

35. Kozlov P.N., Mel'nikova N.I., L'vov A.A. Postroenie matematicheskoy modeli datchika davleniya metodom interpolyatsii bikubicheskimi splaynami [Construction of a mathematical model of a pressure sensor by interpolation with bicubic splines], *Problemy upravleniya v sotsial'no-ekonomicheskikh i tekhnicheskikh sistemah: Sb. tr. XIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Problems of management in socio-economic and technical systems: Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference]. Saratov: Nauka, 2018, pp. 342-347.
36. Linnik Yu.V. Metod naimen'shih kvadratov i osnovy teorii obrabotki nablyudeniy [Least squares method and the basics of observation processing theory]. Moscow: GIFML, 1958, 336 p.
37. Musatov M.V., L'vov A.A. Analiz modeley metoda naimen'shih kvadratov i metodov polucheniya otsenok [Analysis of Least Squares Models and Estimation Methods], *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State Technical University], 2009, No. 2 (43), Issue 4, pp. 137-140.
38. Vuchkov I.N., Boyadzhieva L.N., Solakov E.B. Prikladnoy lineynyy regessionnyy analiz [Applied linear regression analysis]. Moscow: Finansy i statistika, 1987, 239 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Д.А. Зимняков.

**Дробынин Михаил Евгеньевич** – Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.; e-mail: misha-q@mail.ru; г. Саратов, Россия; аспирант.

**Аль-Тай Омар Давуд Мохаммед** – e-mail: altai\_omar@mail.ru; аспирант.

**Филина Екатерина Владимировна** – e-mail: ekaterinafilinav@gmail.com; аспирантка.

**Львов Петр Алексеевич** – Энгельское ОКБ «Сигнал» им. А.И. Глухарева; e-mail: peter.lvov@gmail.com; г. Энгельс-19, Россия; к.т.н.; нач. отдела.

**Кузин Сергей Александрович** – e-mail: kuzinsa@mail.ru; нач. сектора;

**Drobynin Mikhail Evgen'evich** – Yuri Gagarin State Technical University of Saratov; e-mail: misha-q@mail.ru; Saratov, Russia; postgraduate student.

**Al-Tai Omar Davud Mokhammed** – e-mail: altai\_omar@mail.ru; postgraduate student.

**Filina Ekaterina Vladimirovna** – e-mail: ekaterinafilinav@gmail.com; postgraduate student.

**L'vov Peter Alexeevich** – OJSC "Signal" Engels Design Bureau named after A.I. Glukharev; e-mail: peter.lvov@gmail.com; Engels-19, Russia; cand. of eng. sc.; department head.

**Kuzin Sergey Alexandrovich** – e-mail: kuzinsa@mail.ru; research sector head.

УДК 681.5

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-83-93

**А.Л. Ляшенко**

## **РАЗРАБОТКА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЕССА**

*Рассмотрена необходимость регулирования температуры теплоносителя в гидравлических прессах, обеспечивающих горячее склеивание фанеры, регулирование давления в каналах пресса и поддержания технологических параметров на заданном уровне. В качестве объекта управления рассмотрен колонный гидравлический пресс П-714-Б для горячего склеивания фанеры, установленный на Усть-Ижорском фанерном комбинате. В статье представлено описание колонного гидравлического пресса. Для мониторинга параметров представленной установки фанерного производства, предлагается рассмотреть нагревательные плиты пресса и пакеты фанеры как объект с распределенными параметрами. Для разработки математической модели объекта управления была рассмотрена функциональная схема данного устройства с основным оборудованием и технологическими потоками теплоносителя. Разработана методика моделирования объектов данного класса как объектов с распределёнными параметрами. Рассмотрение процессов, протекающих в ка-*

налах нагревательных плит, позволило составить дифференциальные уравнения движения, описывающие течение рабочей среды в системе каналов. Разработанная методика математического моделирования распространения тепла в нагревательных плитах прессы и пакетах фанеры позволила составить математическую модель для рассматриваемого объекта. Данная математическая модель получилась достаточно сложной, и решить полученную систему дифференциальных уравнений в частных производных аналитически (выделить передаточную функцию) не представляется возможным. Для численного анализа рассматриваемого объекта управления были составлены дискретная модель уравнений и вычислительный алгоритм. В процессе составления дискретных моделей были решены задачи «стыковки» граничных условий, обеспечения устойчивости вычислительной схемы и выбраны шаги дискретизации по пространственным переменным. Для компьютерного моделирования было специально разработано программное обеспечение. С его помощью были рассчитаны значения температур в контрольных точках. Представленная математическая модель позволила произвести численный эксперимент, в результате которого были получены частотные характеристики исследуемого объекта. Данные характеристики были использованы при синтезе распределенного высокоточного регулятора.

*Колонный гидравлический пресс; объекты с распределёнными параметрами; дифференциальные уравнения; моделирование; системный анализ; управление; контроль; диагностика; обработка информации; распределенный регулятор.*

**A.L. Liashenko**

#### **DEVELOPMENT OF A DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM OF THERMAL PROCESSES IN A HYDRAULIC PRESS**

*The necessity of regulating the temperature of the coolant in hydraulic presses, providing hot gluing of plywood, regulating the pressure in the press channels and maintaining technological parameters at a given level, is considered. A column hydraulic press P-714-B for hot gluing of plywood, installed at the Ust-Izhora plywood mill, is considered as a control object. The article provides a description of the column hydraulic press. To monitor the parameters of the presented installation of plywood production, it is proposed to consider the heating press plates and plywood packages as an object with distributed parameters. To develop a mathematical model of the control object, a functional diagram of this device with the main equipment and technological flows of the coolant was considered. A technique has been developed for modeling objects of this class as objects with distributed parameters. Consideration of the processes occurring in the channels of the heating plates made it possible to formulate differential equations of motion that describe the flow of the working medium in the system of channels. The developed method of mathematical modeling of heat propagation in the heating plates of the press and plywood packages made it possible to draw up a mathematical model for the object under consideration. This mathematical model turned out to be quite complex, and it is not possible to solve the resulting system of partial differential equations analytically (to isolate the transfer function). For a numerical analysis of the considered control object, a discrete model of equations and a computational algorithm were compiled. In the process of compiling discrete models, the problems of “joining” the boundary conditions were solved, the stability of the computational scheme was ensured, and the steps of discretization with respect to spatial variables were selected. Software was specially developed for computer modeling. With its help, the temperature values at the control points were calculated. The presented mathematical model made it possible to carry out a numerical experiment, as a result of which the frequency characteristics of the object under study were obtained. These characteristics were used in the synthesis of a distributed high-precision controller.*

*Column hydraulic press; objects with distributed parameters; differential equations; modeling; system analysis; control; diagnostics; data processing; distributed regulator.*

**Введение.** В настоящее время одним из наиболее распространенных материалов является фанера общего назначения, которая применяется в производстве мебели и отделки интерьеров, в радиотехнической промышленности, в судостроении, вагоностроении и автостроении.

Фанеру используют в основном в качестве конструкционного материала, поэтому она должна обладать определенными физико-механическими свойствами, иметь определенную прочность и плоскую прямолинейную поверхность [4]. Главной задачей при конструировании листа фанеры является обеспечение его равнопрочности в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Физико-механические свойства фанеры и других видов клееных материалов зависят от породы и свойств древесины, идущей на их изготовление. Кроме того, на свойства фанеры и другой продукции влияют толщина шпона, вид применяемого клея, режимы склеивания (прессования), и многие другие факторы [5].

Производство фанеры является сложным технологическим процессом, состоящим из нескольких этапов, сопровождающихся термической обработкой материалов. Одним из этапов производства является процесс склеивания листов шпона, собранных в пакет. Существует два способа склеивания фанеры: сухой горячий и сухой холодный [8]. К режимам склеивания предъявляются особые требования.

Выбор режима склеивания зависит от породы выбранной древесины, используемого клея и желаемого качества готового продукта.

Процесс склеивания фанеры протекает при поддержании определенных параметров, таких как, температура в клеевом слое, удельное давление, обеспечивающие контакт листов шпона, между которыми находится клеевой слой и продолжительность склеивания [9].

Поддержание указанных параметров требует наличия автоматизированных систем управления технологическими процессами.

**Постановка задачи.** Рассмотрим процесс склеивания фанеры сухим горячим способом. При применении данного способа для отверждения клея необходимо производить нагревание пакетов шпона, которое осуществляется в гидравлических прессах.

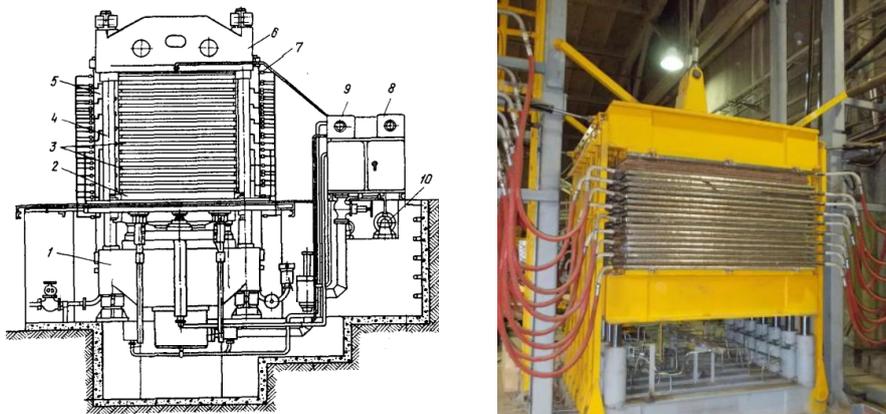


Рис. 1. Колонный гидравлический пресс П-714-Б: 1 – основание; 2 – подвижная траверса; 3 – нагревательные плиты; 4 – колонны; 5, 7 – коллекторы; 6 – неподвижная траверса-архитрав; 8 – манометр; 9 – термометр

Колонный гидравлический пресс П-714-Б (рис. 1) имеет массивное металлическое основание 1. В основании пресса есть отверстия для установки колонн 4, связывающих основание пресса с верхней неподвижной траверсой-архитравом 6. К подвижной траверсе и архитраву прикреплено по одной нагревательной плите, между которыми установлены остальные плиты 3. Чтобы архитрав и стол не нагревались, между ними и плитами есть теплоизолирующие прокладки [10].

Из существующих основных способов нагрева плит – паром, перегретой водой и электричеством – наиболее распространен нагрев паром. Пар подают по трубопроводу к парораспределительному коллектору 5, а оттуда через шарнирные паропроводы в плиты. Пар, отдавая свою теплоту, нагревает плиты пресса и затем, конденсируясь (превращаясь в воду), удаляется через паротводящий коллектор 7 и конденсационный горшок.

Нагревательные плиты обеспечивают в гидравлических прессах горячее склеивание, которое происходит под воздействием давления и температуры.

Температура плит пресса – основной фактор, влияющий на интенсивность прогрева пакета. В гидравлических прессах тепло передают пакету горячие плиты. В прессах с паровым обогревом температура плит зависит от давления пара, обогревающего их [22, 23]. Температуру плит выбирают в зависимости от вида клея, породы древесины, толщины прессуемого пакета

Например, для склеивания трехслойной березовой и ольховой фанеры рекомендуется следующая температура в зависимости от применяемого клея (табл. 1).

Таблица 1

#### Рекомендуемая температура

Клей	Температура, °С
Альбуминовый	140–145
Казеиновый	130–135
Комбинированный	135–140
Карбамидный	125–130
Фенолформальдегидный	140–150
Бакелитовая пленка	145–155

Во время загрузки пакетов и смыкания плит пресса наружные листы шпона и клеевые прослойки, примыкающие к ним, нагреваются вследствие теплоизлучения плит пресса и контакта с плитами. Для предотвращения преждевременного отверждения клеевых прослоек существуют допустимые нормы времени загрузки пакетов в пресс. По достижении удельного давления температура в слоях, удаленных от плит пресса, нарастает медленнее, чем в наружных. Так же неодинаково изменяется температура и по площади пакета. Быстрее температура увеличивается в средней части пакета, медленнее – по его краям.

Конструктивно нагревательные плиты представляют собой плоские массивные стальные листы с расположенной внутри системой каналов, по которым циркулирует теплоноситель. При этом наблюдается перепад температур на входе и выходе теплоносителя из-за большого сопротивления, вызванного относительно большой длиной каналов в результате происходит неравномерный нагрев фанеры по своему объему [8, 22, 23].

Неравномерность распределения температуры внутри пакета позволяет рассматривать его как объект с распределенными параметрами.

Повысить равномерность прогрева позволит применение электрического нагрева плит с помощью помещенных внутри них электроспиралей или специальных трубчатых электронагревателей (ТЭН), управление которыми будет осуществляться с помощью распределенного регулятора.

**Разработка математической модели.** В работе рассматривается процесс склеивания авиационной фанеры БПС-1В на смоле СФЖ-3011 при рабочем давлении 2–2,5 М Па и температуре плит пресса 148–153 °С.

К числу факторов, определяющих время нагрева, относится толщина прессуемого пакета. В процессе прессования она меняется и тем больше, чем выше внешнее давление. Характер изменения толщины пакета в процессе горячего прессования показан на рис. 2 и подробно рассмотрен в [3].

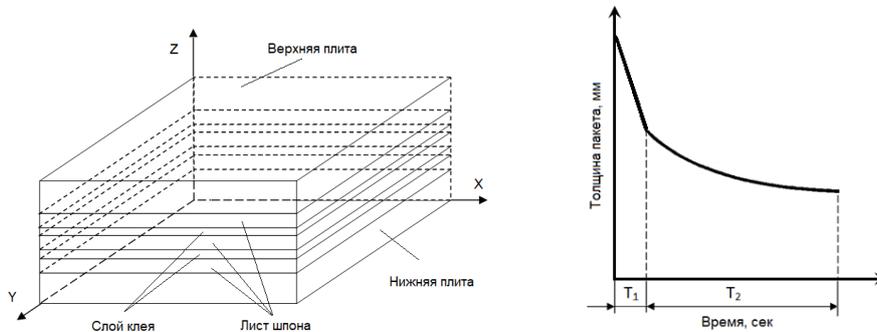


Рис. 2. Схема исследуемого объекта и график изменения толщины пакета при прессовании

На рис. 2 приняты следующие обозначения:  $T_1$  – время наложения давления;  $T_2$  – время термообработки под давлением.

В период  $T_1$  наложения давления пакет изменяет свою толщину. Степень сжатия пакета и уплотнения древесины тем больше, чем больше внешнее давление. В последующий период прессования  $T_2$  начинается прогрев древесины, уменьшается ее сопротивление сжатию, в силу чего при том же давлении древесина продолжает уплотняться, а пакет уменьшать свою толщину

С учетом сформулированных допущений и ограничений была разработана математическая модель тепловых процессов в листе фанеры при интенсивном тепловом воздействии [1, 13, 15, 21]. Ниже представлен фрагмент математической модели для трехслойного пакета фанеры.

Дифференциальное уравнение, записанное для нижней плиты прессы:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a_{II} \left[ \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right], \quad (1)$$

где  $a_{II}$  – коэффициент температуропроводности листа шпона.

Дифференциальное уравнение, записанное для нижнего листа шпона:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a_{III} \left[ \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + \frac{a W}{\lambda V}. \quad (2)$$

где  $a_{III}$  – коэффициент температуропроводности листа шпона;

$W$  – мощность внутренних источников энергии;

$V$  – объём, занимаемый листом;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Дифференциальное уравнение, записанное для клеевого слоя:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a_K \left[ \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + \frac{b W}{\lambda V}. \quad (3)$$

где  $a_K$  – коэффициент температуропроводности клея.

Дифференциальное уравнение, записанное для среднего листа шпона:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a_{ш} \left[ \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + \frac{a W}{\lambda V}. \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение, записанное для клеевого слоя:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a_{к} \left[ \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + \frac{b W}{\lambda V}. \quad (5)$$

Дифференциальное уравнение, записанное для верхнего листа шпона:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a_{ш} \left[ \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] + \frac{a W}{\lambda V}. \quad (6)$$

Дифференциальное уравнение, записанное для верхней плиты прессы:

$$\frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = a_{п} \left[ \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right]. \quad (7)$$

Далее запишем уравнения движения, описывающие течение однофазной рабочей среды в трубках нагревательных плит [6, 19]. Условия баланса массы, энергии и количества движения для однофазного течения в трубках парогенератора в результате преобразований можно приближенно записать в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\frac{\partial M}{\partial z} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + M \frac{\partial h}{\partial z} - \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{M}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = q' d; \quad (9)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + 2 \frac{M}{\rho} \frac{\partial M}{\partial z} - \frac{M^2}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho g \cos \beta + 10^3 \frac{\partial p}{\partial z} + f \frac{M^2}{\rho} = 0, \quad (10)$$

где  $M(z, t) = \rho w$  – массовый расход ( $w$  – скорость движения жидкости);

$\rho(z, t) = \rho(p, h)$  – плотность жидкости;

$h(z, t)$  – энтальпия жидкости;

$p(z, t)$  – давление;

$q'_d = \pi d \alpha (\Theta_{in} - \vartheta)$  – внутренний тепловой поток на единицу длины трубки ( $d$  – внутренний диаметр трубки;  $\alpha(p, h, M, q)$  – коэффициент теплообмена;  $q$  – тепловой поток на единицу длины трубки;  $\Theta_{in}$  – температура внутренней поверхности стенки трубки;  $\Theta$  – температура рабочей среды;  $\vartheta(p, h)$  – температура жидкости);

$g$  – ускорение свободного падения;

$\beta$  – угол между трубкой парогенератора и вертикалью;

$f$  – коэффициент потери давления.

При разработке модели были учтены особенности изделия [3, 10] и заданы условия однозначности [2].

Для решения математической модели применялись численные методы [7, 16, 20], а также было разработано специальное программное обеспечение [14].

По результатам моделирования были построены графики переходных процессов в контрольных точках. На рис. 3 представлен график распределения теплового поля в среднем листе шпона.

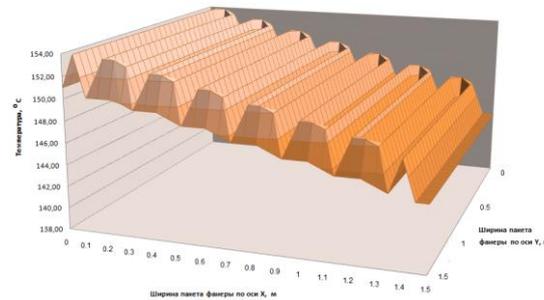


Рис. 3. График распределения теплового поля в среднем листе шпона

Как было отмечено выше и как показали результаты моделирования, объект характеризуется неравномерностью распределения температуры по объему и, следовательно, для управления технологическим процессом разработаем систему с распределенными параметрами [11, 17, 18].

**Расчет настроек распределенного регулятора.** Для реализации управления был выбран распределенный регулятор [17]. Передаточная функция рассчитываемого распределенного регулятора, имеет вид:

$$W(x, y, p) = E_1 \cdot \left[ \frac{n_1 - 1}{n_1} - \frac{1}{n_1} \nabla^2 \right] + E_4 \cdot \left[ \frac{n_4 - 1}{n_4} - \frac{1}{n_4} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{p} + E_2 \left[ \frac{n_2 - 1}{n_2} - \frac{1}{n_2} \nabla^2 \right] \cdot p. \quad (11)$$

Исследуемый объект не принадлежит к классу пространственно-инвариантных, т.е. решение не распадается по собственным вектор-функциям оператора объекта. Из этого следует, что определение границ расположения годографов собственных значений, может быть осуществлено с использованием спектров Гершгорина.

Исследуем распределенный объект управления, матрица передаточных коэффициентов которого имеет вид:

$$W = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2m} \\ a_{31} & a_{31} & a_{33} & \dots & a_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nm} \end{pmatrix}, \text{ где } a_{ij} = \frac{k_{ij}}{T_{ij}p + I} \cdot e^{-p\tau_{ij}},$$

Подавая на каждый вход объекта поочередно постоянный сигнал, на всех выходах получаем графики переходных процессов, из которых определяем  $k_{ij}$ ,  $T_{ij}$ ,  $\tau_{ij}$ .

$$W = \begin{pmatrix} \frac{0,2875}{372p+1}e^{-p \cdot 19} & \frac{0,02376}{2760p+1}e^{-p \cdot 443} & \frac{0,0128}{2330p+1}e^{-p \cdot 124} & \dots & \frac{0,0751}{3204p+1}e^{-p \cdot 950} \\ \frac{0,01242}{2720p+1}e^{-p \cdot 273} & \frac{0,2827}{217p+1}e^{-p \cdot 12} & \frac{0,06424}{2806p+1}e^{-p \cdot 845} & \dots & \frac{0,0263}{2026p+1}e^{-p \cdot 278} \\ \frac{0,0312}{2330p+1}e^{-p \cdot 180} & \frac{0,0372}{2408p+1}e^{-p \cdot 824} & \frac{0,0677}{860p+1}e^{-p \cdot 43} & \dots & \frac{0,0334}{2750p+1}e^{-p \cdot 621} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{0,0736}{3550p+1}e^{-p \cdot 681} & \frac{0,0252}{2957p+1}e^{-p \cdot 424} & \frac{0,01866}{2590p+1}e^{-p \cdot 528} & \dots & \frac{0,3453}{275p+1}e^{-p \cdot 17} \end{pmatrix}$$

Затем определяем модуль и фазу для каждой составляющей матрицы строим спектры Гершгорина (рис. 4).

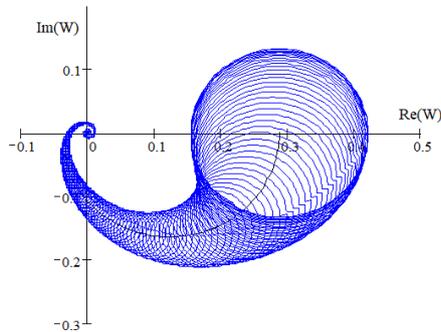


Рис. 4. Спектры Гершгорина по 2-ой секции объекта

Далее, с использованием полученных данных построим частотные характеристики объекта, с помощью которых производим расчет настроек распределенного регулятора.

Запишем передаточную функцию полученного регулятора:

$$W(x, y, p) = 10.51175 \cdot \left[ \frac{70.38632 - 1}{70.38632} - \frac{1}{70.38632} \nabla^2 \right] + \quad (12)$$

$$+ 0.012761 \cdot \left[ \frac{320.11007 - 1}{320.11007} - \frac{1}{320.11007} \nabla^2 \right] \cdot \frac{1}{p} + 155.95792 [1 - 0 \cdot \nabla^2] \cdot p$$

Далее был произведен анализ работы замкнутой системы управления.

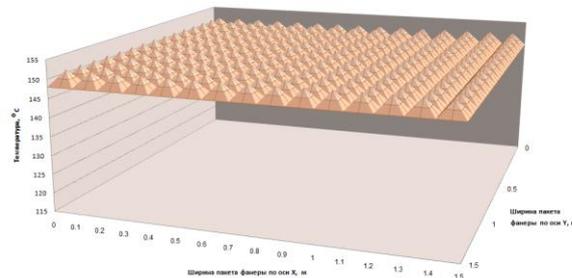


Рис. 5. График распределения теплового поля в среднем листе шпона

Применение распределенного регулятора позволило получить равномерное распределение теплового поля по всему объему пакета, что повышает качество готового продукта.

**Выводы.** В данной работе был рассмотрен вопрос автоматизации процесса склеивания фанеры. В полном объеме были решены задачи, сформулированные для достижения поставленной цели.

Полученная математическая модель позволяет с высокой точностью производить расчет времени, которое необходимо для прогрева пакета до заданной температуры в соответствии с технологическими требованиями, а рассчитанный распределенный регулятор повышает точность регулирования, что в свою очередь повысит качество фанеры.

Полученная модель может быть использована для проведения дальнейших исследований.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Александров Н.Л.* Лекции по теории устойчивости гидродинамических и тепловых процессов: учеб. пособие для студентов вузов. – М.: МФТИ, 2000. – 97 с.
2. *Бутковский А.Г., Пустыльников Л.М.* Теория подвижного управления системами с распределенными параметрами. – М.: Наука, 1980. – 383 с.
3. *Васечкин Ю.В.* Технология и оборудование для производства фанеры. – М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1983. – 310 с.
4. *Волков А.В. [и др.]*. Справочник фанерщика. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010. – 486 с.
5. *Волынский В.Н.* Технология клееных материалов: учеб. пособие для вузов. – Архангельск: Изд-во Архангельского государственного технического университета, 2003. – 280 с.
6. *Имаев Д.Х., Станиславски В.* Исследование динамики иерархических систем на примере парогенераторов. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 220 с.
7. *Калиткин Н.Н.* Численные методы. – М.: Наука, 1978.
8. *Кириллов А.Н., Карасев Е.И.* Технология фанерного производства. – М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1974. – 307 с.
9. *Кондратьев В.П., Кондрашенко В.И., Шредер В.Е.* Синтетические клеи в деревообработке. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2013. – 411 с.
10. *Кириллов А.Н., Карасев Е.И.* Технология фанерного производства. – М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1974. – 312 с.
11. *Ляшенко А.Л.* Синтез распределенной системы управления тепловыми полями в парогенераторных установках // Сб. трудов 7-й Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» (ССПС-2015). – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 131-138.
12. *Ляшенко А.Л.* Математическая модель тепловых процессов парового котла теплоэлектростанции // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2018. – № 5 (199). – С. 100-110.
13. *Ляшенко А.Л., Ильюшин Ю.В., Кучеренко И.А., Новожилов И.М.* Решение задачи моделирования поведения температурного поля в распределенных объектах управления // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2014. – № 7. – С. 48-51.
14. *Ляшенко А.Л.* Разработка программного обеспечения для моделирования тепловых полей в объектах с распределенными параметрами // Тр. XII Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления. Ч. II. – СПб.: СЗТУ, 2011. – С. 55-63.
15. *Ляшенко А.Л., Золотов О.И.* Математическое моделирование распределённого объекта управления с подвижным источником воздействия // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Информатика. Телекоммуникации. Управление». – 2011. – № 1 (115). – С. 113-117.
16. *Мельников А.А.* Расчет электромагнитных и температурных полей методом конечных элементов: учеб. пособие. – М.: Моск. ин-т радиотехники, электроники и автоматики, 2001. – 75 с.
17. *Першин И.М.* Анализ и синтез систем с распределенными параметрами. – Пятигорск: Рекламно-информационное агентство на КМВ, 2007. – 244 с.
18. *Рапопорт Э.Я.* Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2003. – 299 с.
19. *Станиславски В., Имаев Д.Х.* Динамические модели прямоточных парогенераторов как объектов управления иерархической структуры // Тр. Междунар. науч.-практич. конф. «Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России» (27-28 июня 2002). – СПб.: СПбГТУ, 2002. – С. 203-213.
20. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977.
21. *Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А.* Теплообмен. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 550 с.
22. *Чубов А.Б., Соколова Е.Г.* Основы теории и процесса склеивания древесины: учеб. пособие. – СПб.: СПбГЛТУ, 2014. – 66 с.
23. *Чубинский А.Н.* Технология фанеры: учеб. пособие. – СПб.: СПбГЛТУ 2019. – 81 с.

## REFERENCES

1. *Aleksandrov N.L.* Lektsii po teorii ustoychivosti gidrodinamicheskikh i teplovykh protsessov: ucheb. posobie dlya studentov vuzov [Lectures on the theory of stability of hydrodynamic and thermal processes: Textbook for university students]. Moscow: MFTI, 2000, 97 p.
2. *Butkovskiy A.G., Pustyl'nikov L.M.* Teoriya podvizhnogo upravleniya sistemami s raspredelennymi parametrami [The theory of mobile control of systems with distributed parameters]. Moscow: Nauka, 1980, 383 p.
3. *Vasechkin Yu.V.* Tekhnologiya i oborudovanie dlya proizvodstva fanery [Technology and equipment for the production of plywood]. Moscow: Izd-vo «Lesnaya promyshlennost'», 1983, 310 p.
4. *Volkov A.V. [i dr.]*. Spravochnik fanershchika [Plywood manufacturer's guide]. Saint Petersburg: Izd-vo Politekhnikeskogo universiteta, 2010, 486 p.
5. *Volynskiy V.N.* Tekhnologiya kleenykh materialov: ucheb. posobie dlya vuzov [Technology of glued materials: textbook for universities]. Arkhangel'sk: Izd-vo Arkhangel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2003, 280 p.
6. *Imaev D.Kh., Stanislavski V.* Issledovanie dinamiki ierarkhicheskikh sistem na primere parogeneratorov [Research of the dynamics of hierarchical systems on the example of steam generators]. Saint Petersburg: Izd-vo SPbGETU "LETI", 2011 6 220 з.
7. *Kalitin N.N.* Chislennyye metody [Numerical methods]. Moscow: Nauka, 1978.
8. *Kirillov A.N., Karasev E.I.* Tekhnologiya fanernogo proizvodstva [Technology of plywood production]. Moscow: Izd-vo «Lesnaya promyshlennost'», 1974, 307 p.
9. *Kondrat'ev V.P., Kondrashenko V.I., Shreder V.E.* Sinteticheskie klei v derevoobrabotke [Synthetic adhesives in woodworking]. Saint Petersburg: Izd-vo Politekhnikeskogo universiteta, 2013, 411 p.
10. *Kirillov A.N., Karasev E.I.* Tekhnologiya fanernogo proizvodstva [Technology of plywood production]. Moscow: Izd-vo «Lesnaya promyshlennost'», 1974, 312 p.
11. *Lyashenko A.L.* Sintez raspredelennoy sistemy upravleniya teplovymi polyami v parogeneratornykh ustanovkakh [Synthesis of a distributed control system for thermal fields in steam generating plants], *Sb. trudov 7-y Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii «Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika» (SSPS-2015)* [Proceedings of the 7th All-Russian scientific conference "System synthesis and applied synergetics" (SSPS-2015)]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 131-138.
12. *Lyashenko A.L.* Matematicheskaya model' teplovykh protsessov parovogo kotla teploelektrostantsii [Mathematical model of thermal processes of a steam boiler at a thermal power plant], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskije nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, No. 5 (199), pp. 100-110.
13. *Lyashenko A.L., Ilyushin Yu.V., Kucherenko I.A., Novozhilov I.M.* Reshenie zadachi modelirovaniya povedeniya temperaturnogo polya v raspredelennykh ob"ektakh upravleniya [Solving the problem of modeling the behavior of the temperature field in distributed control objects], *Izvestiya SPbGETU «LETI»* [Izvestia ETU "LETI"], 2014, No. 7, pp. 48-51.
14. *Lyashenko A.L.* Razrabotka programmnoy obespecheniya dlya modelirovaniya teplovykh poley v ob"ektakh s raspredelennymi parametrami [Development of software for modeling thermal fields in objects with distributed parameters], *Tr. XII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, studentov i aspirantov «Analiz i prognozirovanie sistem upravleniya. Ch. II* [Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Students and Postgraduates "Analysis and Forecasting of Control Systems. Part II]. Saint Petersburg: SZTU, 2011, pp. 55-63.
15. *Lyashenko A.L., Zolotov O.I.* Matematicheskoe modelirovanie raspredelennoy ob"ekta upravleniya s podvizhnym istochnikom vozdeystviya [Mathematical modeling of a distributed control object with a moving source of influence], *Nauchno-tehnicheskije vedomosti SPbGPU. Seriya «Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie»* [Scientific and technical statements of SPbSPU. Series "Informatics. Telecommunications. Management "], 2011, No. 1 (115), pp. 113-117.
16. *Mel'nikov A.A.* Raschet elektromagnitnykh i temperaturnykh poley metodom konechnykh elementov: ucheb. posobie [Calculation of electromagnetic and temperature fields by the finite element method: textbook]. Moscow: Mosk. in-t radiotekhniki, elektroniki i avtomatiki, 2001, 75 p.

17. *Pershin I.M.* Analiz i sintez sistem s raspredelennymi parametrami [Analysis and synthesis of systems with distributed parameters]. Pyatigorsk: Reklamno-informatsionnoe agentstvo na KMV, 2007, 244 p.
18. *Rapoport E.Ya.* Strukturnoe modelirovanie ob"ektov i sistem upravleniya s raspredelennymi parametrami [Structural modeling of objects and control systems with distributed parameters]. Moscow: Vysshaya shkola, 2003, 299 p.
19. *Stanislavski V., Imaev D.Kh.* Dinamicheskie modeli pryamotochnykh parogeneratorov kak ob"ektov upravleniya ierarkhicheskoy struktury [Dynamic models of direct-flow steam generators as control objects of hierarchical structure], *Tr. Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. "Teoreticheskie i prakticheskie problemy razvitiya elektroenergetiki Rossii" (27-28 iyunya 2002)* [Proceedings of the International. Scientific and practical conference "Theoretical and practical problems of the development of the Russian electric power industry" (June 27-28, 2002)]. Saint Petersburg: SPbGTU, 2002, pp. 203-213.
20. *Tikhonov A.N., Samarskiy A.A.* Uravneniya matematicheskoy fiziki [Equations of mathematical physics]. Moscow: Nauka, 1977.
21. *Tsvetkov F.F., Grigor'ev B.A.* Teplomassoobmen [Heat and mass transfer]. Moscow: Izd-vo MEI, 2005, 550 p.
22. *Chubov A.B., Sokolova E.G.* Osnovy teorii i protsessa skleivaniya drevesiny: ucheb. posobie [Fundamentals of the theory and process of gluing wood: textbook]. Saint Petersburg: SPbGLTU, 2014, 66 p.
23. *Chubinskiy A.N.* Tekhnologiya fanery: ucheb. posobie [Plywood technology: textbook]. Saint Petersburg: SPbGLTU 2019, 81 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Р. Бестугин.

**Ляшенко Александр Леонидович** – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: akuna\_matata\_kmv@mail.ru; Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79111049232; кафедра управления в технических системах; доцент.

**Liashenko Alexander Leonidovich** – Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: akuna\_matata\_kmv@mail.ru; Saint-Petersburg, Russia; phone: +79111049232; the department of control in technical systems; associate professor.

УДК 519.6

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-93-105

**Н.Н. Грачева, В.Н. Литвинов, А.В. Никитина, Н.Б. Руденко, А.Е. Чистяков**  
**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ РЕШЕНИЯ СЕТОЧНЫХ УРАВНЕНИЙ**  
**НА ГРАФИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЯХ**

*Для прогнозирования чрезвычайных ситуаций (ЧС) и необратимых последствий деятельности человека ученые широко применяется математическое моделирование. При возникновении ЧС очень важно минимизировать время принятия решения. Разработка проекта решения может основываться на прогнозе изменения моделируемого процесса. При численном решении задач гидрофизики и биологической кинетики возникает необходимость в разработке эффективных методов решения систем сеточных уравнений большой размерности с несамосопряженным оператором. Большой объем обрабатываемой информации и сложность вычислений приводят к необходимости использования вычислительных кластеров, в состав которых добавляются видеоадаптеры для увеличения производительности вычислительной системы и скорости обработки информации. Целью исследования является разработка программного модуля, реализующего алгоритм решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) модифицированным попеременно-треугольным итерационным методом (МПТМ) (самосопряженный и несамосопряженный случаи) с использованием технологии NVIDIA CUDA. Описан способ декомпозиции расчетной области в трехмерном случае. Предложена графовая модель организации параллельного конвейерного вычислительного процесса, ориентированная на графический ускоритель GPU*