

## Математическая модель аэродинамики сушильных камер с горизонтально-поперечной циркуляцией

А.Е. Земцовский<sup>а</sup>, Г.И. Сидоров<sup>б</sup>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины 17, Архангельск, Россия

<sup>а</sup>a.zemtsovsky@narfu.ru, <sup>б</sup>hotsupport@yandex.ru

Статья поступила 12.12.2016, принята 9.01.2017

*В статье с точки зрения аэродинамики рассмотрена идеология построения математической модели циркуляционных каналов сушильных камер постоянного поперечного сечения с горизонтально-поперечной циркуляцией. Проанализированы факторы, влияющие на равномерность течения воздуха в штабеле пиломатериалов. Разработана аналитическая модель циркуляции агента сушки в горизонтально-поперечном направлении по боковому каналу постоянного поперечного сечения. Научно обоснованы следующие предположения и допущения: замкнутость системы циркуляции в сушильной камере, постоянство коэффициента расхода агента сушки и коэффициента трения, равномерность полей скоростей в сечениях циркуляционных каналов. Доказано, что геометрические размеры бокового канала сушильной камеры постоянного поперечного сечения не зависят от температуры и влажности циркулирующего воздуха, а следовательно, от «жесткости» режимов камерной сушки. Они также не зависят от скорости движения агента сушки и длины штабеля пиломатериалов. Основными факторами, влияющими на минимальные значения геометрических параметров боковых циркуляционных каналов, являются толщина загруженных пиломатериалов и межрядных прокладок, высота сушильного штабеля и показатель неравномерности распределения агента сушки через штабель пиломатериалов. Последний фактор задается исследователем по аналогии с точностью получения результатов эксперимента при определении минимального репрезентативного объема выборки.*

**Ключевые слова:** сушка древесины; лесосушильная камера; циркуляционный канал.

## Mathematical model of aerodynamics of the drying chambers with horizontal transverse circulation

A.E. Zemtsovsky<sup>а</sup>, G.I. Sidorov<sup>б</sup>

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17, Severnaya Dvina Emb., Arkhangelsk, Russia

<sup>а</sup>a.zemtsovsky@narfu.ru, <sup>б</sup>hotsupport@yandex.ru

Received 12.12.2016, accepted 9.01.2017

*The article considers the ideology of mathematical modeling of circulation channels of the constant cross-section drying chambers with horizontal transverse circulation in terms of aerodynamics. The factors, influencing on the smoothness of an air flow in the lumber pile, are analyzed. The analytical model of drying agent circulation in horizontal transverse direction through the lateral channel of the constant cross section is developed. Scientifically justified assumptions are the following: the closed circulation system in the drying chamber, the constancy of flow rate of the drying agent and the constancy of friction coefficient, the smoothness of velocity fields in the cross sections of the circulation channels. It is proved that geometric dimensions of the lateral channel of the constant cross section drying chamber do not depend on the temperature and humidity of circulating air, and, consequently, on "hard" mode of chamber drying. They depend neither on the speed of the drying agent nor the length of the lumber pile. The main factors, influencing on the minimum value of geometric parameters of the lateral circulation channels, are the thickness of loaded lumber, the thickness of interrow strips, the height of the drying pile and the indicator of uneven distribution of the drying agent through the lumber pile. While determining the minimum representative sample size, the last factor is specified by the researcher by analogy with the accuracy of the results of the experiment.*

**Keywords:** lumber drying; lumber drying chamber; circulation channel.

### Введение

Процесс производства изделий из древесины может быть представлен как многостадийный, со сложной системой прямых и обратных связей. На этапе сушки формируется значительное количество потребительских свойств будущей готовой продукции.

Высокое качество сушки древесины в лесосушильных камерах можно обеспечить совокупностью технологических и технических факторов. Это физические

свойства древесины, технология лесопиления и сушки и другие факторы. Равномерность просыхания материала по объему штабеля во многом зависит от равномерности скоростей циркуляции агента сушки, которая, в свою очередь, определяется геометрическими параметрами боковых циркуляционных каналов.

Целью проведенных аналитических исследований являлись улучшение аэродинамических показателей лесосушильных камер и повышение равномерности

циркуляции агента сушки через штабель путем разработки математической модели аэродинамики боковых циркуляционных каналов лесосушительных камер.

#### Задачи.

1. Разработка инструментария для научно-обоснованного моделирования аэродинамических характеристик лесосушительных камер;

2. Разработка средств и методов проектирования лесосушительных камер.

**Концепция модели.** Среди множества конструкций лесосушительных камер преобладающими конфигурациями сечений боковых циркуляционных каналов являются прямоугольная и трапецеидальная. Следует отметить, что с точки зрения конструирования сушильной установки прямоугольное сечение является наиболее простым в исполнении, более надежным и простым в обслуживании. Трапецеидальное сечение циркуляционного канала, по мнению некоторых авторов и разработчиков, позволяет сделать воздушный поток более равномерным. Кроме отмеченных нами сечений на практике встречаются и сложные ступенчатые формы, однако их исполнение сопряжено с дополнительными сложностями. Кроме того, реализация таких конструктивных решений существенно затрудняет ремонт сушильных камер.

В программу исследований включена конструкция камер с горизонтально-поперечной циркуляцией агента сушки и вентиляторной установкой в торце камеры с боковыми циркуляционными каналами постоянного поперечного сечения.

В сушильных камерах с горизонтально-продольной циркуляцией для выхода воздуха (каналами служат промежутки между рядами пиломатериалов в сушильном штабеле) движение воздуха существенно более сложное, нежели в воздуховодах прямоугольного сечения. В терминах аэродинамики межрядные промежутки выступают в качестве «щелей». Поскольку ряды пиломатериалов укладываются на прокладки равной толщины, то и «щели» в таких воздуховодах будут иметь одинаковые размеры по длине и ширине.

Экспериментальные исследования циркуляционных каналов постоянного поперечного сечения показывают, что в них происходят, во-первых, изменения направления скорости агента сушки, во-вторых, деформация поля скоростей и изменение статического давления агента сушки [6].

Направление скорости меняется у потоков агента сушки, находящихся вблизи межрядных промежутков, причем потоки тем более отклоняются от оси циркуляционного канала, чем ближе подходят к межрядному промежутку [6].

Деформация поля скоростей заключается в том, что поле скоростей агента сушки имеет искривленную конфигурацию: от оси циркуляционного канала в сторону межрядного промежутка наблюдаются увеличенные скорости, а в противоположную сторону (стенку без межрядного промежутка) — пониженные.

Статическое давление агента сушки неодинаково по поперечному сечению циркуляционного канала и имеет обратный порядок: являясь наименьшим в межрядном промежутке, оно непрерывно увеличивается по направ-

лению к противоположной стенке от межрядного промежутка. При переходе от одного поперечного сечения к другому средняя скорость агента сушки, среднее динамическое и среднее статическое давление также изменяются [6].

В направлении от начала к концу циркуляционного канала по направлению потока агента сушки его средняя скорость непрерывно уменьшается, так как часть агента сушки проникает через межрядный промежуток. В связи с этим динамическое давление будет уменьшаться в направлении потока агента сушки на определенную величину, которая согласно закону сохранения энергии будет трансформироваться в статическое давление. Эта величина динамического давления носит название «освободившееся динамическое давление» [6].

Благодаря так называемому «освободившемуся динамическому давлению» статическое давление агента сушки внутри циркуляционного канала должно возрастать по направлению движения агента сушки. Однако оно в том же направлении одновременно будет уменьшаться в связи с расходом на преодоление трения, с одной стороны, о металлическую или бетонную стенку циркуляционного канала, с другой стороны, о поверхность пиломатериалов. Кроме того, сюда следует добавить потери давления на местные сопротивления: если «освободившееся динамическое давление» будет превосходить потери давления на трение и местные сопротивления, то статическое давление в итоге увеличится, если «освободившееся динамическое давление» будет меньше этих потерь давления — статическое давление станет меньше, если же «освободившееся динамическое давление» сравняется с потерями давления — статическое давление воздуха внутри циркуляционного канала будет постоянным [6].

Таким образом, характер изменения статического давления агента сушки внутри циркуляционного канала полностью определяется соотношением «освободившегося динамического давления» и потерь давления в циркуляционном канале сушильной камеры.

В качестве первичного математического аппарата, описывающего уменьшение расхода агента сушки в боковом циркуляционном канале ( $\Delta p_x$ ,  $m^3/c$ ) в горизонтально-поперечной схеме циркуляции агента сушки в сушильной камере от сечения  $x$  к сечению  $x + dx$  по направлению движения агента сушки, использовано уравнение сохранения энергии Бернулли, имеющее следующий вид [6]:

$$\begin{aligned} \Delta p_x + d\Delta p_x + \frac{\rho}{2} \omega_x^2 + d\left(\frac{\rho}{2} \omega_x^2\right) = \\ = \Delta p_x + \frac{\rho}{2} \omega_x^2 + \frac{\lambda}{d_g} \frac{\rho}{2} \omega_x^2 dx, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха,  $kg/m^3$ ;  $\omega_x$  — скорость агента сушки в поперечном сечении  $x$ ,  $m/c$ ;  $d_g$  — эквивалентный диаметр циркуляционного канала,  $m$ ;  $\lambda$  — коэффициент сопротивления трению.

После несложных преобразований уравнения (1) получено дифференциальное уравнение следующего вида:

$$\omega_x^1 \omega_x^1 + p \omega_x^1 \omega_x + q \omega_x^2 = 0, \quad (2)$$

где  $p = \mu 2f2$ ;  $q = -0,5\mu 2 f2\lambda l$ ;  $f = f/F$ ;  $l = l/d\alpha = nl0/d\alpha$ ;  $f$  — площадь всех межрядных промежутков,  $m^2$ ;  $F$  — площадь поперечного сечения бокового циркуляционного канала,  $m^2$ ;  $l0$  — расстояние между двумя смежными сечениями,  $m$ ;  $\omega n$  — скорость агента сушки на входе в боковой горизонтальный циркуляционный канал,  $m/c$ .

Для анализа неравномерности распределения агента сушки по межрядным промежуткам используется величина относительной скорости циркуляции агента сушки через штабель. Преобразуя уравнения расхода агента сушки, получили следующую зависимость:

$$\bar{v}_x = \frac{v_x}{v_{cp}} = \frac{F\omega_x^1}{\delta l v_{cp}} = \frac{F\omega}{\delta l v_{cp}} \omega_x^1, \quad (3)$$

где  $v_{cp}$  — средняя скорость агента сушки в межрядном промежутке,  $m/c$ .

При равномерной раздаче агента сушки через межрядные промежутки относительная скорость воздуха в нем равна единице. Вследствие этого отклонение неравномерной раздачи агента сушки от равномерной составит:

$$r_x = v_x - 1. \quad (4)$$

Значение относительного отклонения скорости циркуляции агента сушки через штабель определяется по формуле (5). Задавая ее, определяется минимальная ширина бокового циркуляционного канала сушильной камеры:

$$r_i = \frac{v_i - v_{cp}}{v_{cp}} = \bar{v}_i - 1. \quad (5)$$

Аэродинамическое сопротивление бокового циркуляционного канала рассчитывается по формуле (6):

$$\Delta P = \xi_n \frac{\rho \omega^2}{2}. \quad (6)$$

В качестве исходных данных для аналитических исследований принимались следующие:

- высота сушильного штабеля —  $H, m$ ;
- длина сушильного штабеля —  $L, m$ ;
- ширина сушильного штабеля —  $B, m$ ;
- толщина пиломатериалов —  $S, mm$ ;
- ширина пиломатериалов —  $b, mm$ ;
- толщина межрядной прокладки —  $S_{np}, mm$ ;
- скорость агента сушки через штабель —  $\omega, m/c$ ;
- аэродинамический коэффициент (эквивалентная шероховатость) —  $k, mm$ ;
- температура агента сушки —  $t, ^\circ C$ ;
- плотность агента сушки —  $\rho, кг/м^3$ ;
- коэффициент давления вентилятора —  $\chi$ ;
- максимальное относительное отклонение фактической скорости циркуляции в межрядных промежутках от средней скорости агента сушки в штабеле —  $\Gamma_{max}$ .

Значения промежуточных величин рассчитаны по следующим формулам (7)...(12):

- динамическая вязкость агента сушки по формуле Шимана:

$$\mu_1 = 1,71 \times 10^{-6} \times \left( \sqrt{1 + 0,0367 \times t} \right) \times [1 + 0,0008 \times t]; \quad (7)$$

- кинематический коэффициент вязкости:

$$\nu = \frac{\mu_1}{\rho}; \quad (8)$$

- число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega d_3}{\nu}; \quad (9)$$

- параметр бокового циркуляционного канала:

$$\lambda \bar{l} = \lambda \frac{l}{d_3}; \quad (10)$$

- динамический напор:

$$P_\partial = \frac{\rho \omega^2}{2}. \quad (11)$$

Эквивалентный диаметр определяется по формуле (12):

$$d_3 = \frac{2 \cdot S_{np} \cdot L}{S_{np} + L}. \quad (12)$$

В основу алгоритма расчета минимальных значений ширины циркуляционного канала положен метод простых итераций как наиболее простой в реализации.

Анализ результатов функционирования математической модели позволил сделать следующие основные выводы:

1. Минимальная ширина бокового нагнетательного канала зависит от толщины пиломатериалов и межрядных прокладок, высоты сушильного штабеля и относительной неравномерности распределения агента сушки по высоте штабеля.
2. Увеличение толщины пиломатериалов сопровождается уменьшением минимальной ширины циркуляционного канала. Эта же тенденция прослеживается при увеличении относительной неравномерности распределения агента сушки по высоте штабеля.
3. При увеличении толщины прокладок минимальная ширина циркуляционного канала уменьшается, а при увеличении высоты штабеля — увеличивается.
4. Минимальная ширина бокового циркуляционного канала не зависит от температуры и плотности агента сушки, а следовательно, и от режима сушки пиломатериалов. Она также не зависит от средней скорости циркуляции воздуха через штабель и длины штабеля.

#### Литература

1. Леонов Л.В. Технологические измерения и приборы в лесной и деревообрабатывающей промышленности. М.: Лесная промышленность, 1984.
2. Нестеренко А.В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. М.: Высш. школа, 1971. 319 с.
3. Богданов Е. С. Справочник по сушке древесины. М.: Лесная промышленность, 1990.
4. Лыков А. В. Теория сушки. М., Энергия, 1968, 472 с.

5. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. Архангельск: ЦНИИМОД, 1985.  
6. Посохин В. Н. Аэродинамика вентиляции. М.: АВОК-ПРЕСС, 2008.  
7. Уголев Б.Н. Деформативность древесины и напряжения при сушке. М.: Лесная промышленность, 1971.  
8. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины. М.: Лесная промышленность, 1990  
9. Bjom Esping Trokhandboken. Stockholm: Traforskningsinstitutet, 1977.  
10. Cech M.Y. Manuel de operateur de sechoir a bois pour l'Est du Canada / M. Y. Cech F. Pfaff. Ottawa: Forintek Canada Corp., 1980.

#### References

1. Leonov L.V. Technological measurements and devices in the timber and woodworking industry. M.: Lesnaya promyshlennost', 1984.

2. Nesterenko A.V. Basis of thermodynamic calculations of ventilation and air-conditioning. M.: Vyssh. shkola, 1971. 319 p.  
3. Bogdanov E. S. Reference on drying wood. M.: Lesnaya promyshlennost', 1990.  
4. Lykov A. V. Theory of drying. M., Energiya, 1968, 472 p.  
5. Senior engineering materials technology chamber of drying wood. Arkhangel'sk: TsNIIMOD, 1985.  
6. Posokhin V. N. Aerodynamics of ventilation. M.: AVOK-PRESS, 2008.  
7. Ugolev B.N. The dimensional instability of wood and tension during drying. M.: Lesnaya promyshlennost', 1971.  
8. Shubin G.S. Drying and heat treatment of wood. M.: Lesnaya promyshlennost', 1990  
9. Bjom Esping Trokhandboken. Stoskholm: Traforskningsinstitutet, 1977.  
10. Sesh M.Y. Manuel de operateur de sechoir a bois pour l'Est du Sanada / M. Y. Sesh F. Pfaff. Ottawa: Forintek Sanada Corp., 1980.

УДК 711.01.(075.8)

DOI: 10.18324/2077-5415-2017-1-127-133

## Проблемы функционирования и развития межрегиональных систем расселения интерзонального типа

Л.В. Перетолчина<sup>а</sup>, Л.В. Глебушкина<sup>б</sup>

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия  
<sup>а</sup>peretolchina@yandex.ru, <sup>б</sup>glebushkinalyuda@mail.ru  
Статья поступила 29.11.2016, принята 28.12.2016

*В статье обсуждается, как отражается реализация новой модели экономического и социального развития страны на функционировании и развитии субъектов Сибири в пространственном аспекте. Выявлены проблемы, характерные для региональных систем расселения, населенные пункты которых расположены как в основной полосе расселения (ОПР) на юге Сибири, так и в зоне автономных форм расселения, представляющих собой специфический тип функционально-пространственной организации объектов расселения в условиях слабого развития транспортных коммуникаций. В Сибири идет процесс постепенной депопуляции, связанной с естественной убылью и миграцией населения. Авторами дана оценка социально-производственного потенциала 54-х городов Сибири. Показаны сценарии вариантов пространственного развития интерзональных (охватывающих несколько широтных природно-климатических зон) межрегиональных систем расселения. Подробно рассмотрены три варианта планировочной организации интерзональных систем расселения с опорными городами-центрами Иркутском и Красноярском, расположенными в ОПР. Первая (узловая) система предусматривает формирование на территории регионов локальных урбанизированных зон и обширных «экологических разрывов», вторая (линейно-широтная) принципиальная схема планировочной организации предполагает формирование мощной широтной оси урбанизации, третья (линейно-меридиональная) альтернатива основана на формировании линейных цепочек урбанизированных территорий, «нанизанных» на транспортные магистрали меридионального направления. Даны предложения об объединении субъектов в макрорегион на территории Сибири с целью сотрудничества по решению проблем перехода от этапа накопления индустриального потенциала к созданию условий для экономического роста. Доказано, что для устранения диспропорций в освоении пространства России и обеспечения устойчивого развития систем расселения Сибири необходима реализация стратегии социально-экономического развития, направленной на эффективное заселение восточных территорий и согласование приоритетов отраслевого и регионального развития.*

**Ключевые слова:** основная полоса расселения; зона автономных форм расселения; система расселения интерзонального типа; города-центры; устойчивое развитие.