исключая m_1 и m_2 , получим:

$$I_{кал\ in} = i_{out}n_{recirc} / (1 + n_{recirc})G + i_{atm}G / (n_{recirc} + 1),$$

где $G = \text{massFlow}()@OUT$ – CEL-функция, определяющая массовый расход в выходных сечениях OUT, а при условии сохранения массы также и во входном (IN, IN1) сечениях; i_{atm} – энтальпия атмосферного воздуха.

По разности изменений полных энтальпий находится необходимая тепловая мощность калорифера и рассчитывается потребление тепла на килограмм испарен-

ной влаги, что позволяет оценивать энергоэффективность режимов сушки.

Полезная мощность вентилятора рассчитывается как произведение объемного расхода воздуха на избыточное давление во входных сечениях.

Имеется возможность управлять потоками сушильного агента путем изменения граничных условий в сечениях IN, IN1, OUT, в том числе заданием зависимости скорости воздуха или давления в этих сечениях от времени процесса.

Входными данными для модели являются:

- температура атмосферного воздуха и массовая доля влаги в нем;

- температура сушильного агента на входе в зону сушки;

- скорость воздуха во входных сечениях воздухопроводов;

- длина стебля тресты и закон изменения его диаметра по длине;

- объемная плотность загрузки тресты, ее начальная влажность;

- законы изменения проницаемости слоя в направлении осей стеблей и по нормали к нему;

- степень рециркуляции воздуха в зоне сушки;

- период переключения потока воздуха между входными сечениями;

- геометрия области течения (слоя тресты и воздухопроводов).

Выходные данные модели:

- время сушки тресты до равновесной влажности;

- кривая сушки слоя в целом или любого элемента в окрестности заданной точки;

- распределение параметров воздуха в области слоя в любой момент времени;

- распределение влажности тресты в слое в любой момент времени;

- затраты тепла и электроэнергии на сушку, суммарные, удельные, изменение их в ходе сушки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сумётов В.А.* Сушка и увлажнение лубоволокнистых материалов.– М.: Легкая индустрия, 1980.

2. *Хомуцкий Н.Д.* Критериальные уравнения массообмена для тонких лубоволокнистых материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1964, №5. С.27

3. Справочник по заводской первичной обработке льна /Под общ. ред. В.Н.Храмцова.– М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. С.485.

4. *Хомуцкий Н.Д.* Относительная скорость сушки тонких лубоволокнистых материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1963, №2. С.48.

5. Справочное пособие. Влажный воздух. НП "АВОК". [Электронный ресурс] <http://www.complexdoc.ru/ntdtext/546141>.

6. *Техническая термодинамика / Под ред. В.И. Крутова.– М.: Высшая школа, 1981. С.167.*

Рекомендована кафедрой технологии производства льняного волокна. Поступила 04.06.10.