

УДК 519.688:674.047.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В СУШИЛЬНОЙ КАМЕРЕ

канд. техн. наук, доц. А.Л. АДАМОВИЧ; А.С. ЛАПЕЗО; Т.А. ХОМЧЕНКО  
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается движение воздушного потока в сушильной камере. Приведены системы уравнений с начальными и граничными условиями, описывающие ламинарные и турбулентные течения. На основе уравнений турбулентного течения воздуха проведено численное моделирование потока воздуха в сушильной камере в широком диапазоне значений расхода воздуха, нагнетаемого в камеру сушки. Проанализированы результаты моделирования, представляющие распределение скоростей воздушного потока в камере, профили скоростей потока над объектом сушки. Предложены конструктивные решения для увеличения равномерности движения воздуха у поверхности объекта сушки.

**Введение.** Расчет движения воздуха необходим при проектировании и оптимизации сушильных камер и систем вентиляции. В частности, скорость и качество сушки пиломатериалов и ее равномерность в значительной степени зависят от направления, величины и однородности скорости воздушного потока у поверхности. Закономерности испарения воды со свободной поверхности определяются физическими условиями на границе раздела двух фаз «воздух – вода». Установлено что скорость испарения воды в воздух пропорциональна разности давлений водяного пара у поверхности воды  $p_n$  и в окружающей среде  $p_n$ . Давление пара у поверхности воды соответствует его давлению в состоянии насыщения при температуре воды. Интенсивность испарения  $I$ , кг/(м<sup>2</sup>ч), воды при нормальном барометрическом давлении приближенно можно оценить по формуле Дальтона [1]:

$$I = c \cdot (p_n - p_n), \quad (1)$$

где  $c$  – коэффициент испарения, учитывающий скорость воздуха и его направление у поверхности.

При параллельном направлении воздушного потока к испаряемой водной поверхности и его температуре в диапазоне 60...250 °С коэффициент  $c$  приближенно равен

$$c = 0,1 \cdot (0,0017 + 0,0013 \cdot v), \quad (2)$$

где  $v$  – скорость воздуха у поверхности, м/с.

Стоит отметить, что при направлении воздушного потока, перпендикулярном к поверхности, интенсивность испарения удваивается.

При высокоскоростных способах сушки, таких как сушка энергией ВЧ- или СВЧ-полем, радиационная и вакуумная сушка, имеет место интенсивное испарение влаги с поверхности материала, которая удаляется движущимся воздухом – сушильным агентом. Очевидно, что при данных способах сушки к равномерности движения воздуха предъявляются повышенные требования.

Задачами данной работы являются: провести математическое моделирование, исследовать и выявить особенности движения воздуха в сушильной камере, при этом определить конструктивные решения по обеспечению равномерности воздушного потока у поверхности объекта сушки

**Основная часть.** Макет сушильной камеры представляет собой параллелепипед с размерами 600×600×1000 мм, выполненный из листового металла.

В верхней части камеры располагаются щелевые излучатели для ввода энергии СВЧ-поля, внизу – поддон для размещения высушиваемых материалов. Объект сушки задавался в виде пластины с размерами 400×50 мм, расстояние от него до поддона принималось равным четверти длины волны СВЧ-поля, составляющей 30 мм.

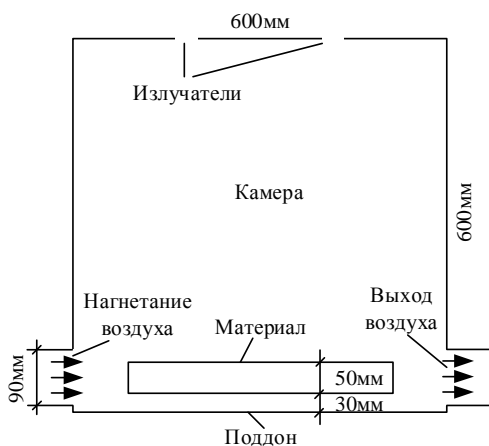


Рисунок 1 – Геометрия моделирования

**Математическая модель.** Для расчета движения воздуха применяются системы уравнений Навье – Стокса [1]. Для ламинарного течения несжимаемой среды система уравнений имеет вид:

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pl + \mu(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F, \quad (3)$$

$$\rho \nabla \cdot u = 0.$$

В формуле (3)  $u$  – скорость воздуха, м/с;  $p$  – давление воздуха, Па;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с.

Граничные условия для нагнетания, стока воздуха и на стенке соответственно определяются по формулам:

$$\begin{aligned} u = -U_0 \mathbf{n}, \quad \mathbf{n}^T \left[ -pl + \mu (\nabla u + (\nabla u)^T) \right] \mathbf{n} = -p_0, \quad u = 0, \\ u \cdot \mathbf{t} = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $U_0$  – скорость нагнетаемого воздуха на границе нагнетания, м/с;  $p_0$  – давление воздуха на границе стока, Па;  $\mathbf{n}$  – единичный вектор нормали к границе.

Для моделирования турбулентных течений с высокими числами Рейнольдса используют стандартную модель типа « $k - \varepsilon$ » [2–8], в которой совместно с уравнением Навье – Стокса решается два дополнительных дифференциальных уравнения переноса для осредненных пульсационных характеристик, через которые затем выражается коэффициент турбулентной вязкости  $\mu_T$ . Эти дополнительные уравнения составляют так называемую стандартную высокорейнольдсовую модель турбулентности Сполдинга – Лаундера. Для определения турбулентной вязкости в этой модели определяются два скалярных параметра: удельная кинетическая энергия турбулентности  $k$  и скорость вязкой диссипации энергии турбулентности  $\varepsilon$ . Данная система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} \rho(u \cdot \nabla) u &= \nabla \cdot \left[ -pl + (\mu + \mu_T) (\nabla u + (\nabla u)^T) \right] + F, \\ \rho \nabla \cdot (u) &= 0, \\ \rho(u \cdot \nabla) k &= \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + p_k - \rho \varepsilon, \\ \rho(u \cdot \nabla) \varepsilon &= \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} p_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} p_k, \\ \mu_T &= \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad p_k = \mu_T \left[ \nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T) \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  – безразмерные эмпирические константы ( $C_{\varepsilon 1} = 1,44$ ,  $C_{\varepsilon 2} = 1,92$ ,  $C_\mu = 0,09$ ,  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ );  $k$  – турбулентная кинетическая энергия, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  – скорость вязкой диссипации турбулентной кинетической энергии, м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>;  $\mu_T$  – турбулентная динамическая вязкость воздуха, Па·с;  $p_k$  – скорость образования вихрей.

Граничные условия:

- для нагнетания воздуха

$$u = -U_0 \mathbf{n}, \quad k = \frac{3}{2} (U_0 \cdot I_T)^2, \quad \varepsilon = C_\mu^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{L_T}; \quad (6)$$

- для стока воздуха

$$\begin{aligned} \mathbf{n}^T \left[ -pl + (\mu + \mu_T) (\nabla u + (\nabla u)^T) \right] \mathbf{n} &= -p_0, \\ u \cdot \mathbf{t} &= 0, \\ \nabla k \cdot \mathbf{n} &= 0 \quad \nabla \varepsilon \cdot \mathbf{n} = 0; \end{aligned} \quad (7)$$

- на стенке (пристенная функция)

$$\begin{aligned} u \cdot \mathbf{n} &= 0, \\ \left[ (\mu + \mu_T) (\nabla u + (\nabla u)^T) \right] \mathbf{n} &= -\rho \frac{u_\tau}{\delta_w^+} u_{\text{tang}}, \quad u_{\text{tang}} = u - (u \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n}, \\ \nabla k \cdot \mathbf{n} &= 0, \quad \varepsilon = \rho \cdot \frac{C_\mu k^2}{\kappa_w \delta_w^+ \mu}. \end{aligned} \quad (8)$$

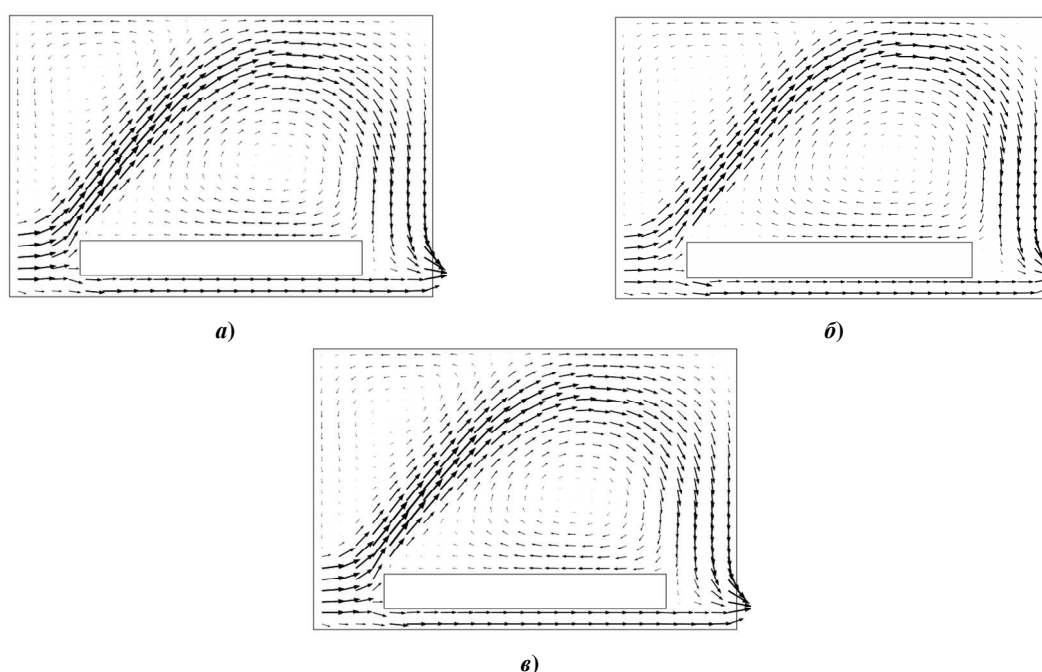
**Моделирование.** Моделирование проводилось с применением модели течения воздуха типа « $k - \epsilon$ », с использованием пакетов прикладных программ, обеспечивающих численное решение системы дифференциальных уравнений в частных производных в двумерной области методом конечных элементов. Принималось, что физические параметры воздуха не зависят от температуры, давления и скорости воздуха: динамическая вязкость воздуха  $\mu = 18 \cdot 10^{-6}$  Па·с; плотность воздуха  $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>. В процессе моделирования значение расхода воздуха  $Q$  на границе нагнетания воздуха в камеру варьировалось в широких пределах – от 0,1 до 5000 м<sup>3</sup>/ч, причем скорость воздуха на границе  $u_0$  и расход воздуха  $Q$  связаны соотношением:

$$u_0 = \frac{Q}{L}, \quad (9)$$

где  $L$  – сечение границы нагнетания воздуха, м<sup>2</sup>.

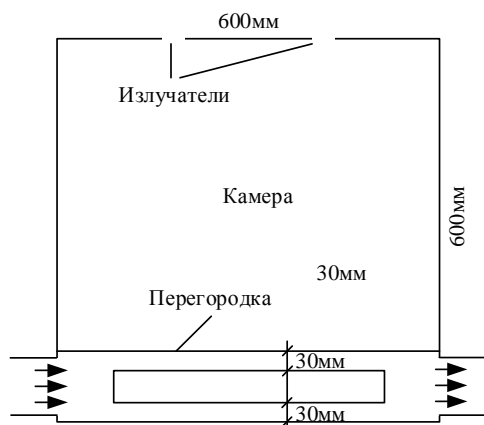
На границе стока воздуха давление  $p_0$  принималось равным нулю. Референсное значение давления воздуха принималось равным атмосферному.

В результате моделирования получены векторные распределения скоростей воздуха в камере, которые для некоторых значений расхода приведены на рисунке 2.



**Рисунок 2 – Распределение скорости воздуха в камере при расходах  $Q$  нагнетаемого воздуха: 30 м<sup>3</sup>/ч (а); 100 м<sup>3</sup>/ч (б); 600 м<sup>3</sup>/ч (в)**

Из рисунка 2 видно, что при любых расходах нагнетаемого воздуха его движение с разных сторон объекта сушки крайне неодинаково. С одной стороны объекта есть зона нулевой скорости воздуха, а также видно образование вихря и движение воздуха в обратном направлении. Со стороны поддона по всей длине объекта сушки движение воздуха равномерное.



**Рисунок 3 – Геометрия моделирования**

Очевидно, что данное распределение скоростей связано с геометрией камеры. Для исключения данного эффекта предлагается установить перегородку из прозрачного для СВЧ-поля материала над объектом сушки, как показано на рисунке 3.

На рисунке 4 показаны результаты моделирования – распределение скоростей воздушного потока при некоторых значениях расхода  $Q$  нагнетаемого в камеру воздуха. Движение воздуха у поверхностей образца одинаково и более однородно, чем в предыдущем случае (см. рис. 2), что видно из рисунка 4. Однако при большем расходе и, соответственно, больших скоростях воздуха наблюдается завихрение у поверхности образца вблизи торцевых участков, как показано на рисунке 5.

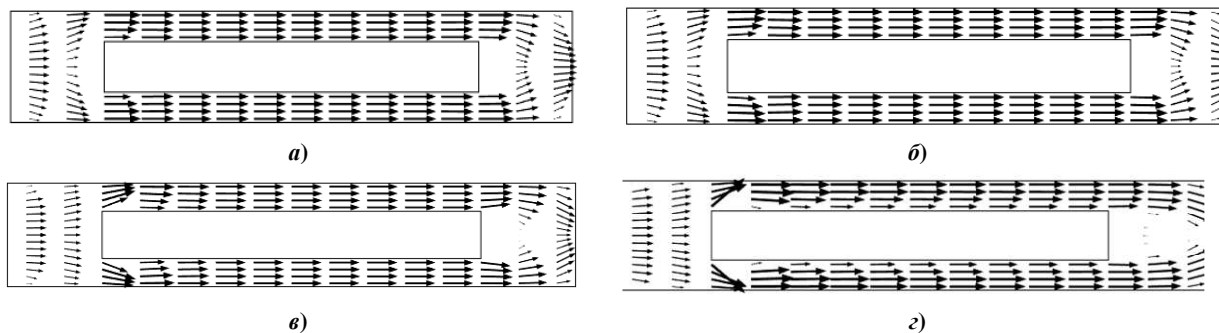


Рисунок 4 – Распределение скорости воздуха при различном расходе  $Q$ :  $0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$  (а);  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$  (б),  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$  (в);  $5000 \text{ м}^3/\text{ч}$  (г)

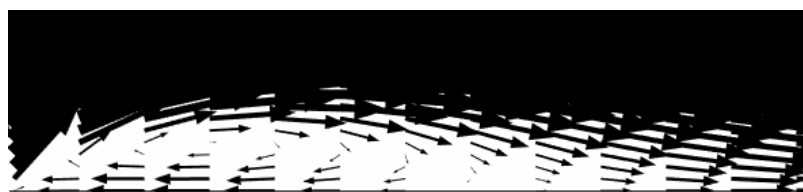


Рисунок 5 – Распределение скорости воздуха в начальной зоне при  $Q = 80 \text{ м}^3/\text{ч}$

Для устранения эффекта, проиллюстрированного рисунком 5, предлагается разбить границу нагнетания и стока воздуха на две зоны, как показано на рисунке 6.

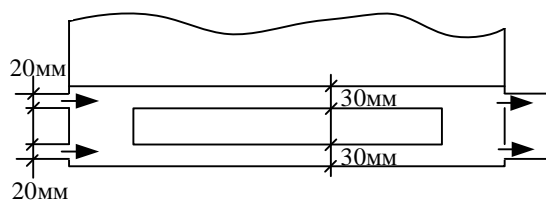


Рисунок 6 – Геометрия моделирования

Для данной геометрии в результате моделирования получено распределение скорости воздушного потока (рис. 7).

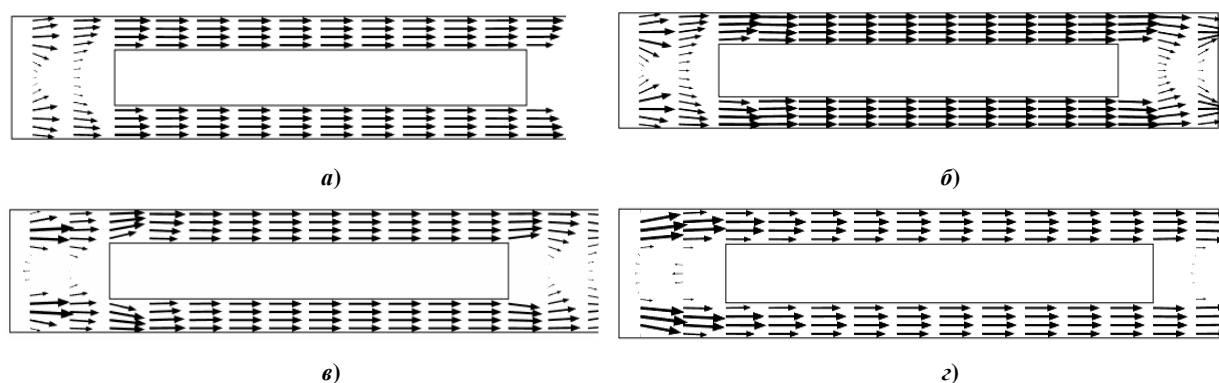
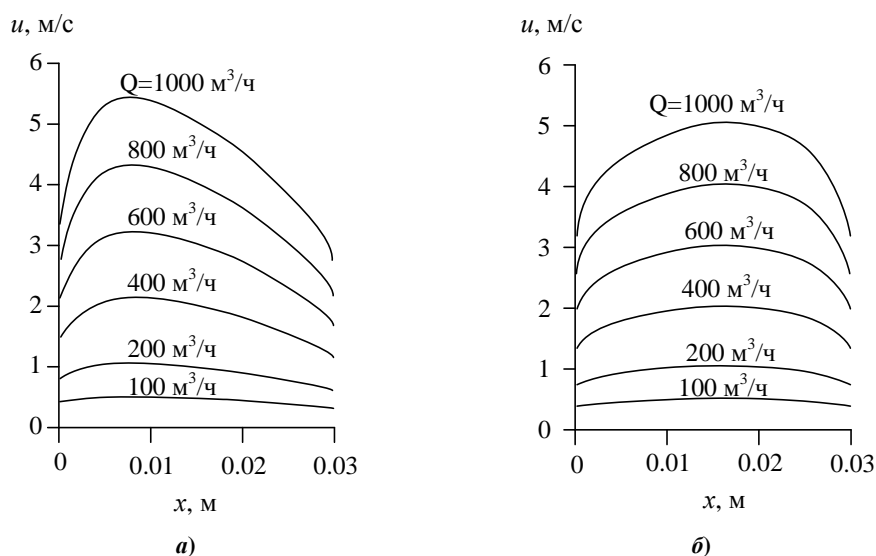


Рисунок 7 – Распределение скорости воздуха при расходе  $0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$  (а),  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$  (б),  $5 \text{ м}^3/\text{ч}$  (в),  $5000 \text{ м}^3/\text{ч}$  (г)

Как видно, принятые конструктивные изменения значительно повысили равномерность движения воздуха у поверхности объекта сушки в широком диапазоне скоростей нагнетаемого воздушного потока.

Для сравнения, на рисунке 8 представлены профили скоростей воздуха над поверхностью объекта сушки в диапазоне расхода  $Q$  от 100 до 1000  $\text{м}^3/\text{ч}$ .



*а* – для геометрии камеры, показанной на рисунке 3; *б* – на рисунке 6

**Рисунок 8 – Распределение скорости воздуха над поверхностью объекта сушки**

**Заключение.** В результате проведенного численного моделирования движения воздушного потока в камере сушки на основе законов течения потоков получено распределение скоростей движения воздуха. Для получения равномерного потока вдоль поверхности объекта сушки предложено использовать перегородку из материала, прозрачного к распространению СВЧ-поля, а также разделение области нагнетания и области стока воздуха на два участка.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кречетов, И.В. Сушка древесины / И.В. Кречетов. – М.: Лесная промышленность, 1980. – 432 с.
2. Ландау, Л.Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1986. – 736 с.
3. Методы расчета турбулентных течений / под ред. В. Колльмана. – М.: Мир, 1984. – 464 с.
4. Гинзбург, И.П. Аэрогазодинамика / И.П. Гинзбург. – М.: Высш. шк., 1966. – 404 с.
5. A new  $k - \omega$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows – Model development and validation / Т.-Н. Shih [et al.] // Computers fluids. – 1995. – № 24(3). – P. 227–238.
6. Launder, B.E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence / B.E. Launder, D.B. Spalding. – London: Academic Press, 1972. – 169 p.
7. Durbin, P.A. Statical theory and modeling for turbulent flows / P.A. Durbin, B.A.P. Reif. – United Kingdom: John Wiley and Sons, West Sussex, 2011. – 357 p.
8. Saad, T. Turbulence modeling for beginners / T. Saad // University of Tennessee space institute [Electronic resource]. – 2010. – Mode of access: [http://www.cfd-online.com/W/images/3/31/Turbulence\\_Modeling\\_For\\_Beginners.pdf](http://www.cfd-online.com/W/images/3/31/Turbulence_Modeling_For_Beginners.pdf). – Date of access: 07.11.2015.

Поступила 03.12.2015

#### SIMULATION OF AIR FLOW IN THE DRYING CHAMBER

**A. ADAMOVICH, A. LAPEZO, T. HOMCHENKO**

*The systems of the equations with entry and boundary conditions describing laminar and turbulent flows are given. On the basis of the equations of turbulent flow of air numerical modeling of a stream of air in the drying camera in the wide range of values of a consumption of the air forced in the drying camera is carried out. The results of modeling representing distribution of speeds of an air stream in the camera, profiles of speeds of a stream over object of drying are analysed. Constructive solutions for increase in uniformity of the movement of air at a surface of object of drying are proposed.*