

Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Т. 59, № 3 (2016), с. 260–271
260 Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. V. 59, No 3 (2016), pp. 260–271

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-3-260–271

УДК 536.2:532/533:674.047

Оптимизация аэродинамического режима работы сушильной камеры

В. А. Сычевский¹⁾, А. Д. Чорный¹⁾, Т. А. Баранова¹⁾

¹⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси
(Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Одно из важных направлений развития промышленного производства – переработка древесины, в которой сушка занимает значительное место. Основным в настоящее время является конвективный способ сушки древесины в сушильных камерах. Однако в научной литературе не уделяется должного внимания структуре газового потока в сушильных установках и, в частности, в зазорах между горизонтальными рядами пиломатериалов в штабеле. В то время как воздух, протекающий в пространстве между горизонтальными рядами, способствует нагреву древесины и удалению влаги из пограничного слоя. В статье исследуется аэродинамика экспериментального лесосушильного стенда Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. Геометрическая структура лесосушильного стенда сложная. Поэтому расчет аэродинамики сушильного агента в камере осуществлен на основе программного комплекса ANSYS Fluent 14.5. Для этого создана расчетная геометрическая модель конвективной камерной сушильной установки. Разработана физико-математическая модель аэродинамики конвективной сушки пиломатериалов в лесосушильном стенде Института тепло- и массообмена. На основе проведенных расчетов выполнен анализ структуры потока сушильного агента, выявлены застойные зоны. Установлено, что лесосушильный стенд работает не в оптимальном аэродинамическом режиме. Для определения оптимального аэродинамического режима сушильной камеры проведены расчеты с учетом дополнительного канала между задней стенкой камеры и штабелем, при отсутствии экрана сверху штабеля и наличии экрана между полом и штабелем, при изменении скорости сушильного агента, различных перепадах давления на вентиляторе, вариации количества межрядовых прокладок. По результатам моделирования предложены рекомендации по оптимизации аэродинамики сушильной установки: необходимо снизить скорость сушильного агента в камере за счет уменьшения перепада давления на вентиляторе с начального (150 Па) до конечного (90 Па), а также установить в сушильной камере дополнительный экран между полом и штабелем.

Ключевые слова: аэродинамический режим, сушильная камера, переработка древесины, лесосушильный стенд

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

Адрес для переписки

Сычевский Вячеслав Александрович
Институт тепло- и массообмена
имени А. В. Лыкова НАН Беларуси
ул. П. Бровки, 15,
220072, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 284-11-39
office@hmti.ac.by

Address for correspondence

Sychevsky Vyacheslav A.
A. V. Luikov Heat and Mass Transfer
Institute of NAS of Belarus
15 P. Brovka str.,
220072, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 284-11-39
office@hmti.ac.by

Optimization of Aerodynamic Conditions of the Chamber Drier Operation

V. A. Sychevsky¹⁾, A. D. Chorny¹⁾, T. A. Baranova¹⁾

¹⁾A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Wood utilization is a critical direction of the industrial production advancement, where desiccation of wood holds a prominent place. Convective drying in chamber driers is the present-day dominant technique for wood desiccation. Nevertheless, available scientific literature on the subject does not place high emphasis on the issue of gas flow structure inside the drier installations and, in particular, in the clearance between horizontal rows of stacked saw timber. Whereas, the air flowing between horizontal rows facilitates wood heating and moisture removing from the boundary layer. The present article studies aerodynamics of the experimental timber drying test stand at the A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus. The timber drying test stand geometry structure is complicated, which is why aerodynamics valuation of the drier agent in the chamber involves the software system ANSYS Fluent 14.5. For that end, the researchers developed the convective drier installation geometrical model. A physicomathematical simulation was developed for sawn timber convective drying aerodynamics in the timber drying test stand of the Heat and Mass Transfer Institute. Based on the computations made, the drier agent flow configuration was analyzed, stagnant pockets identified. It was found that the timber drying test stand was not operating within its optimal aerodynamic conditions. The drying chamber optimal aerodynamic conditions determination includes accounting for an additional canal between the chamber rear wall and the timber stack, absence of the screen above the stack, and presence of the screen between the floor and the stack. As well as variation of the drying agent speed, pressure differential at the blower, the inter-row gobb amount variation. The paper offers recommendations on optimizing the drying installation aerodynamics based on the numerical simulation results. To this effect, speed of the drier agent in the chamber should be reduced at the expense of reduction of pressure differential at the blower: from initial (150 Pa) to final (90 Pa). It is necessary as well to install an additional screen between the chamber floor and the stack.

Keywords: aerodynamic conditions, chamber drier, wood utilization, timber drying test stand

For citation: Sychevsky V. A., Chorny A. D., Baranova T. A. (2016) Optimization of Aerodynamic Conditions of the Chamber Drier Operation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (3), 260–271 (in Russian)

Республика Беларусь – одна из крупнейших европейских лесных держав. Ее лесной фонд оценивается в 9,4 млн га, а объем древесины на корню – около 1,6 млрд куб. м. В Беларуси ежегодно заготавливается 15 млн куб. м древесины, которая используется в лесопильном, фанерном, мебельном и других производствах. Значительный объем продукции отправляется на экспорт, поэтому развитие данной отрасли для нашей страны имеет стратегическое значение.

Одно из важнейших направлений развития промышленного производства – переработка древесины, в которой сушка занимает первое место. Основным является конвективный способ сушки древесины в сушильных камерах. Режимы камерной сушки пиломатериалов в производственных условиях координируются по времени от ее начала или по влажности материала. Такие способы сушки древесины применимы при мягких режимах, когда время сушки жестко не ограничивается в процессе производства пиломатериалов. Тем не менее в подавляющем числе случаев это приводит к неэффективным затратам энергии. В последнее время с целью повыше-

ния производительности сушки древесины все чаще используются жесткие режимы, которые дают меньшую продолжительность сушки, но приводят к развитию напряжений в материале.

В настоящее время работа сушильных камер изучается с целью совершенствования их аэродинамики, повышения энергоэффективности и снижения неравномерного энергоподвода. В связи с этим при разработке новых способов сушки древесины управлению и оптимизации аэродинамики сушильного агента в камере отводится важная роль. Формирование неоднородностей поля скорости как по подводящему тракту, так и при его распределении по всей поверхности высушиваемого материала существенно влияет на тепломассообменные процессы. Поэтому предварительное моделирование поля скорости в сушильной камере необходимо, чтобы свести к минимуму не только потери при движении потока, но и выявить очаги возникновения застойных зон.

Результаты экспериментальных исследований и численных расчетов структуры потока и переноса теплоты во время паровой сушки древесины сосны и дуба приводятся в [1]. В [2, 3] выполнено комплексное экспериментальное исследование в промышленных и лабораторных условиях аэродинамики сушильной камеры с целью направленного перераспределения энергоподвода в рабочей зоне. Доказана возможность управления интенсивностью сушки пиломатериалов при неизменных начальных параметрах теплоносителя за счет выравнивания профилей скоростей. Утверждается, что на практике определить зоны, где образуются «паразитные» потоки, довольно сложно, а в некоторых случаях и невозможно из-за конструктивных особенностей камеры сушки. Поэтому следует использовать современные программные средства для моделирования протекающих физических процессов.

В [4] показано, что на переднем и заднем краях расположенных в линию досок в штабеле образуются вихри, которые отрицательно сказываются на аэродинамике потока и процессах тепломассопереноса в штабеле. В сушильной камере воздушный поток преодолевает ряд местных сопротивлений, обусловленных наличием теплообменника, вентилятора, штабеля и геометрией сушилки (изменение направления потока воздуха). В [5] изучены возможности уменьшения потерь давления на входе и выходе из штабеля путем изменения формы краев досок в нем. Это изменение достигается постепенным расширением и сужением входа и выхода из штабеля. Авторы [5] утверждают, что проведенные численные расчеты и экспериментальные исследования показывают падение аэродинамического сопротивления штабеля.

Однако в большинстве научных источников не уделяется должного внимания структуре газового потока в зазорах между горизонтальными рядами пиломатериалов в штабеле, хотя воздух, протекающий в пространстве между горизонтальными рядами, способствует нагреву древесины и удалению влаги из пограничного слоя. Поэтому изучение воздушного потока может дать информацию о способах оптимизации аэродинамики сушильной установки с целью достижения качественной сушки пиломатериалов [6–10].

В статье как объект исследования рассмотрен экспериментальный лесосушильный стенд Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (ИТМО). Сушильная установка представляет собой прямо-

угольную камеру (рис. 1), в которой ограждающие конструкции, включая потолок и пол, состоят из тепло- и влагоизоляционных материалов. Сушильная камера является установкой периодического действия. Для организации конвективного тепло- и массопереноса между сушильным агентом и древесиной в камере размещается вентилятор, обеспечивающий необходимую скорость потока. В большинстве конвективных сушилок скорость воздуха в штабеле составляет 1,5–3,0 м/с. В установке, представленной на рис. 1, вентилятор создает перепад давления 150 Па, его производительность 8800 м³/ч, а диаметр выходного отверстия 0,56 м.

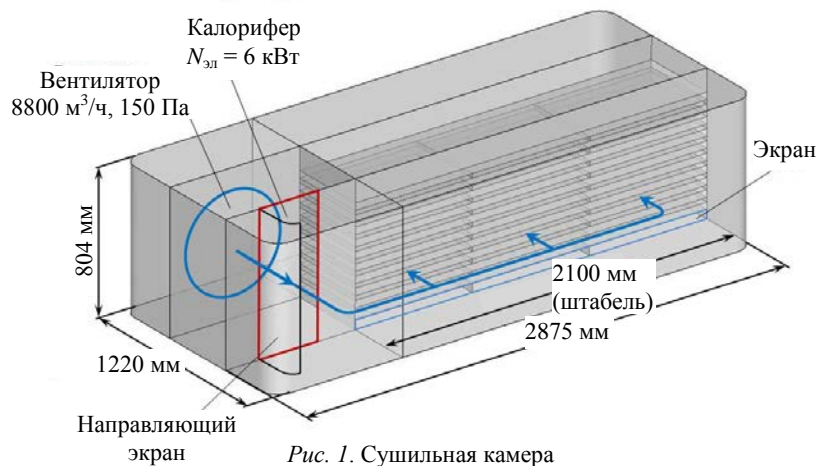


Рис. 1. Сушильная камера
Fig. 1. Chamber drier

Для интенсификации влагопереноса 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, он нагревает древесину. В большинстве случаев сушка при атмосферном давлении реализуется в установках при температуре, не превышающей 100 °С. Тепловая мощность калорифера составляет 6 кВт. За калорифером по ходу движения воздуха размещается штабель.

Штабель представляет собой прямоугольную конструкцию размерами 2100×450×650 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.

Математическая модель движения сушильного агента в камере включает в себя уравнение неразрывности и переноса количества движения сушильного агента. Расчет числа Рейнольдса показал, что в камере реализуется развитый турбулентный режим течения сушильного агента. Поэтому для описания турбулентного режима течения использовали k - ϵ -модель турбулентности со стандартными пристеночными функциями. Аэродинамический расчет проведен с помощью программного комплекса ANSYS Fluent 14.5.

Физическая картина движения воздуха в сушильной камере и его структура рассмотрены в [11], где выполнен анализ структуры потока сушильного агента, выявлены застойные зоны, а также зоны сильного вихреобразования. Отметим важные особенности движения воздуха. Во-первых, образующиеся вихри приводят к появлению застойных областей, в которых сушильный агент находится намного дольше, чем воздух, протекающий при поступательном движении с одной стороны штабеля к другой. В таких застойных зонах возможен неэффективный подвод теплоты и отвод влаги от штабеля. Во-вторых, вихри приводят к образованию возвратного («паразитного») течения воздуха с выходного канала во входной канал через штабель, минуя калорифер. Такое движение также приводит к неэффективному использованию сушильного агента.

Проведенные исследования показывают, что структура течения сушильного агента в рассматриваемом лесосушильном стенде ИТМО обусловлена сложным строением каналов, необходимостью создания циркуляционного потока и соблюдением заданной технологии сушки, скорости прохождения воздуха через штабель. Все это приводит к вихревому режиму движения в камере и дает основание сделать заключение о том, что добиться равномерного движения воздуха в такой сушилке не представляется возможным. Поэтому необходимо минимизировать влияние неоднородности движения воздуха в камере.

Вычислительный эксперимент показал, что создание дополнительного канала между задней стенкой камеры и штабелем и/или снятие экрана сверху штабеля не приводят к улучшению структуры потока в камере. Исчезновение вихрей в одних местах неизбежно приводит к их образованию в других областях. Кроме того, при открытом канале и без экрана воздух проходит мимо штабеля и не сушит древесину, тем самым уменьшая эффективность работы камеры.

Расчеты показали, что одним из наиболее результативных способов снижения интенсивного вихреобразования в воздушном потоке является уменьшение скорости сушильного агента. При этом можно добиться почти полного отсутствия зон завихренности потока в штабеле. Однако при малых скоростях потока возможно возвратное движение отработанного агента через штабель, что недопустимо. В дополнение к этому следует отметить, что эффективность конвективной сушки при малых скоростях значительно снижается. Так, накопленный опыт по вынужденной конвективной камерной сушке древесины показывает, что скорость воздуха в штабеле не должна быть менее 1 м/с.

С целью выбора оптимального значения перепада давления в вентиляторе ΔP_f , соответствующего допустимому диапазону скоростей в штабеле, выполнены расчеты при 15, 30, 50, 70, 90, 120 и 150 Па. Визуальный сравнительный анализ движения воздуха в штабеле показал, что происходит качественная смена структуры движения сушильного агента при переходе от $\Delta P_f = 150$ Па к $\Delta P_f = 120$ Па, характеризующаяся резким снижением неоднородности потока в штабеле. При перепаде в $\Delta P_f = 120$ Па, как видно из рис. 2, распределение скорости потока в штабеле достаточно равномерное. Подобное распределение происходит при перепаде в $\Delta P_f = 90$ Па. При переходе от $\Delta P_f = 90$ Па к $\Delta P_f = 70$ Па наблюдается очередная качественная смена структуры течения.

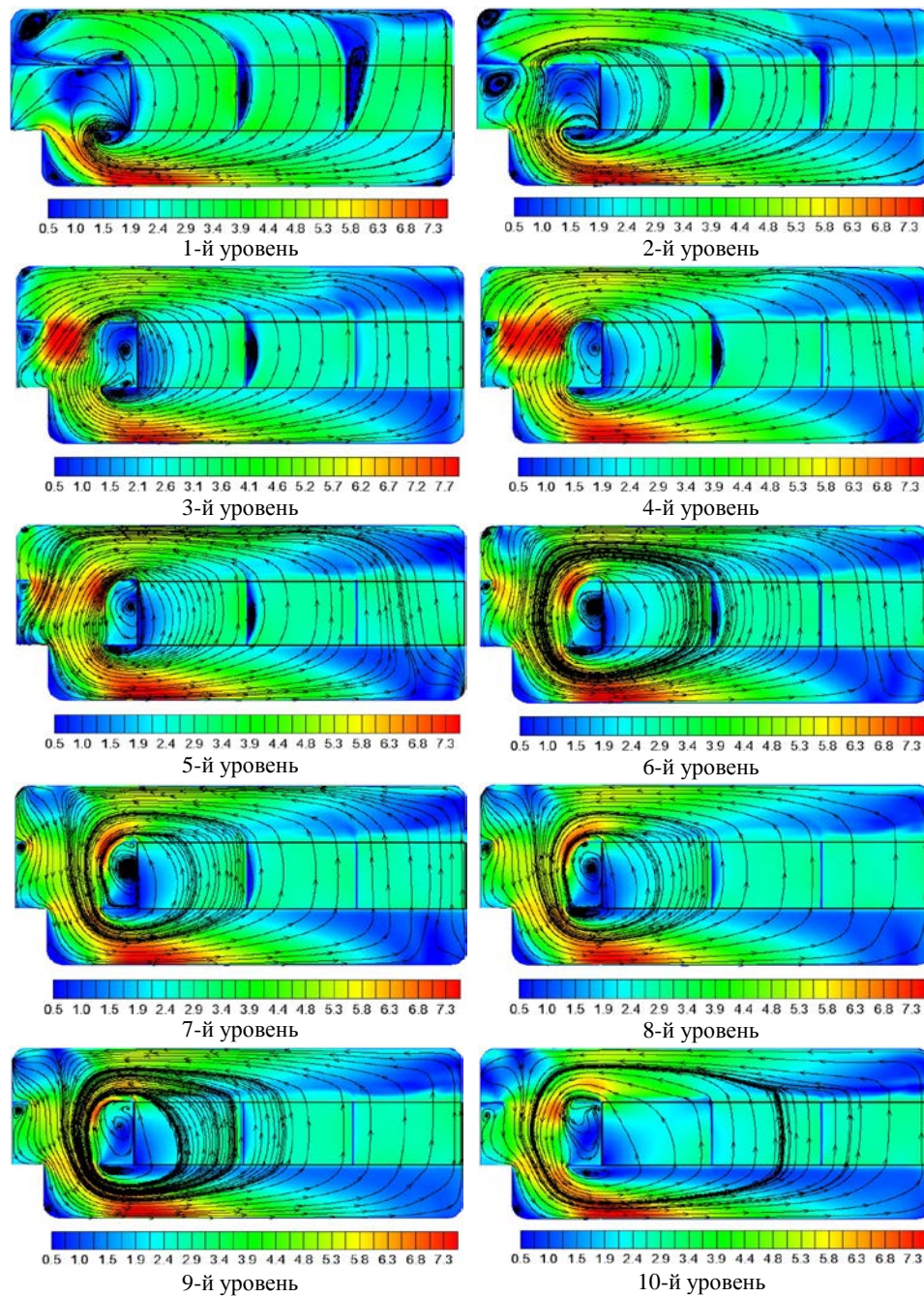


Рис. 2. Распределение скорости и линий тока в срединных плоскостях между досками штабеля при $\Delta P_f = 120$ Па

Fig. 2. Distribution of flow rate and flux lines in middle planes between the planks in stacks at $\Delta P_f = 120$ Pa

В данном случае она характеризуется появлением резкой неоднородности в величине скорости воздуха вдоль штабеля, в чем можно убедиться при сравнении рис. 2, 3. Наиболее сильное различие в скорости проявляет-

ся в области между вентилятором и первым рядом прокладок и всем остальным штабелем. Дальнейшее снижение перепада давления до $\Delta P_f = 15$ Па не привело к смене характера течения в штабеле.

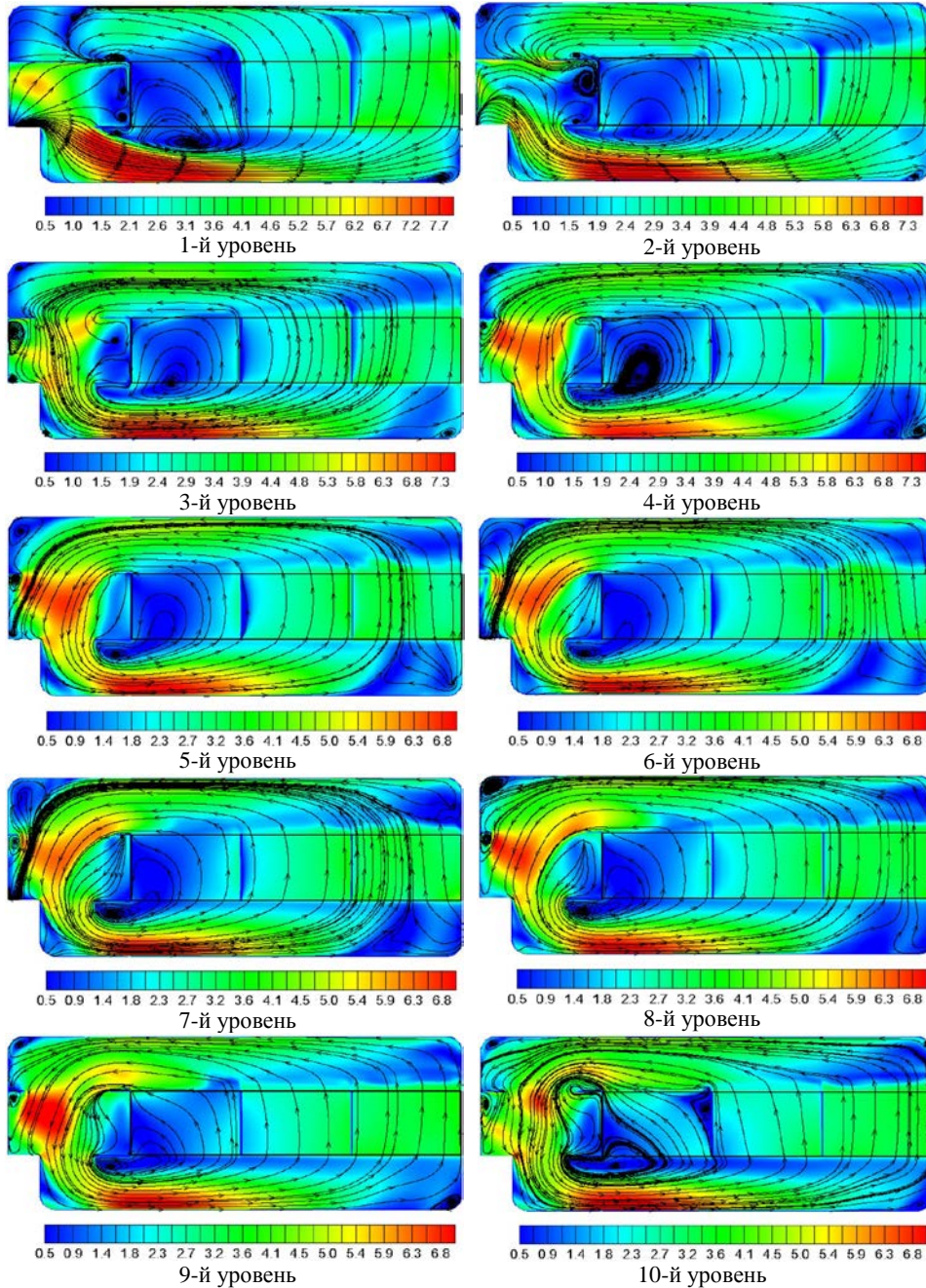


Рис. 3. Распределение скорости и линий тока в срединных плоскостях между досками штабеля при $\Delta P_f = 70$ Па

Fig. 3. Distribution of flow rate and flux lines in middle planes between the planks in stacks at $\Delta P_f = 70$ Pa

Качественно картина осталась без изменений. Таким образом, малая скорость сушильного агента приводит к существенному сокращению числа вихрей. Однако при этом движение сушильного агента через штабель сильно неоднородное.

Минимальное и максимальное значения скорости в штабеле, среднее значение скорости на входе, в центре и на выходе из штабеля в зависимости от перепада давления на вентиляторе приведены в табл. 1. Учитывая, что диапазон скоростей в штабеле должен находиться в пределах от 1,5 до 3,5 м/с, из табл. 1 выбираем оптимальное значение перепада давления на вентиляторе, которое составляет $\Delta P_f = 90$ Па.

Таблица 1

Зависимость скорости потока в штабеле от перепада давления на вентиляторе
Flux rate in stacks dependence of pressure differential at the blower

Перепад давления, Па	Скорость, м/с		Среднее значение скорости, м/с		
	минимальная	максимальная	на входе в штабель	в центре штабеля	на выходе из штабеля
15	0,1	1,9	1,2	1,0	1,1
30	0,1	2,6	1,6	1,4	1,5
50	0,3	3,6	2,1	1,9	2,0
70	0,3	4,3	2,5	2,3	2,4
90	1,0	3,7	2,6	2,4	2,5
120	0,8	4,3	2,8	2,6	2,7
150	0,4	7,2	3,9	3,4	3,6

Кроме того, выполнены расчеты динамики потока с учетом установки экрана между полом и штабелем. Наличие экрана приводит к сильному уменьшению количества вихрей в штабеле и отсутствию обратного движения воздуха. Так, удовлетворительные результаты получаются при наличии экрана между полом и штабелем и перепаде давления на вентиляторе $\Delta P_f = 90$ Па. Приведем расчеты при одновременном использовании этих факторов (наличие экрана и $\Delta P_f = 90$ Па). Расчет, когда задан перепад $\Delta P_f = 90$ Па и отсутствует экран между полом и штабелем, представлен на рис. 4. Расчет, когда задан перепад $\Delta P_f = 90$ Па и имеется экран между полом и штабелем, иллюстрирует рис. 5. Сравнение этих результатов показывает, что второй вариант дает более равномерное распределение скорости потока в штабеле, а следовательно, он является предпочтительным. Таким образом, в рассматриваемом экспериментальном лесосушильном стенде следует уменьшить скорость движения воздуха в камере посредством снижения перепада давления на вентиляторе до $\Delta P_f = 90$ Па и установить экран между полом и штабелем.

При заданных характеристиках вентилятора влияние на структуру потока оказывает также количество межрядовых прокладок. Вычислительные эксперименты показали сильную и в то же время неоднозначную зависимость вихреобразования в штабеле от числа рядов прокладок в нем. В настоящее время крайне сложно представить осмысленную и однозначную зависимость структуры потока от числа межрядовых прокладок в штабеле.

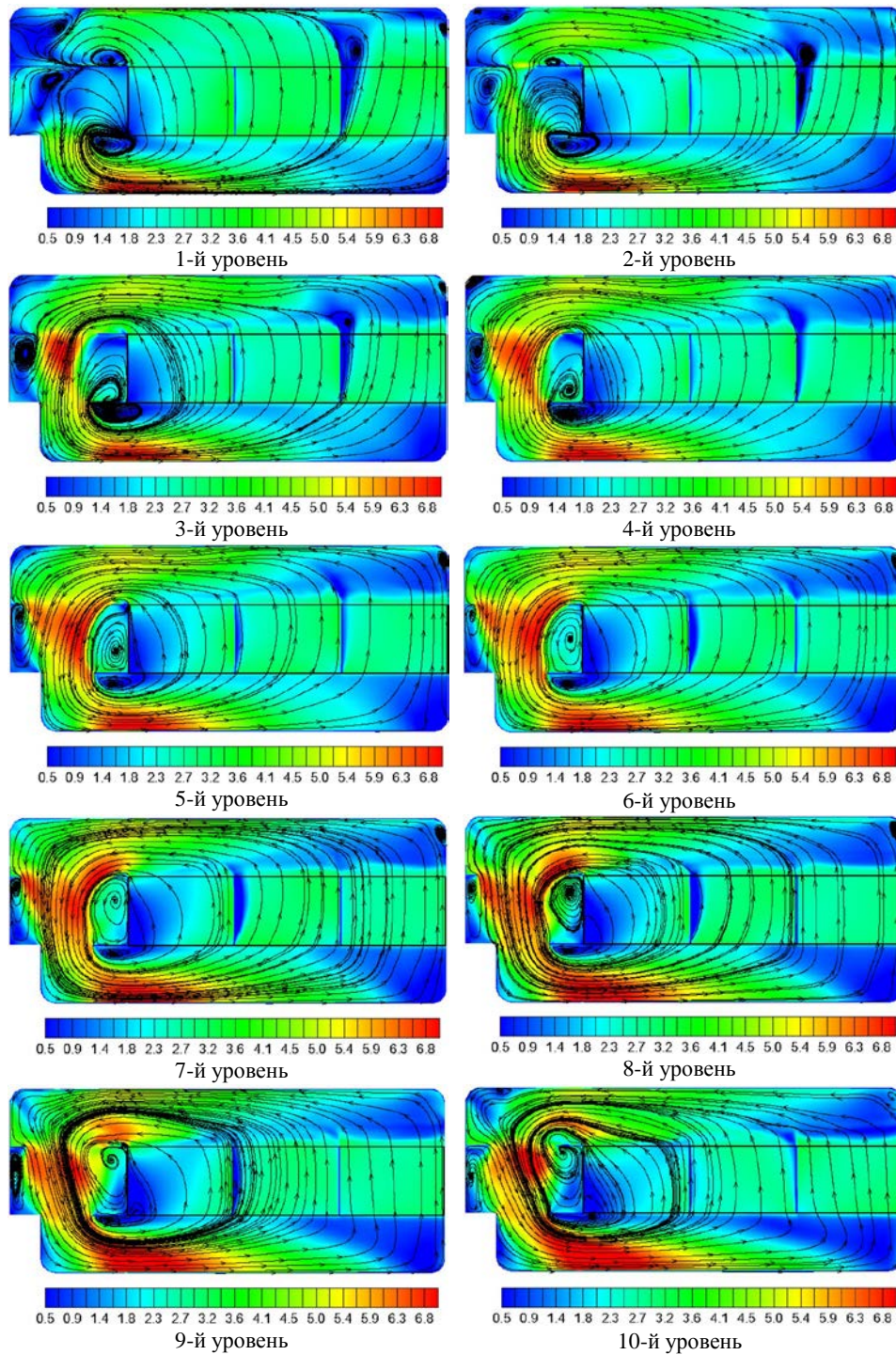


Рис. 4. Распределение скорости и линий тока в срединных плоскостях между досками штабеля при $\Delta P_f = 90$ Па и отсутствии экрана между полом и штабелем
 Fig. 4. Distribution of flow rate and flux lines in middle planes between the planks in stacks at $\Delta P_f = 90$ Pa and absence of the screen between the floor and the stack

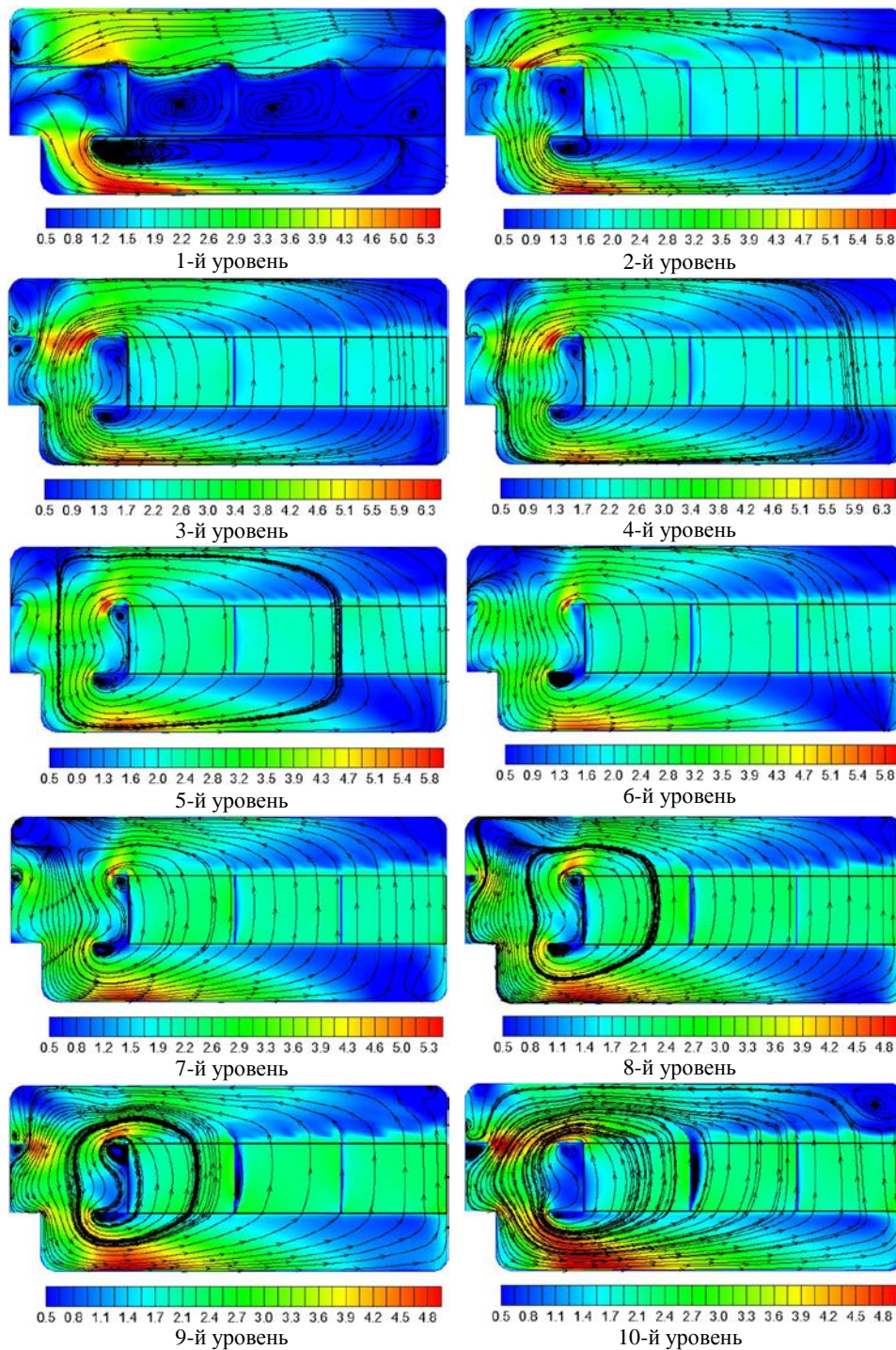


Рис. 5. Распределение скорости и линий тока в срединных плоскостях между досками штабеля при $\Delta P_f = 90$ Па и наличии экрана между полом и штабелем

Fig. 5. Distribution of flow rate and flux lines in middle planes between the planks in stacks at $\Delta P_f = 90$ Pa and the screen present between the floor and the stack

ВЫВОД

Создана расчетная геометрическая модель конвективной камерной сушильной установки. Разработана физико-математическая модель аэродинамики конвективной сушки пиломатериалов в лесосушильном стенде Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. Установлено, что сушильная камера работает не в оптимальном аэродинамическом режиме. Поэтому сформулированы рекомендации по оптимизации аэродинамики сушильной установки. Во-первых, необходимо снизить скорость сушильного агента в камере за счет уменьшения перепада давления, создаваемого вентилятором. Вместо заданного значения перепада давления на вентиляторе $\Delta P_f = 150$ Па необходимо использовать $\Delta P_f = 90$ Па. Во-вторых, следует в сушильной камере установить дополнительный экран между полом и штабелем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Barański, J. Experimental Study and Numerical Simulation of Flow Pattern and Heat Transfer During Steam Drying Wood / J. Barański, M. A. Wierzbowski, J. A. Stasiak // The Future of Quality Control for Wood & Wood Products. 4–7th May, 2010, Edinburgh. The Final Conference of COST Action E53. Edinburgh, 2010.
2. Федяев, А. А. Влияние непроизводительных потоков агента сушки на качество пиломатериала / А. А. Федяев, Д. А. Наговицын // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 3. С. 85–88.
3. Федяев, А. А. Совершенствование газораспределительных устройств технологического оборудования / А. А. Федяев // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 2. С. 87–90.
4. Sun, Z. F. Numerical Simulation of Flow in an Array of In-Line Blunt Boards: Mass Transfer and Flow Patterns / Z. F. Sun // Chemical Engineering Science. 2001. Vol. 56, No 3. P. 1883–1896.
5. Bedelea, I. B. Investigations Concerning the Possibility to Minimize the Stacks Aerodynamic Resistance / I. B. Bedelea, D. Sova // The Future of Quality Control for Wood & Wood Products. 4–7th May, 2010, Edinburgh. The Final Conference of COST Action E53. Edinburgh, 2010.
6. Лебедев, П. Д. Расчет и проектирование сушильных установок / П. Д. Лебедев. М.; Л., Госэнергоиздат, 1962. 320 с.
7. Справочник по сушке древесины / Е. С. Богданов [и др.]; под ред. Е. С. Богданова. М.: Лесная промышленность, 1990. 320 с.
8. Кречетов, И. В. Сушка древесины / И. В. Кречетов. М.: Лесная промышленность, 1980. 432 с.
9. Расев, А. И. Сушка древесины / А. И. Расев. М.: Высш. школа, 1980. 181 с.
10. Руководящие технические материалы по технологии камерной сушки древесины. Архангельск: ЦНИИМОД, 1985. 70 с.
11. Сычевский, В. А. Численное моделирование аэродинамики лесосушильной камеры / В. А. Сычевский, Т. А. Баранова // Тепло- и массоперенос-2014: сб. науч. тр. / Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси; редкол.: О. Г. Пенязков [и др.]. Минск: Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова, 2015.

REFERENCES

1. Barański J., Wierzbowski M. A., Stasiak J. A. (2010) Experimental Study and Numerical Simulation of Flow Pattern and Heat Transfer During Steam Drying Wood. *The Future of Quality Control for Wood & Wood Products. 4–7th May, 2010, Edinburgh. The Final Conference of COST Action E53.*
2. Fedyaev A. A., Nagovitsin D. A. (2012) Effects of the Drying Agent Non-Productive Flows on the Sawn Goods Quality. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], (3), 85–88 (in Russian).
3. Fedyaev A. A. (2009) Development of Gas-Distributing Hardware of the Production Equipment. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies], (2), 87–90 (in Russian).
4. Sun Z. F. (2001) Numerical Simulation of Flow in an Array of In-Line Blunt Boards: Mass Transfer and Flow Patterns. *Chemical Engineering Science*, 56 (3), 1883–1896. DOI: 10.1016/S0009-2509(00)00464-4.
5. Bedeleian I. B., Sova D. (2010) Investigations Concerning the Possibility to Minimize the Stacks Aerodynamic Resistance. *The Future of Quality Control for Wood & Wood Products. 4–7th May, 2010, Edinburgh. The Final Conference of COST Action E53.*
6. Lebedev P. D. (1962) *Drier Apparatuses Engineering*. Moscow-Leningrad, Gosenergoizdat. 320 (in Russian).
7. Bogdanov E. S., Kozlov V. A., Kuntyshev V. B., Melekhov V. I. (1990) *Reference Book on Wood Desiccation*. Moscow, Lesnaia Promyshlennost. 320 (in Russian).
8. Krechetov I. V. (1980) *Desiccation of Wood*. Moscow, Lesnaia Promyshlennost. 432 (in Russian).
9. Rasev A. I. (1980) *Desiccation of Wood*. Moscow, Vysshaya Shkola. 181 (in Russian).
10. Guidance Technical Documents on Technology of Wood Chamber Drying. Arkhangelsk: TsNIIMOD, 1985. 70 (in Russian).
11. Sychevsky V. A., Baranova T. A. (2015) A Timber-Drying Chamber Aerodynamics Computer Simulation. *Teplo- i Massoperenos-2014: sb. nauch. tr.* [Heat and Mass Transfer-2014: Coll. of Theor. Works]. Minsk, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus (in Russian).

Received: 25.06.2015

Accepted: 02.09.2015

Published online: 03.06.2016