

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 519.633.6:62-65

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО СИСТЕМОЙ ТЭНОВ ВНУТРИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПРЕССА

Сыромясов А.О.

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет,
г. Саранск

Поступила в редакцию 26.10.2022, после переработки 12.11.2022.

Работа посвящена численному моделированию системы трубчатых электронагревателей (ТЭНов), внедренных в стальную плиту (пресс), которая покоится на слое инородного материала – дерева или древесноволокнистой плиты МДФ. Целью расчетов является определение количества и мощности ТЭНов, обеспечивающих заданный прогрев пресса. Средняя температура на поверхности соприкосновения стали с МДФ задана, а перепад температур в различных точках этой поверхности не превышает определенного значения, диктуемого особенностями обрабатываемого материала. Результаты расчета внедрены на производстве.

Ключевые слова: начально-краевая задача для уравнения теплопроводности, математическое моделирование технологических процессов, нагревание твердого тела, ТЭН, метод конечных элементов.

Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2022. № 4. С. 11–23.
<https://doi.org/10.26456/vtprm651>

1. Постановка задачи

Важнейшая задача прикладной математики – реагирование на запросы специалистов в различных предметных областях и разрешение конкретных практических проблем, т.е. моделирование физических, химических, производственно-технологических и иных процессов. В настоящей статье приводится пример решения такой проблемы, возникающей в производстве панелей МДФ (medium-density fibreboard, т.е. древесноволокнистых плит средней плотности).

Один из этапов обработки таких панелей – прессование. Для этого образец МДФ, имеющий толщину $w = 3 - 6$ мм, укладывается на тонкий слой специальной бумаги и помещается на стальное основание, а сверху сдавливается прессом, который представляет собой плиту из стали марки 45 размером 2900×1300 мм и толщиной $h_1 = 40 - 50$ мм. Рабочая поверхность пресса составляет 2800×1200 мм. В

© Сыромясов А.О., 2022

этой плите практически на всю длину прорезаются пазы, куда внедряются одинаковые трубчатые электронагреватели (ТЭНы). С целью нанесения на МДФ узор между прессом и МДФ помещается стальной штамп толщины $h_2 = 5$ мм.

Глубина пазов для нагревателей составляет $\Delta h = 20$ мм, а диаметр цилиндрического ТЭНа, укладываемого вплотную к стенкам паза – 14–15 мм. Оставшиеся 5–6 мм глубины прорези заняты крышкой, замыкающей ее сверху (рис. 1).

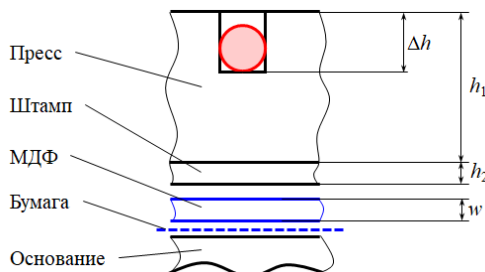


Рис. 1: Схема поперечного сечения пресса. Круг изображает один из ТЭНов

Пресс нагревается до высокой температуры (до 300°C); стальное нижнее основание поддерживается при меньшей температуре T_d – около 120°C .

Для достижения высокого качества прессования требуется выполнение двух условий:

1. Средняя температура поверхности контакта «сталь/МДФ» не должна быть ниже определенной температуры, определяемой в т.ч. исходя из сорта МДФ.
2. Нагрев контактной поверхности должен быть равномерным: перепад температур между разными ее точками не должен превышать 2° .

Требуется выяснить, какое количество ТЭНов N необходимо внедрить в пресс для выполнения перечисленных требований и какую суммарную мощность P_Σ должны иметь эти нагреватели.

Конкретным потребителем результатов данного исследования выступило ООО «ФАСТ САЙД» в г. Рузаевка.

С точки зрения общей теории описанная проблема сводится к решению нестационарного уравнения теплопроводности

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \nabla^2 T \quad (1)$$

внутри области, моделирующей пресс и МДФ-панель. Здесь и далее T – это температура, t – время, прошедшее с начала нагревания, c , ρ и κ – соответственно, теплоемкость, плотность и теплопроводность материала. Искомая мощность P_Σ входит в граничные условия (1) как регулируемый параметр, а число N в дальнейшем будет влиять на размеры расчетной области.

В данной работе расчет выполнен для материалов с характеристиками из Таблицы 1 [1, 2].

ТАБЛИЦА 1: Характеристики материалов

	Сталь 45	МДФ (марки ТСН-40)
c , Дж/(кг·К)	525	1200
ρ , кг/м ³	7750	900
κ , Вт/(м·К)	45	0.19...0.23

Далее величины, относящиеся к стали, будут обозначаться индексом «s», а относящиеся к МДФ – индексом «w»; например, $\rho_w = 900$ кг/м³.

Следует отметить, что исправить ошибку, допущенную при прорезании пазов в стальной плите, невозможно, поэтому неверный выбор N приводит пресс в негодность. Поскольку стоимость прессы весьма высока, ошибка в решении описанной задачи не просто ухудшает качество обработки МДФ (что снижает прибыль), но и приносит большие непосредственные убытки.

2. Геометрия и граничные условия

Для подготовки расчета предварительно выполним несколько упрощений.

Во-первых, пренебрежем слоем бумаги, проложенной между МДФ и основанием, ввиду тонкости этого слоя.

Во-вторых, вместо двух стальных плит (нагреваемого прессы и штампа) станем рассматривать одну сплошную плиту суммарной толщины $h = h_1 + h_2$. В действительности пресс и штамп соединяются только по краям, так что нижняя плита под действием тяжести может прогнуться относительно верхней. Однако этот прогиб весьма невелик, и вызванные им тепловые потери представляются пренебрежимо малыми; кроме того, возникший зазор можно учесть, задавая несколько более высокую мощность нагревателей, чем это будет предусмотрено расчетом.

В-третьих, хотя в поперечном сечении ТЭНов являются круглыми, будем считать, что они всюду плотно прилегают к стенкам паза; это позволит в дальнейшем задать однородные граничные условия на соответствующих поверхностях. Данное упрощение объясняется тем, что пустоты в пазах с ТЭНами заполняются терморастой, практически исключающей тепловые потери.

В-четвертых, верхнюю часть прессы можно считать теплоизолированной. Этого можно добиться, поместив на указанную поверхность слой материала с низкой теплопроводностью, такого, как стекловата.

Кроме того, поскольку площадь боковых граней прессы мала по сравнению с площадью поверхности контакта, не будем учитывать охлаждение стальных плит с торцевой части.

Наконец, будем считать, что количество ТЭНов N достаточно велико. Как было отмечено ранее, рабочая площадь стальной плиты практически совпадает с полной площадью ее нижней грани (с отступами по 50 мм от каждого из краев). Вместе эти обстоятельства позволяют считать, что наиболее равномерный нагрев будет достигнут, если разбить пресс на N равных продольных секций, по всей длине которых проходят пазы с нагревателями. Тогда в силу симметрии теплообмен между соседними секциями должен отсутствовать. Тепловой поток между зеркально-симметричными половинами одной и той же секции также равен нулю. Поэтому вместо всего стального прессы и помещенной под него панели МДФ в

качестве расчетной области достаточно рассмотреть только их фрагменты, соответствующие половине ширины одной из N секций (на рис. 2 они закрашены).

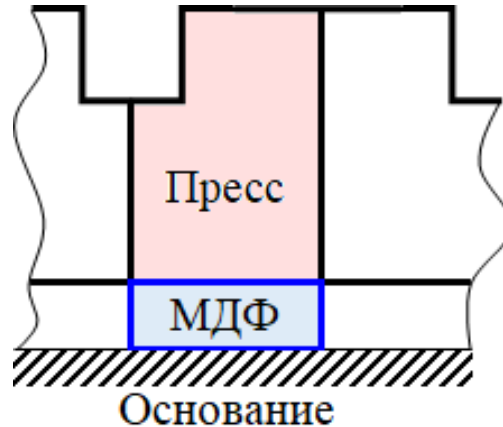


Рис. 2: Расчетная область задачи

Граничные условия задачи с полученной геометрией таковы. Через поверхность паза протекает тепловой поток, соответствующий мощности нагревателя. В связи с плотным прилеганием пресса и МДФ друг к другу на поверхности их раздела должны выполняться условия непрерывности температуры и теплового потока. На плоскости соприкосновения прессуемого образца и нижнего основания температура равна T_d (эта гипотеза будет обоснована позднее). Остальные поверхности в силу описанных выше упрощений теплоизолированы.

3. Оценка суммарной мощности нагревателей

Первый этап решения задачи – определение суммарной мощности ТЭНов, необходимой для нагревания пресса. Для этого примем, что распределение температуры установилось, и дополнительно упростим геометрию.

Полученная в предыдущем разделе статьи расчетная область является трехмерной и представляет собой призматическое тело большой протяженности (на рис. 2 показан его «вид спереди»). Пренебрежем «глубиной» области и тем самым перейдем из пространства в плоскость. Далее, временно будем предполагать, что моделируемый участок пресса в поперечном сечении имеет вид прямоугольника высоты $s = h - \Delta h$, а тепло к нему подводится равномерно через всю его верхнюю грань. В системе координат Oxy , в которой ось Ox разделяет пресс от древесно-волоконистой панели, расчетная область выглядит так, как показано на рис. 3.

Теплоперенос через боковые границы области отсутствует, поэтому температуры T_s внутри стальной плиты и T_w в образце МДФ являются функциями только переменной y . Следовательно, уравнение (1) принимает вид

$$\frac{d^2 T_s}{dy^2} = 0, \quad 0 < y < s; \quad \frac{d^2 T_w}{dy^2} = 0, \quad -w < y < 0. \quad (2)$$

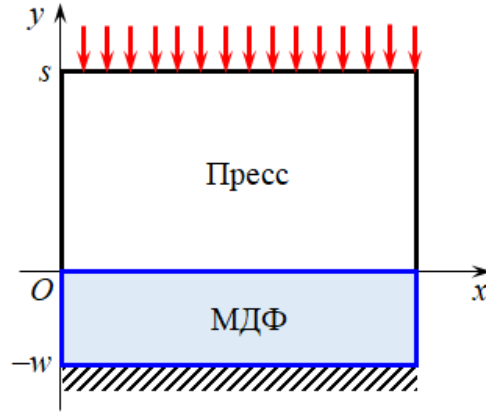


Рис. 3: Упрощенная геометрия для оценки суммарной мощности нагревателей

Укажем его граничные условия.

На верхней границе пресса задан тепловой поток постоянной интенсивности σ :

$$\left. \frac{dT_s}{dy} \right|_{y=s} = \sigma. \quad (3)$$

На границе двух различных материалов (при $y = 0$) температура и тепловой поток непрерывны, поэтому

$$T_s(0) = T_w(0) = T_0, \quad \kappa_s \left. \frac{dT_s}{dy} \right|_{y=0} = \kappa_w \left. \frac{dT_w}{dy} \right|_{y=0}. \quad (4)$$

Здесь T_0 – температура, до которой согласно условиям производства следует нагреть поверхность контакта «пресс/панель».

Дополнительным соотношением наиболее общего вида на нижней поверхности прессуемой панели служит условие третьего рода, при котором тепловой поток пропорционален разности температур между контактирующими телами:

$$\left. \frac{dT_w}{dy} \right|_{y=-w} = \alpha [T_w(-w) - T_d]. \quad (5)$$

Постоянный множитель α представляет собой коэффициент теплоотдачи.

Решением задачи (2)–(5) являются функции

$$\begin{aligned} T_s(y) &= T_d + \frac{\sigma}{\alpha \kappa_w} [(1 + \alpha w) \kappa_s + \alpha \kappa_w y], \\ T_w(y) &= T_d + \frac{\sigma \kappa_s}{\alpha \kappa_w} [1 + \alpha(w + y)]. \end{aligned} \quad (6)$$

Подстановка в любую из функций (6) значения $y = 0$ вместе с граничным условием (4) дает

$$T_0 = T_d + \frac{\kappa_s}{\kappa_w} \sigma \cdot \frac{1 + \alpha w}{\alpha};$$

отсюда тепловой поток, подводимый для обеспечения заданного нагрева, равен

$$\sigma = \frac{\alpha}{1 + \alpha w} \cdot \frac{\kappa_w}{\kappa_s} (T_0 - T_d). \quad (7)$$

Рассмотрим предельные случаи (5) и соответствующие им величины (7).

При $\alpha \rightarrow \infty$ равенство (5) переходит в условие первого рода

$$T_w(-w) = T_d,$$

а σ принимает значение

$$\sigma = \frac{\kappa_w}{\kappa_s} \cdot \frac{T_0 - T_d}{w}. \quad (8)$$

Напротив, при $\alpha \rightarrow 0$ получается условие второго рода

$$\left. \frac{dT_w}{dy} \right|_{y=-w} = 0, \quad (9)$$

которому, как легко убедиться, соответствует $\sigma = 0$.

Смысл последнего результата таков. Из (9) следует, что поток тепла через нижнюю сторону образца МДФ равен нулю, а согласно (4), потери энергии между панелью и прессом отсутствуют. Это значит, что тепло, подводимое через пресс, накапливается в МДФ, не рассеиваясь. Помимо этого, нагревание длится неопределенно долгое время (по нашим предположениям, процесс стационарен). При таких условиях любого сколь угодно малого потока тепла достаточно, чтобы нагреть поверхность раздела «пресс/панель» до любой заранее заданной температуры.

С другой стороны, в моделируемом процессе $\sigma \neq 0$. Поэтому из (6) следует, что при $\alpha \rightarrow 0$ величины $T_s(y)$ и $T_w(y)$ стремятся к бесконечности во всем диапазоне изменения y . Этот факт объясняется таким же образом, как и выше: тепло, подведенное к расчетной области, не рассеивается, вследствие чего она может нагреваться до бесконечных температур.

Итак, чем меньше коэффициент теплоотдачи, тем меньшей будет и потребная мощность нагревателей. Реальные значения α известны далеко не всегда, поэтому с целью повышения надежности расчета будем предполагать, что $\alpha \rightarrow \infty$; интенсивность теплового потока при этом должна вычисляться согласно (8) и является заведомо завышенной.

Перейдем к вычислению параметра P_Σ . Пусть площадь нагреваемой поверхности равна S_Σ , тогда на единицу площади приходится поток тепла P_Σ/S_Σ . С другой стороны, согласно закону Фурье, поток тепла, проходящий через сталь, равен

$$\kappa_s \frac{dT_s}{dy}.$$

Подставляя сюда (6) и приравнявая полученное выражение к P_Σ/S_Σ , найдем, что $P_\Sigma = \kappa_s \sigma S_\Sigma$. Наконец, используя (8), придем к окончательному ответу:

$$P_\Sigma = \kappa_w S_\Sigma \cdot \frac{T_0 - T_d}{w}. \quad (10)$$

Полученная формула логична: если потерь тепла между прессом и панелью нет, то мощность должна быть пропорциональна среднему градиенту температуры

в образце МДФ, площади, через которую передается тепло, а также коэффициенту теплопроводности МДФ.

Из (10) вытекает следующая рекомендация: для горячего прессования более выгодны сорта МДФ с меньшей теплопроводностью – это снижает необходимую для производственного процесса мощность нагревателей. Указанный результат также вполне объясним: при малой κ_w древесно-волоконистая плита выступает в роли изолятора, и тепло, подводимое от ТЭНов, не рассеивается, а сохраняется внутри стального пресса. Это приводит к повышению температуры T_0 на поверхности контакта, а значит, к более высокому качеству обработки материала.

Дальнейшие расчеты выполняются при следующих параметрах: $T_0 = 300^\circ\text{C}$, $T_d = 120^\circ\text{C}$, $S_\Sigma = 2.9 \times 1.3 \text{ м}^2$, $h_1 = 50 \text{ мм}$, $h_2 = 5 \text{ мм}$, $w = 5 \text{ мм}$ и $\kappa_w = 0.23 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Согласно (10), это дает $P_\Sigma = 31215.6 \text{ Вт}$. Еще немного завышая мощность для надежности, будем далее считать, что $P_\Sigma = 31500 \text{ Вт}$.

4. Зависимость целевого перепада температур от параметров задачи

Для определения числа N нагревателей, при котором перепад температур на поверхности «сталь/МДФ» не превышает заданной величины, нельзя ограничиваться геометрией рис. 3. Следует учитывать, что вырезы, куда помещаются ТЭНы, придают верхнему краю пресса достаточно сложную форму.

Как уже было отмечено, расчетной областью при численном моделировании изучаемого процесса может служить половина одной из N равных секций, на которые условно разделяется стальной пресс, и присоединенный к ней участок плиты МДФ. Ширина такой области (в мм) составляет

$$L = \frac{1300}{2N},$$

и на нее приходится $1/2$ от мощности одного ТЭНа.

Для ускорения расчета станем рассматривать укороченные секции, протяженность которых составляет 145 мм, т.е. $1/20$ часть от полной длины пресса. Мощность P нагревателя, приходящаяся на такой участок пресса, равна

$$P = \frac{P_\Sigma}{N} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{20} = \frac{P_\Sigma}{40N}.$$

Двухслойная область, получаемая в итоге всех произведенных упрощений, изображена на рис. 4.

Ее нижний слой соответствует панели МДФ. Тепло подводится к двум верхним продольным граням, находящимся под прямым углом друг к другу, причем тепловой поток распределен по их площади равномерно.

Итак, при изменении N меняются размеры расчетной области и количество теплоты, передаваемое ей в единицу времени. В зависимости от этих параметров изменяется распределение температуры на плоскости контакта МДФ-панели со стальным прессом. Чтобы выяснить, какое количество ТЭНов необходимо для достижения требуемой однородности в распределении температуры, выполним расчет при различных значениях N и сравним результаты. По-прежнему будем считать процесс нагревания стационарным.

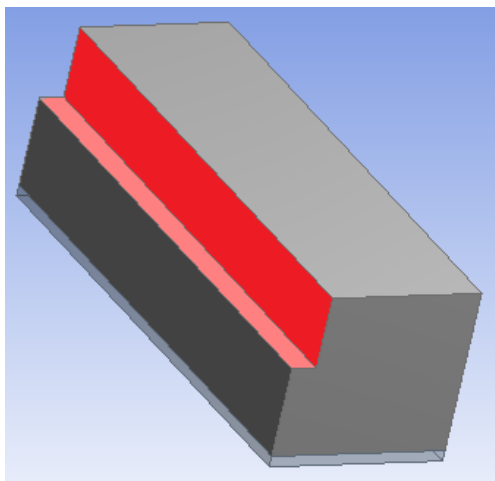


Рис. 4: Трехмерная расчетная область

Уравнение теплопроводности в области сложной формы должно решаться приближенно, например, методом конечных элементов [3]. Для этого может быть применено такое программное обеспечение, как ANSYS Workbench [4], его отечественный аналог ЛОГОС [5] или свободно распространяемый пакет OpenFOAM [6].

Объем, внутри которого отыскивается температурное поле, разбивается на две подобласти (сталь и МДФ) с разными тепловыми свойствами; вблизи границы раздела этих подобластей могут возникать резкие перепады температуры, которые необходимо корректно отслеживать. С этой целью расчетная сетка была настроена следующим образом. В подобласти, описывающей прессуемую панель, размер ячейки сетки был установлен равным 1.25 мм; это позволило разбить образец МДФ на несколько расчетных слоев. В объеме, моделирующем стальной пресс, к сетке была применена инфляция – постепенное измельчение ячеек при приближении к границе раздела сред. Всего создавалось пять инфляционных слоев, причем каждый последующий был вдвое тоньше предыдущего.

Основные результаты расчетов отражены в Таблице 2.

ТАБЛИЦА 2: Результаты расчетов

N	7	10	13
L , мм	93	65	50
P , Вт	112.5	78.75	60.58
T_{\min} , °C	298.03	300.50	301.22
T_{\max} , °C	305.39	302.90	302.11
ΔT , °C	7.36	2.40	0.89

Обозначения L и P введены выше, величины T_{\min} и T_{\max} отвечают минимальному и максимальному значению температуры на плоскости контакта, $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ есть искомая разница температур.

Из приведенных данных вытекает, что при росте N значение ΔT падает. Действительно, увеличение количества нагревателей и пропорциональное уменьшение мощности каждого из них должно приводить к более равномерному распределению температуры. Отметим также, что среднее арифметическое $(T_{\min} + T_{\max})/2$ при каждом N достаточно точно совпадает с изначально заданной средней температурой поверхности T_0 .

Минимально допустимым количеством ТЭНов при заданной T_0 служит $N = 10$, при котором разница $\Delta T = 2.40^\circ\text{C}$ близка к целевому значению 2°C .

Как было отмечено ранее, отменить однажды сделанный выбор числа ТЭНов практически невозможно. С другой стороны, согласно условиям производства, в ряде случаев допустимо снижать среднюю температуру поверхности T_0 до 250° и даже 220° ; толщина МДФ-панели также может меняться. При этом равномерность нагрева поверхности раздела остается критичным условием. Отсюда возникает вопрос: как ΔT зависит от параметров P_Σ и w при заданном N ?

Проведенная серия численных экспериментов показывает, что при прочих равных условиях ΔT прямо пропорционально P_Σ . Напротив, при фиксированных N , P_Σ и T_d величина ΔT практически не зависит от толщины w ; однако при увеличении w растет и T_0 .

5. Оценка времени нагревания прессы

Все предыдущие рассуждения основывались на предположении, что распределение тепла внутри стали и МДФ стационарно. Однако в начале процесса указанные материалы находятся при температуре, равной температуре воздуха в производственном помещении T_{air} и весьма далекой от T_0 : так, в холодное время года $T_{air} = 8^\circ\text{C}$. Оценим, за какое время Δt , подводя к прессу тепловой поток с мощностью P_Σ , его можно прогреть до T_0 .

Сначала проведем простейший аналитический расчет. Прессу необходимо сообщить количество теплоты Q , равное

$$Q = c_s m (T_0 - T_{air});$$

здесь m – масса плиты. Пренебрегая вырезами, в которые внедрены нагреватели (их объем сравнительно невелик), получим, что $m \approx \rho_s S_\Sigma h$.

Наконец, учитывая, что $Q = P_\Sigma \Delta t$, придем к оценке

$$\Delta t = \frac{c_s \rho_s S_\Sigma h (T_0 - T_{air})}{P_\Sigma}. \quad (11)$$

Подставляя сюда геометрические параметры стальной плиты, а также физические характеристики стали из табл. 1, найдем, что при выбранном нами значении $P_\Sigma = 31500$ Вт длительность нагревания превышает 2 ч. и составляет $\Delta t = 7820.55$ с.

Значение Δt , рассчитанное согласно (11), является заниженным, что объясняется двумя основными причинами. Во-первых, до температуры T_0 прогревается не весь пресс, а лишь его нижняя часть, по которой происходит соприкосновение с прессуемой панелью. Верхняя часть стальной плиты нагревается сильнее, что требует подведения большего количества теплоты. Во-вторых, пресс не является изолированным: часть тепла уходит в находящуюся под ним МДФ-панель.

Полученная оценка была подтверждена численным моделированием. Результаты нестационарного расчета, выполненного для $N = 13$ при перечисленных ранее параметрах модели, показывают, что за 9000 с. (2.5 ч.) средняя температура поверхности контакта изменяется с T_{air} до 251.7°C , не достигая $T_0 = 300^\circ\text{C}$. Заказчик расчета также подтверждает, что при реальных запусках оборудования прогрев занимает около 3 ч.

Заключение

В рамках описанного исследования моделировалось нагревание стального прессы, выполняемое в ходе производства МДФ-панелей. Основной задачей, решенной в ходе расчетов, было определение количества ТЭНов, внедряемых в пресс и обеспечивающих ему заданную равномерность нагрева.

Анализ результатов моделирования позволил сделать еще несколько практически важных выводов. В частности, оказалось, что в производственном процессе выгоднее использовать МДФ с меньшей теплопроводностью, поскольку это способствует более эффективному прогреву прессы. Кроме того, была получена оценка для времени прогрева прессы до заданной температуры.

Руководитель ООО «ФАСТ САЙД», по предложению которого выполнялись расчеты, отмечает, что внедрение их результатов в практику позволило повысить качество производимой продукции.

Список литературы

- [1] Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- [2] Межгосударственный стандарт ГОСТ 4598–2018. Плиты древесноволокнистые мокрого способа производства. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 15 с.
- [3] Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.
- [4] Бруйка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. Самара: Самарский государственный технический университет, 2010. 271 с.
- [5] ЛОГОС [Электронный ресурс] // Официальный сайт РФЯЦ–ВНИИЭФ. URL: <http://logos.vniief.ru> (дата обращения: 09.10.2022).
- [6] OpenFOAM [Электронный ресурс] // OpenFOAM Free CFD Software. URL: <https://openfoam.org> (дата обращения: 09.10.2022).

Образец цитирования

Сыромясов А.О. Расчет температурного поля, создаваемого системой ТЭНов внутри металлического прессы // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2022. № 4. С. 11–23. <https://doi.org/10.26456/vt.pmk651>

Сведения об авторах**1. Сыромясов Алексей Олегович**

доцент кафедры прикладной математики, дифференциальных уравнений и теоретической механики факультета математики и информационных технологий Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва.

Россия, 430005, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68/1, Мордовский государственный университет. E-mail: syal1@yandex.ru

CALCULATION OF TEMPERATURE FIELD GENERATED BY A SYSTEM OF TURBULAR ELECTRIC HEATING ELEMENTS INSIDE A METAL PRESS

Syromiasov Aleksei Olegovich

Associate Professor at the department of Applied Mathematics, Differential
Equations and Theoretical Mechanics, Ogarev Mordovia State University
*Russia, 430005, Saransk, Bolshevistskaya str., 68/1,
Ogarev Mordovia State University.*
E-mail: syal1@yandex.ru

Received 26.10.2022, revised 12.11.2022.

The paper is devoted to numerical simulation of a system of turbular electric heating elements that are embedded in a steel plate (a press) basing on a slice of some other material, i.e. wood or MDF. Calculation purpose is to find the number and the power of heating elements that guarantee preselected heating regime of the press. In more detail, average temperature on the contact surface of the press and MDF is given, and temperature drop on this surface must not exceed some value determined by the properties of material under treatment. The simulation results are adopted by a certain company producing wood-fibre boards.

Keywords: initial-boundary problem for heat equation, mathematical modelling of technological processes, heating of a solid body, turbular electric heating element, finite-element method.

Citation

Syromiasov A.O., "Calculation of temperature field generated by a system of turbular electric heating elements inside a metal press", *Vestnik TsvGU. Seriya: Prikladnaya Matematika [Herald of Tver State University. Series: Applied Mathematics]*, 2022, № 4, 11–23 (in Russian). <https://doi.org/10.26456/vtppmk651>

References

- [1] Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovskij A.M. i dr., *Fizicheskie velichiny: spravochnik [Physical quantities: reference]*, eds. I.S. Grigorev, E.Z. Mejlikhov, Energoatomizdat Publ., Moscow, 1991 (in Russian), 1232 pp.
- [2] *Interstate standard GOST 4598–2018. Wood-fiber plates of the wet production method. Technical conditions*, Standartinform, Moscow, 2019 (in Russian), 15 pp.
- [3] Segerlind L., *Primenenie metoda konechnykh elementov [Application of the finite element method]*, Mir Publ., Moscow, 1979 (in Russian), 392 pp.
- [4] Bruyaka V.A., Fokin V.G., Soldusova E.A., Glazunova N.A., Adeyanov I.E., *Inzhenernyj analiz v ANSYS Workbench [Engineering Analysis in ANSYS Workbench]*, Samara State Technical University, Samara, 2010 (in Russian), 271 pp.

-
- [5] *LOGOS*, Ofitsialnyj sajt RFYaTs-VNIIEF (in Russian), <http://logos.vniief.ru> (accessed at 09.10.2022).
- [6] *OpenFOAM*, OpenFOAM Free CFD Software (in Russian), <https://openfoam.org> (accessed at 09.10.2022).