

**ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН**  
**POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER**

УДК 519.6:536:539  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-424-434>

Поступила в редакцию 23.11.2017  
Received 23.11.2017

**В. А. Сычевский**

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,  
Минск, Беларусь*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ**

**Аннотация.** Представлен расчет технологического процесса сушки пиломатериалов в конвективных сушильных установках периодического действия. Для этого разработана трехмерная геометрическая модель сушильной камеры со штабелем из пиломатериалов. Записана физико-математическая модель процессов тепло- и массопереноса как в сушильном агенте, так и в штабеле. Учет трехмерной геометрии задачи осуществлялся путем использования пакета Ansys Fluent. Описание процессов массопереноса в древесине производилось на основе технологий пользовательской функции (User-Defined Function) и пользовательского скаляра (User-Defined Scalar). Приведен результат расчета конкретного технологического режима сушки штабеля из пиломатериалов сосны, который позволил найти детальные пространственные распределения и временные изменения полей температуры и влажности для сушильного агента и древесины. На основе полученных данных построены графики изменения во времени средних величин. Нелинейность и взаимосвязанность процессов тепло- и массопереноса в конвективной сушильной установке приводят к неустойчивости процесса сушки. Так, на этапе прогрева не удастся избежать удаления влаги из пиломатериалов. На этапах сушки неустойчивость приводит к колебательному характеру изменения температуры, массовой доли пара и относительной влажности воздуха в зазорах между пиломатериалами при интенсивном подводе тепла. Поэтому необходимо принимать дополнительные меры по сохранению параметров сушильного агента постоянными на этапах сушки. Полученные результаты могут использоваться для проектирования сушильных установок и разработки режимов сушки пиломатериалов на основе математического моделирования и вычислительного эксперимента.

**Ключевые слова:** деревообработка, сушильные установки, пиломатериалы, численное моделирование и вычислительный эксперимент, режимы сушки, тепло- и массообмен

**Для цитирования.** Сычевский, А. В. Моделирование технологического процесса конвективной сушки пиломатериалов / А. В. Сычевский // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 424–434. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-424-434>

**V. A. Sychevskii**

*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**MODELING OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF CONVECTIVE DRYING OF LUMBER**

**Abstract.** A calculation of the technological process of lumber drying in convection drying chamber of periodic action is presented. For this purpose, a three-dimensional geometric model of a drying chamber with a lumber pile is developed. A physico-mathematical model describing the processes of heat and mass transfer both in the drying agent and in the stack is presented. The three-dimensional geometry of the problem was taken into account by using the Ansys Fluent package. The process of mass transfer in wood was described on the basis of User-Defined Function and User-Defined Scalar. The result of calculation of a specific technological regime of drying of stack from pine sawn timber is given, which allowed finding detailed spatial distributions and temporary changes of the temperature and humidity fields for the drying agent and wood. On their basis, graphs of the time variation of the mean values are plotted. The nonlinearity and interrelationship of the processes of heat and mass transfer in a convective drying chamber leads to unsteadiness of the drying process. So, during the warm-up stage, it is not possible to avoid moisture removal from the lumber. At the drying stages, the unsteadiness leads

to an oscillatory character of changes of the temperature, the mass fraction of vapour and the relative humidity of air in the gaps between the wood boards at the intensive heat input. Therefore, it is necessary to take additional procedures to keep the drying agent parameters constant at the drying stages. The obtained results can be used for the design of drying chambers and the development of drying regimes of lumber based on the mathematical modeling and computational experiment.

**Keywords:** woodworking, drying chamber, lumber, numerical simulation and computational experiment, regimes of drying, heat and mass transfer

**For citation.** Sychevskii V. A. Modeling of the technological process of convective drying of lumber. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 4, pp. 424–434 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-424-434>

**Введение.** Деревообработка является важной промышленной отраслью Республики Беларусь. Главным направлением повышения эффективности деревообрабатывающего производства выступает рациональное использование древесного сырья с целью получения наибольшего количества качественной продукции. В качестве одного из важных этапов обработки древесины можно назвать сушку [1–5]. Древесина должна быть высушена до необходимой влажности, без внутренних напряжений, кручений и деформаций. Сушка во многом определяет качество получаемых пиломатериалов и изделий из древесины. Существенное место в деревообработке занимает производительность сушильных установок. Однако качество и производительность во многом являются взаимоисключающими параметрами. Качественно можно высушить древесину при мягких режимах сушки, но при этом процесс будет длительным. Высушить быстро древесину можно при жестких режимах сушки, однако древесина коробится и трескается [6–8]. Поэтому необходимо развивать новые технологии сушки, основанные на детальном изучении процессов тепло- и массопереноса в штабелях пиломатериалов и сушильном агенте, что позволит найти оптимальное соотношение качества и производительности.

При проектировании сушильных установок конвективного типа проводится тепловой расчет на основе интегральных законов сохранения массы и энергии, где определяется количество удаляемой влаги, расход воздуха и энергии на сушку [5, 6, 9–11]. Также выполняется аэродинамический расчет полного сопротивления сушильной установки. На основе такого расчета задаются мощности калорифера и вентилятора. Однако данный расчет является грубым. Полученные значения искомых величин могут в несколько раз отличаться от действительно необходимых. Такое положение вещей связано не только с сугубо приближенным характером самой методики, но и с тем, что интенсивность тепло- и массопереноса может измениться на несколько порядков в процессе сушки. Так, плотность потока массы может меняться в пределах от  $9 \cdot 10^{-4}$  до  $8 \cdot 10^{-7}$  кг/(м<sup>2</sup>·с). Расчет всегда ведется по максимальным значениям параметров. Еще одним существенным недостатком такого подхода является отсутствие детальной информации о величинах скорости, температуры, влажности и влагосодержания в сушильной камере, не говоря уже о напряженно-деформированном состоянии материала. Это не позволяет составить точную картину протекающих процессов аэродинамики, тепло- и массопереноса.

В связи с этим необходимо разрабатывать новые способы расчета сушильных установок. В то же время характеристики оборудования, используемые в сушильных установках, влияют на технологический процесс сушки, и наоборот. Поэтому моделирование и расчет технологического процесса сушки следует осуществлять на основе численного моделирования и вычислительного эксперимента с использованием современных компьютерных технологий, что позволяет одновременно определять как параметры режима сушки, так и параметры используемого оборудования. Существенным достоинством такого подхода является значительное снижение финансовых и материальных затрат на разработку режимов сушки и оборудования.

**Геометрическая модель.** Сушильная установка представляет собой прямоугольную камеру, состоящую из стен, потолка и пола, которые тепло- и теплоизолированы от окружающей среды (рис. 1). Для организации конвективного тепло- и массообмена внутри камеры размещен вентилятор, обеспечивающий необходимую скорость сушильного агента. Для интенсификации процесса массообмена сушильный агент и древесину нагревают. С этой целью в камере ставят калорифер. Воздух, прежде чем попасть в штабель, разгоняется вентилятором и проходит через калорифер, где его температура повышается. Двигаясь через штабель, уже подогретый воздух

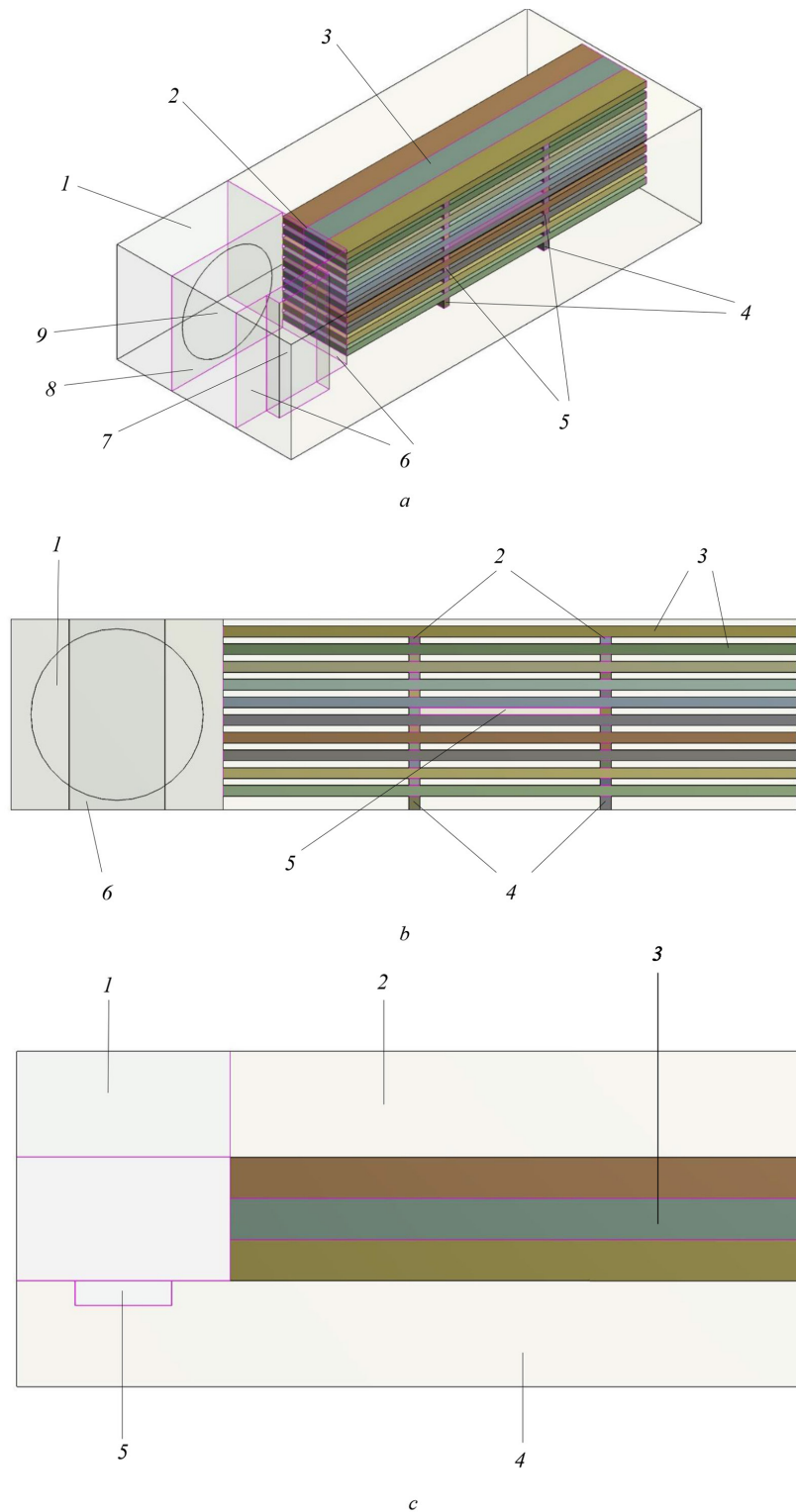


Рис. 1. Вид сушильной установки: *a* – изометрический: 1 – объем со стоком влаги, 2 – перегородка, 3 – штабель, 4 – подставки, 5 – прокладки, 6 – перегородки, 7 – калорифер, 8 – перегородка, 9 – вентилятор; *b* – сбоку: 1 – вентилятор, 2 – прокладки, 3 – пиломатериалы, 4 – подставки, 5 – контрольный объем, 6 – калорифер; *c* – сверху: 1 – объем со стоком влаги, 2 – выходной циркуляционный канал, 3 – штабель, 4 – входной циркуляционный канал, 5 – калорифер

Fig. 1. View of drying chamber: *a* – isometric view: 1 – vapour removal volume (sink of vapour), 2 – baffle, 3 – stack, 4 – supports, 5 – stickers, 6 – baffles, 7 – calorifier, 8 – baffle, 9 – fan; *b* – right view: 1 – fan, 2 – stickers, 3 – lumber, 4 – supports, 5 – control volume, 6 – calorifier; *c* – top view: 1 – vapour removal volume, 2 – output circulating channel, 3 – stack, 4 – input circulating channel, 5 – calorifier

оказывает термическое воздействие на древесину. Штабель расположен вдоль камеры и отделен от вентилятора и калорифера перегородкой. Такое размещение элементов создает входной и выходной циркуляционные каналы, через которые сушильный агент поступает в штабель и удаляется из него.

Штабель представляет собой прямоугольную конструкцию размерами 2100×450×625 мм, где указанные величины соответствуют длине, ширине и высоте. Он формируется из досок толщиной 40 мм. Пиломатериалы укладываются сплошными рядами без шпаций. Горизонтальные ряды пиломатериалов в штабеле разделяются межрядовыми прокладками толщиной 25 мм, которые располагаются вертикально одна над другой. Весь штабель укладывается на 50-миллиметровые подставки, отделяющие его от пола камеры.

Для калорифера применяется простая модель в виде объема, в котором заданы внутренний источник тепла, имитирующий тепловыделение, и сопротивление, соответствующее реальному сопротивлению калорифера. С двух сторон калорифера находятся твердые непроницаемые для воздуха и водяного пара перегородки, которые заставляют весь сушильный агент двигаться через калорифер. Для контроля параметров сушильного агента в зазорах между досками задан контрольный объем, с помощью которого определяются средние величины температуры, относительной влажности и массовой доли воды сушильного агента. Над штабелем оставлен зазор высотой 25 мм. Это необходимо для сушки верхних досок с обеих сторон. Перед вентилятором по ходу движения выделен объем, в котором задан сток влаги, моделирующий удаление водяных паров из установки через приточно-вытяжные отверстия.

**Физико-математическая модель.** До настоящего времени имеется незначительное число работ по аэродинамике сушильных установок [12–18]. Однако полностью отсутствуют работы по переносу тепла и влаги. Для расчета процесса сушки в конвективной сушильной установке рассмотрим систему уравнений, отражающих движение сушильного агента, его нагревание и диффузию в нем пара, и систему уравнений, описывающую тепло- и массоперенос в древесине. Закон сохранения массы сушильного агента представлен следующим уравнением:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность сушильного агента, кг/м<sup>3</sup>;  $v_x, v_y, v_z$  – компоненты средней скорости газа, м/с.

Закон сохранения импульса представляется следующим образом:

$$\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z v_x)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial v_x}{\partial z} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v_y)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z v_y)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial v_y}{\partial z} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_z)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z v_z)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_e \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_e \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu_e \frac{\partial v_z}{\partial z} \right), \quad (4)$$

где  $P$  – газодинамическое давление, Па;  $\mu_e$  – коэффициент эффективной вязкости воздуха, Па·с.

Для определения коэффициента эффективной вязкости  $\mu_e$  используется стандартная  $k$ - $\epsilon$  модель. Уравнение турбулентной кинетической энергии  $k$  имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z k)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial z} \right) + G_k - \rho \epsilon, \quad (5)$$

где  $\mu$  – коэффициент вязкости воздуха, Па·с;  $\mu_t$  – коэффициент турбулентной вязкости воздуха, Па·с;  $\sigma_k = 1,0$  – турбулентное число Прандтля для турбулентной кинетической энергии  $k$ ;  $G_k$  – генерация турбулентной кинетической энергии, Дж/(м<sup>3</sup>·с);  $\varepsilon$  – скорости диссипации турбулентной кинетической энергии, м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>;

Уравнение скорости диссипации турбулентной кинетической энергии  $\varepsilon$  представим следующим образом:

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_x \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v_y \varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho v_z \varepsilon)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (6)$$

где  $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ;  $C_{2\varepsilon} = 1,92$ . Турбулентный  $\mu_t$  и эффективный  $\mu_e$  коэффициенты вязкости определяются по формулам:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (7)$$

$$\mu_e = \mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (8)$$

где  $C_\mu = 0,09$ .

Для определения температурного поля  $T$  в сушильном агенте воспользуемся уравнением

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + c\rho v_x \frac{\partial T}{\partial x} + c\rho v_y \frac{\partial T}{\partial y} + c\rho v_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_e \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_e \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_e \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_V, \quad (9)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость сушильного агента, Дж/(кг·К);  $Q_V$  – тепло, выделяемое калорифером, Вт/м<sup>3</sup>. Турбулентный  $\lambda_t$  и эффективный  $\lambda_e$  коэффициенты теплопроводности рассчитываются по формулам:

$$\lambda_t = \frac{\mu_t c}{Pr_t}, \quad (10)$$

$$\lambda_e = \lambda + \frac{\mu_t c}{Pr_t}, \quad (11)$$

где  $\lambda$  – коэффициент молекулярной теплопроводности, Вт/(м·К).

Диффузию пара в воздухе определяем из следующего уравнения:

$$\rho \frac{\partial C}{\partial t} + \rho v_x \frac{\partial C}{\partial x} + \rho v_y \frac{\partial C}{\partial y} + \rho v_z \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D_e \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho D_e \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho D_e \frac{\partial C}{\partial z} \right) + Q_W, \quad (12)$$

где  $C$  – массовая доля воды в паровоздушной смеси, кг/кг;  $Q_W$  – сток, описывающий удаление влаги из сушильной камеры, кг/(м<sup>3</sup>·с). Турбулентный  $D_t$  и эффективный  $D_e$  коэффициенты диффузии водяного пара рассчитываются по формулам:

$$D_t = \frac{\mu_t}{\rho Sc_t}, \quad (13)$$

$$D_e = D + \frac{\mu_t}{\rho Sc_t}, \quad (14)$$

где  $D$  – молекулярный коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с.

Используем следующее уравнение теплопроводности для описания температурных полей в древесине:

$$c\rho_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \varepsilon Q_\phi \rho_0 \frac{\partial W}{\partial t}, \quad (15)$$

где  $T$  – температура, К;  $W$  – влагосодержание, кг/кг;  $\varepsilon$  – критерий фазового перехода;  $Q_\phi$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;  $c$  – удельная теплоемкость древесины, Дж/(кг·К);  $\rho_0$  – плотность сухой древесины, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности древесины, Вт/(м·К).

Уравнение массопроводности древесины можно представить в следующей форме:

$$\rho_0 \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( a_w \rho_0 \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( a_w \rho_0 \frac{\partial W}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( a_w \rho_0 \frac{\partial W}{\partial z} \right), \quad (16)$$

где  $a_w$  – коэффициент диффузии влаги в древесине, м<sup>2</sup>/с.

На стенках, потолке и полу сушильной камеры, а также на поверхности пиломатериалов принимается условие прилипания сушильного агента, то есть  $\bar{v} = 0$ . Вблизи границ средняя скорость  $\bar{v}$ , температура  $T$ , концентрация  $C$ , кинетическая энергия турбулентных пульсаций  $k$  и скорость диссипации кинетической энергии турбулентных пульсаций  $\varepsilon$  задаются на основе стандартного метода пристеночных функций. Циркуляционное движение воздуха в камере реализуется за счет вентилятора, создающего перепад давления. Нагревание системы осуществляется за счет калорифера, который моделируется объемным прямоугольным телом с внутренним источником тепла  $Q_V$  в уравнении (9) (см. рис. 1). Перед вентилятором расположен объем, который использовался для моделирования удаления влаги из системы за счет приточно-вытяжных отверстий, что отражено путем введения в уравнение (12) величины стока влаги  $Q_W$ .

Так как стенки, потолок и пол сушильной камеры являются изоляторами как для тепла, так и водяного пара, то потоки тепла и пар через них устанавливаются равными нулю. Внутренние стенки (перегородки) проводят тепло, но не проницаемы для воды, поэтому на них задаются граничные условия 4-го рода по температуре, а поток влаги через них остается нулевым. Для пиломатериалов возможны несколько вариантов граничных условий, налагаемых на температурные и влажностные поля. Если сторона пиломатериала граничит с перегородкой или на нее нанесен влагоизоляционный слой, то в этом случае на стороне задается граничное условия 4-го рода по температуре, а поток влаги через нее отсутствует. Если же сторона пиломатериала граничит с сушильным агентом, то для тепловых процессов задаются граничные условия 4-го рода, а значения влагосодержания и массовой доли воды на поверхности определяются из равенства потоков влаги через разделяющую поверхность. Здесь поток воды из древесины к ее поверхности должен быть равен потоку пара от поверхности вглубь сушильного агента. При этом поток будет отсутствовать, если влажность воздуха соответствует равновесному влагосодержанию поверхности древесины. Также влагообмен между древесиной и сушильным агентом отсутствует при 100 % влажности воздуха.

**Модель технологической сушки и результаты расчетов.** Для решения задачи использовался пакет Ansys Fluent. Однако в Fluent не представлено физическое понятие влагосодержания материала, которое используется в уравнениях (15), (16) для описания процессов тепло- и массопереноса в древесине. Таким образом, в Ansys Fluent не реализована возможность решать задачи массопереноса в твердых материалах, которые описываются уравнением (16).

Данная проблема решена путем использования технологий пользовательской функции (UDF) и пользовательского скаляра (UDS). Опираясь на них, в работе введена дополнительная скаляр-

ная переменная  $W$ , смоделировано и решено уравнение переноса массы (16), в уравнении (15) описано слагаемое, задающее поглощение тепла за счет фазовых переходов вода-пар и поставлены граничные условия для процессов массообмена между штабелем и сушильным агентом. Тем самым поставленная задача (1)–(16) решена в полном объеме: описаны аэродинамика сушильного агента в камере, распределение температуры и водяных паров в воздухе, а также перенос тепла и влаги в штабеле.

Типичный технологический процесс периодической камерной сушки пиломатериалов представляется следующим образом. После того как штабель помещен в сушильную камеру, закрываются двери и все технологические отверстия. Материал прогревается до заданной температуры, определенной режимом сушки. Прогрев древесины может длиться от нескольких часов до суток. Обычно прогрев стараются осуществить так, чтобы между сушильным агентом и пиломатериалами отсутствовал перенос влаги. Нагревание древесины происходит до температуры, соответствующей температуре первой ступени сушки. После прогрева древесины начинается собственно процесс сушки, состоящий из нескольких ступеней, сменяющих друг друга. С целью недопущения растрескивания пиломатериалов проводят влаготеплообработку, которая заключается в выравнивании влажностного поля как в объеме всего штабеля, так и по каждой доске в отдельности. Она реализуется между ступенями сушки и после заключительной ступени сушки. Заканчивается технологический процесс сушки кондиционированием и охлаждением материала.

Рассмотрим следующую модель технологической сушки. Прогревание материала перед сушкой выполняется с использованием следующих значений температуры и влажности сушильного агента:  $T = 70$  °C и  $\phi = 95$  %. Первый этап реализуется при среднем влагосодержании пиломатериалов  $W > 35$  %, при этом температура сушильного агента должна поддерживаться  $T = 70$  °C, а его влажность соответственно  $\phi = 80$  %. Когда среднее влагосодержание пиломатериалов становится ниже 35 % ( $W < 35$  %), осуществляется переход на вторую ступень, для которой параметры сушильного агента принимаются соответственно  $T = 80$  °C и  $\phi = 65$  %. Переход на третью, заключительную, ступень происходит при  $W < 20$  %, при этом осуществляется дальнейшее ужесточение режима сушки и параметры сушильного агента задаются следующими:  $T = 95$  °C и  $\phi = 25$  %. Третий этап сушки оканчивается при достижении пиломатериалами среднего влагосодержания, равного 8 %. Кроме этого между второй и третьей ступенями выполняется влаготеплообработка пиломатериалов при следующих параметрах сушильного агента:  $T = 80$  °C и  $\phi = 95$  %. Она необходима для выравнивания влагосодержания как в объеме всего штабеля, так и по каждой доске в отдельности. Это позволяет провести третий этап сушки при более жестких условиях. Завершается сушка кондиционированием и охлаждением материала при следующих параметрах сушильного агента:  $T = 30$  °C и  $\phi = 44$  %, что соответствует равновесному влагосодержанию  $W = 8$  %.

Исходя из описанной модели процесса технологической сушки видно, что удаление влаги из материала в основном проходит при постоянной температуре. Она меняется лишь при переходах с одной ступени на другую. В связи с этим в уравнении массопроводности (16) не используется перенос влаги за счет термоградиентного потока влаги. Однако влияние температуры на массоперенос остается, так как массообменные характеристики сильно зависят от температуры. Так, теплоемкость древесины определяется по формуле [19]

$$c = 2400 + 3,5T. \quad (17)$$

Для сосны зависимость плотности от влагосодержания представим в виде [19]

$$\rho = 470 + 266,67 \quad \text{при } W < 0,3, \quad (18)$$

$$\rho = 421,43 + 428,571W \quad \text{при } W \geq 0,3. \quad (19)$$

Зависимость теплопроводности от температуры и влагосодержания опишем выражением [19]

$$\lambda = (0,00222WT + 10^{0,295 \lg 100W - 1,022}). \quad (20)$$

Функциональная зависимость коэффициента диффузии влаги от температуры имеет вид [19]

$$a_W = 10^{9,36 \lg(T+273) - 32,6}. \quad (21)$$

Для формулировки граничных условий и проведения численных расчетов необходимо иметь значения равновесного влагосодержания, зависящие от температуры  $T$  и относительной влажности воздуха  $\phi$ . Данную функцию можно представить в виде [19]

$$W_p = 10,6^\phi (0,0327 - 0,00015T). \quad (22)$$

Наконец, критерий фазового перехода  $\varepsilon$ , характеризующий количество влаги, испаряющейся внутри материала, принимается постоянным числом  $\varepsilon = 0,15$ .

На рис. 2–6 приведены результаты расчетов при перепаде давления на вентиляторе  $\Delta Pf = 50$  Па и мощности калорифера  $N = 3000$  Вт, которые демонстрируют возможность моделировать технологический процесс сушки, определять режимные параметры и параметры калорифера и вентилятора. Расчеты показали, что этап прогрева является неустойчивым и избежать удаления влаги на нем не удастся, поэтому сушка, пусть и незначительная, все-таки происходит. Виден колебательный характер изменения значений температуры, массовой доли пара и относительной влажности сушильного агента в зазорах между пиломатериалами на первом, втором и третьем этапах сушки. Это связано с высокой интенсивностью подвода тепла и интенсивностью удаления влаги через приточно-вытяжные отверстия, а также с нелинейностью и взаимосвязанностью процессов тепло- и массообмена и протеканием фазовых переходов вода–пар. Такое поведение сушильного агента требует разработки дополнительных алгоритмов выведения параметров сушильного агента на заданные режимом значения и удержания этих значений во время сушки. Это в свою очередь говорит о том, что вентилятор и калорифер должны иметь возможность менять свою мощность в процессе сушки.

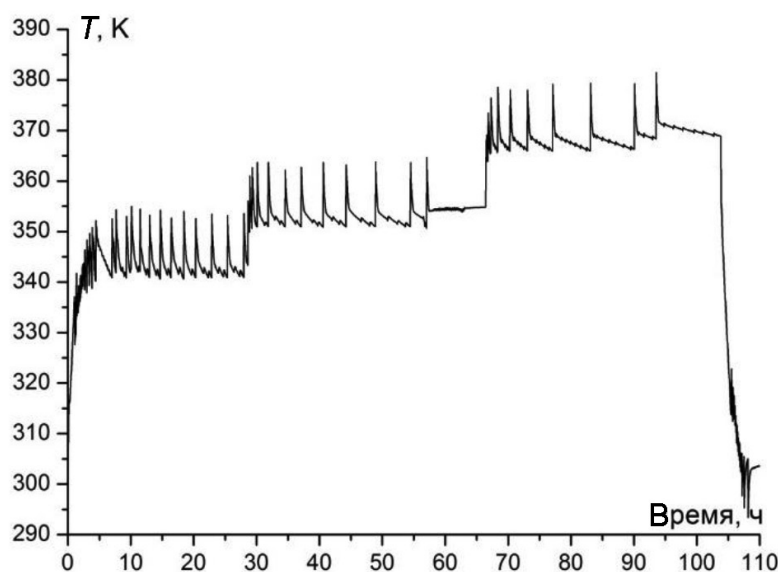


Рис. 2. Изменение средней температуры сушильного агента во времени в зазоре между досками в середине штабеля (контрольный объем, см. рис. 1, *b*)

Fig. 2. The change of the average temperature of the drying agent over time in the gap between the boards in the middle of the stack (control volume, see fig. 1, *b*)



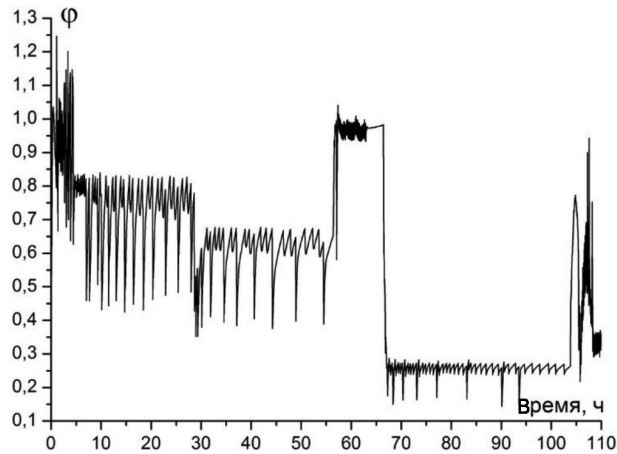


Рис. 3. Изменение средней относительной влажности сушильного агента во времени в зазоре между досками в середине штабеля (контрольный объем, см. рис. 1, *b*)

Fig. 3. The change of the average relative humidity of the drying agent over time in the gap between the boards in the middle of the stack (control volume, see fig. 1, *b*)

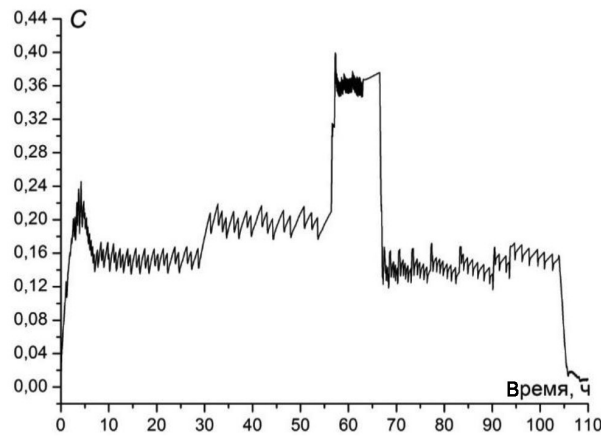


Рис. 4. Изменение средней массовой доли воды сушильного агента во времени в зазоре между досками в середине штабеля (контрольный объем, см. рис. 1, *b*)

Fig. 4. The change of the average mass fraction of water of the drying agent over time in the gap between the boards in the middle of the stack (control volume, see fig. 1, *b*)

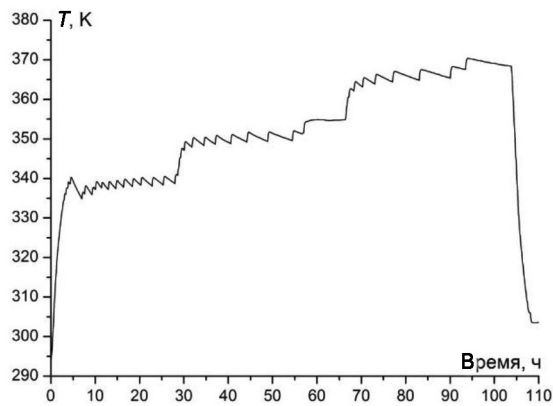


Рис. 5. Изменение средней температуры во времени в единичной доске в середине штабеля (доска под контрольным объемом на рис. 1, *b*)

Fig. 5. The change of the average temperature over time in the single wood board in the middle of the stack (the board under the control volume in fig. 1, *b*)

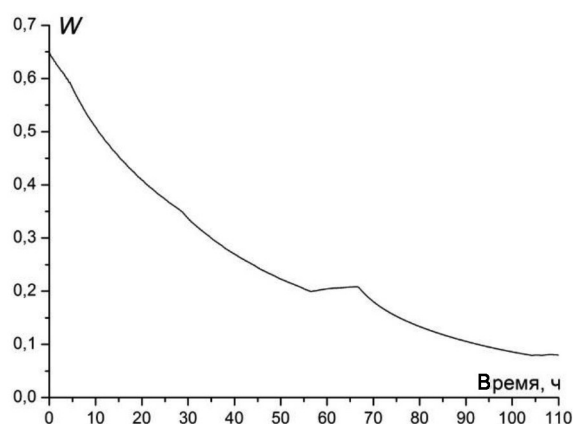


Рис. 6. Изменение среднего влагосодержания во времени в единичной доске в середине штабеля (доска под контрольным объемом на рис. 1, b)

Fig. 6. The change of the average moisture content over time in the single wood board in the middle of the stack (the board under the control volume in fig. 1, b)

**Заклучение.** Выполнено моделирование технологического процесса сушки штабеля из пиломатериалов в сушильной камере конвективного типа периодического действия. Это позволяет на компьютере численно проводить расчет сушильных установок и режимов сушки пиломатериалов. В результате проведения вычислительных экспериментов установлено, что следует строить специальные алгоритмы, сохраняющие параметры сушильного агента постоянными на отдельных этапах сушки.

#### Список использованных источников

1. Кречетов, И. В. Сушка древесины / И. В. Кречетов. – М.: Лесн. пром-сть, 1980. – 432 с.
2. Расев, А. И. Сушка древесины / А. И. Расев. – М.: Высш. шк., 1980. – 181 с.
3. Пейч, Н. Н. Сушка древесины / Н. Н. Пейч, Б. С. Царев. – М.: Высш. шк., 1971. – 220 с.
4. Справочник по сушке древесины / Е. С. Богданов [и др.]. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 304 с.
5. Болдырев, П. В. Сушка древесины / П. В. Болдырев. – СПб.: Проффикс, 2002. – 156 с.
6. Сычевский, В. А. Учет больших деформаций материала, вызванных градиентом влагосодержания / В. А. Сычевский // Инженер.-физ. журн. – 2005. – Т. 78, № 4. – С. 186–193.
7. Сычевский, В. А. К феноменологической теории сушки / В. А. Сычевский // Инженер.-физ. журн. – 2007. – Т. 80, № 3. – С. 55–65.
8. Сычевский, В. А. Математическая модель сушки деформируемых материалов и численная методика расчета / В. А. Сычевский // Инженер.-физ. журн. – 2009. – Т. 82, № 4. – С. 674–687.
9. Серговский, П. С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины / П. С. Серговский, А. И. Расев. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 360 с.
10. Акишенков, С. И. Проектирование лесосушильных камер и цехов / С. И. Акишенков, В. И. Корнеев. – СПб.: Лесотехн. акад., 1992. – 88 с.
11. Соколов, П. В. Проектирование сушильных и нагревательных установок для древесины / П. В. Соколов. – М.: Лесн. пром-сть, 1965. – 331 с.
12. Barański, J. Experimental study and numerical simulation of flow pattern and heat transfer during steam drying wood [Electronic resource] / J. Barański, M. A. Wierzbowski, J. A. Stasiak // The Future of Quality Control for Wood & Wood Products. The Final Conference of COST Action E53, 4–7 May, 2010, Edinburgh. – Mode of access: <http://www.coste53.net/downloads/Edinburgh/Edinburgh-Presentation/25.pdf> – Date of access: 20.10.2017.
13. Федяев, А. А. Влияние непроизводительных потоков агента сушки на качество пилопродукции / А. А. Федяев, Д. А. Наговицын // Системы. Методы. Технологии. – 2012. – № 3. – С. 85–88.
14. Федяев, А. А. Совершенствование газораспределительных устройств технологического оборудования / А. А. Федяев // Системы. Методы. Технологии. – 2009. – № 2. – С. 87–90.
15. Sun, Z. F. Numerical simulation of flow in an array of in-line blunt boards: mass transfer and flow patterns / Z. F. Sun // Chem. Eng. Sci. – 2001. – Vol. 56, Iss. 5. – P. 1883–1896. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00464-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00464-4)
16. Bedeleian, I. B. Investigations concerning the possibility to minimize the stacks aerodynamic resistance [Electronic resource] / I. B. Bedeleian, D. Sova // The Future of Quality Control for Wood & Wood Products. The Final Conference of COST Action E53, 4–7 May, 2010, Edinburgh. – Mode of access: <http://www.coste53.net/downloads/Edinburgh/Edinburgh-Presentation/25.pdf> – Date of access: 20.10.2017.

17. Сычевский, В. А. Численное моделирование аэродинамики лесосушильной камеры / В. А. Сычевский, Т. А. Баранова // Тепло- и массоперенос-2014 : сб. науч. тр. / Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси ; редкол.: О. Г. Пенязьков [и др.]. – Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2015. – С. 66–73.

18. Сычевский, В. А. Оптимизация аэродинамического режима работы сушильной камеры / В. А. Сычевский, А. Д. Чорный, Т. А. Баранова // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергетических объединений СНГ. – 2016. – Т. 59, № 3. – С. 260–271.

19. Шубин, Г. С. Сушка и тепловая обработка древесины / Г. С. Шубин. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 336 с.

## References

1. Krechetov I. V. *Wood Drying*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1980. 432 p. (in Russian).
2. Rasev A. I. *Wood Drying*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980. 181 p. (in Russian).
3. Peich N. N., Tsarev B. S. *Wood Drying*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1971. 220 p. (in Russian).
4. Bogdanov E. S., Kozlov V. A., Kuntyshev V. B., Melekhov V. I. *Handbook of the Wood Drying*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 304 p. (in Russian).
5. Boldyrev P. V. *Wood Drying*. Saint Petersburg, Profiks Publ., 2002. 156 p. (in Russian).
6. Sychevskii V. A. Account for Large Deformations of a Material Caused by the Moisture-Content Gradient. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2005, vol. 78, iss. 4, pp. 824–831. <https://doi.org/10.1007/s10891-005-0131-5>
7. Sychevskii V. A. Toward the phenomenological theory of drying. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2007, vol. 80, iss 3, pp. 483–494. <https://doi.org/10.1007/s10891-007-0064-2>
8. Sychevskii V. A. Mathematical model of drying of deformable materials and numerical calculation method. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2009, vol. 82, iss. 4, art. 668. <https://doi.org/10.1007/s10891-009-0237-2>
9. Sergovskii P. S., Rasev A. I. *Hydrothermal Treatment and Conservation of Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1987. 360 p. (in Russian).
10. Akishenkov S. I., Korneev V. I. *Design of Timber Drying Chambers and Workshops*. Saint Petersburg, Forest Technical Academy, 1992. 88 p. (in Russian).
11. Sokolov P. V. *Designing of Drying and Heating Installations for Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1965. 331 p. (in Russian).
12. Barański J., Wierzbowski M. A., Stasiak J. A. Experimental study and numerical simulation of flow pattern and heat transfer during steam drying wood. *The Future of Quality Control for Wood & Wood Products. The Final Conference of COST Action E53, 4–7 May, 2010, Edinburgh*. Available: <http://www.coste53.net/downloads/Edinburgh/Edinburgh-Presentation/25.pdf> (Accessed 20 October 2017).
13. Fedyaev A. A., Nagovitsyn D. A. Influence of unproductive flows of drying substance on the quality of sawtimber. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2012, no. 3, pp. 85–88 (in Russian).
14. Fedyaev A. A. Improvement of gas-distributing devices of the technological equipment. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2009, no. 2, pp. 87–90 (in Russian).
15. Sun Z. F. Numerical simulation of flow in an array of in-line blunt boards: mass transfer and flow patterns. *Chemical Engineering Science*, 2001, vol. 56, iss. 5, pp. 1883–1896. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00464-4](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00464-4)
16. Bedeleian I. B., Sova D. Investigations concerning the possibility to minimize the stacks aerodynamic resistance. *The Future of Quality Control for Wood & Wood Products. The Final Conference of COST Action E53, 4–7 May, 2010, Edinburgh*. Available: <http://www.coste53.net/downloads/Edinburgh/Edinburgh-Presentation/25.pdf> (Accessed 20 October 2017).
17. Sychevskii V. A., Baranova T. A. Numerical simulation of the aerodynamics of the timber drying chamber. *Teplo- i massopereenos-2014: sbornik nauchnykh trudov* [Heat and Mass Transfer 2014: a collection of scientific papers]. Minsk, A. V. Luikov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus, 2015, pp. 66–73 (in Russian).
18. Sychevskii V. A., Chornyi A. D., Baranova T. A. Optimization of Aerodynamic Conditions of the Chamber Drier. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Educational Institutions and Power Engineering Associations*, 2016, vol. 59, no. 3, pp. 260–271. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-3-260-271>
19. Shubin G. S. *Drying and Heat Treatment of Wood*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 336 p. (in Russian).

## Информация об авторе

Сычевский Вячеслав Александрович – доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровка, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [vas@hmti.ac.by](mailto:vas@hmti.ac.by), [v.sychevskii@mail.ru](mailto:v.sychevskii@mail.ru)

## Information about the author

Vyacheslav A. Sychevskii – D. Sc. (Physics and Mathematics), Assistant Professor, Leading Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus (15, Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [vas@hmti.ac.by](mailto:vas@hmti.ac.by), [v.sychevskii@mail.ru](mailto:v.sychevskii@mail.ru)