

Липецкий государственный технический университет

Факультет автоматизации и информатики
Кафедра прикладной математики

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

по направлению 01.04.04 Прикладная математика
тип программы Академическая
профиль Математическое моделирование в экономике и технике

Математическое моделирование энергосиловых и тепловых режимов на
станах холодной прокатки

Студент

Группа МПМ-15-1

Руководитель

к.ф.-м.н., доцент

учёная степень, учёное звание

Нормоконтроль

программного обеспечения

оформления работы

Рецензент

к.т.н., доцент, начальник

отдела ЭТС ТУ ПАО

«НЛМК»

уч. ст., уч. зв., должность

подпись, дата

подпись, дата

подпись, дата

подпись, дата

подпись, дата

Беляев Д.Ю.

фамилия, инициалы

Орешина М.Н.

фамилия, инициалы

Сысоев А.С.

фамилия, инициалы

Сысоев А.С.

фамилия, инициалы

Бахтин С.В.

фамилия, инициалы

Работа рассмотрена кафедрой и допущена к защите в ГЭК

Зав. кафедрой

Галкин А.В.

09.06.2017 г.

Липецк 2017 г.

Липецкий государственный технический университет

**Факультет ФАИ
Кафедра ПМ**

Зав. кафедрой Галкин А.В.
_____ «16» мая 2017 г.

**ЗАДАНИЕ НА ВЫПОЛНЕНИЕ
ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

Студенту **Беляеву Дмитрию Юрьевичу** **группы МПМ-15-1**

1. **Тема** Математическое моделирование энергосиловых и тепловых режимов на станах холодной прокатки
2. **Исходные данные** Данные полученные входе преддипломной практики, техническая документация, научная и справочная литература.
3. **Ожидаемые результаты** Разработка и программная реализация математических моделей энергосиловых и тепловых режимов на станах холодной прокатки.
4. **Срок сдачи работы руководителю** 02.06.2017 г.
5. **Консультант** к.т.н., с.н.с., главный специалист по прокатному производству ПАО «НЛМК» Пименов В.А.
6. **Дата выдачи задания** 16.05.2017 г.
7. **Руководитель работы**

_____ /Орешина М.Н./

8. **Задание принял к исполнению студент**

_____ /Беляев Д.Ю./

АННОТАЦИЯ

С. 72. Ил. 30. Табл. 53. Литература 15 назв. Прил. 1

В работе исследуется задача о моделировании энергосиловых и тепловых характеристик в очаге деформации и межклетвых прометутках на непрерывных и реверсивных станах холодной прокатки, а также расчет максимальных скалывающих напряжений в нейтральном сечении по радиусу вала. Для моделирования энергосиловых режимов решается уравнение равновесия Т. Кармана, а для тепловых режимов используется уравнение теплопроводности с различными краевыми условиями.

Разработан программный комплекс, позволяющий рассчитать энергосиловые и тепловые режимы, а также максимальные скалывающие напряжения. Результаты моделирования при различных входных данных могут быть использованы для подбора оптимальных параметров прокатки.

ГРАФИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Слайд 1. Цель и задачи	1
Слайд 2. Прокатное производство	1
Слайды 3-4. Моделирование энергосиловых режимов	2
Слайд 5. Моделирование тепловых режимов в очаге деформации. Полоса	1
Слайд 6. Моделирование тепловых режимов в очаге деформации. Валок	1
Слайд 7. Моделирование тепловых режимов на межклетевом промежутке	1
Слайд 8. Максимальные скалывающие напряжения	1
Слайд 9. Модуль редактирования файла с технологическими параметрами	1
Слайд 10. Программа для вычисления распределения температур прокатного производства (ХП). Расчет	1
Слайд 11. Графическое представление некоторых энергосиловых и тепловых характеристик	1
Слайд 12. Полоса в продольном сечении	1
Слайд 13. Полоса в поперечном сечении	1
Слайды 14-17. Настройка коэффициентов теплообмена	4
Слайд 18. Выводы	1
Слайды 19-20. Публикации	2
Всего слайдов	20

Оглавление

Введение	5
1 Разработка математической модели очага деформации	8
1.1 Моделирование энергосиловых режимов	8
1.2 Формализация задачи расчета напряженно-деформированного состояния рабочего слоя валка в контакте с полосой	14
1.3 Моделирование тепловых режимов для полосы и валков в очаге деформации	16
2 Разработка математической модели для межклетевого проме- жутка	20
2.1 Формулировка краевой задачи для межклетевого промежутка	20
2.2 Сведение полученной дифференциальной задачи к конечно- разностной	21
3 Разработка комплекса прикладных программ для решения по- ставленных задач	22
3.1 Краткое описание модулей	22
3.2 «Редактор ini.txt»	22
3.3 Руководство оператора	29
3.4 «Программа для вычисления распределения температур про- катного производства (ХП)»	34
3.5 Руководство оператора	42
4 Настройка коэффициентов теплообмена	52
4.1 Марка стали 08Ю	52
4.2 Марка стали 0303	58
4.3 Марка стали ВПС	64
Заключение	68
Список использованных источников	69
Приложения	71

Введение

Процесс пластической деформации между двумя или несколькими вращающимися рабочими валками называется прокаткой. Для холодной прокатки исходным материалом являются горячекатаные рулоны, получаемые на горячей прокатке при помощи непрерывных широкополосных станов [1]. Прокатка осуществляется различными способами [2], которые отличаются:

- направлением обработки (продольная, поперечная и винтовая);
- режимом станов (непрерывный и реверсивный);
- состоянием металла;
- формой изделия.

Тепло, выделяемое в процессе проката, формируется из двух компонент:

- деформация полосы, при которой выделяется большое количество тепла, неравномерно нагревающего валки и изменяющего их профиль;
- трение при контакте валков о прокатываемую полосу.

В прокатном производстве распределение температур на полосе существенно влияет на физико-механические свойства стали. Перегрев валков ведет к уменьшению срока их эксплуатации, а также к нарушению профиля валков, что приводит к ухудшению качества проката [3]. Следовательно, задача моделирования тепловых режимов на стане является актуальной. На рисунках 1 и 2 представлена общая схема непрерывного и реверсивного стана холодной прокатки.

Целью работы является разработка программного обеспечения для расчета энергосиловых параметров прокатки, тепловыделения и распределения температур по поверхности и толщине полосы в очаге деформации и межклетевых промежутках, поверхности и глубине рабочего слоя валков, а также расчет напряженно деформируемого состояния рабочего слоя валка в контакте с полосой.

Для достижения поставленной цели сформулируем следующие задачи:

- расчет энергосиловых параметров;

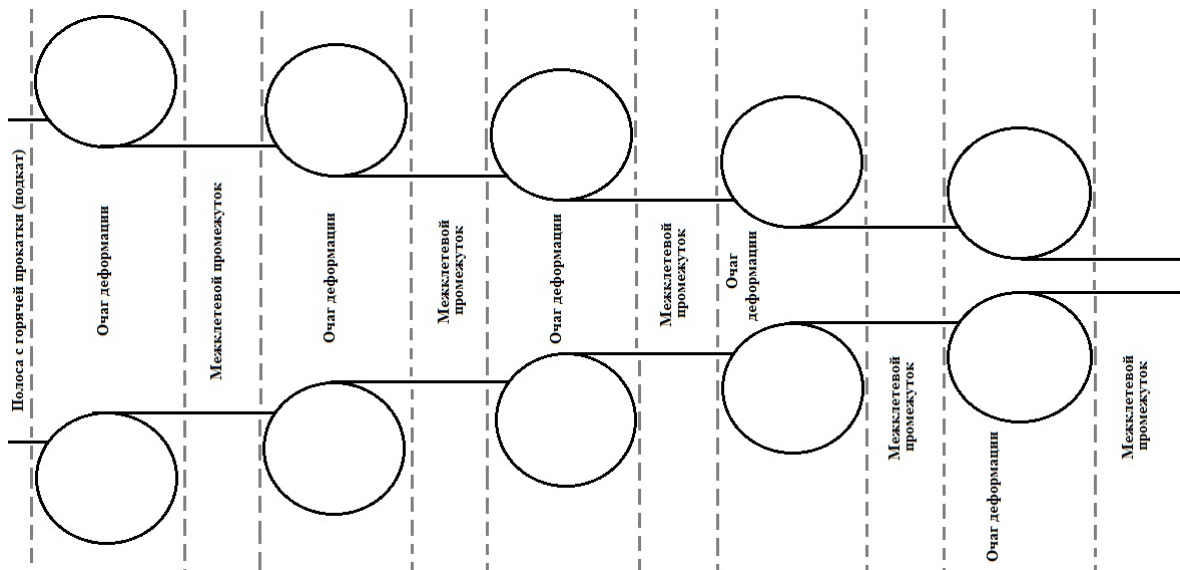


Рисунок 1 – Общая схема непрерывного стана холодной прокатки

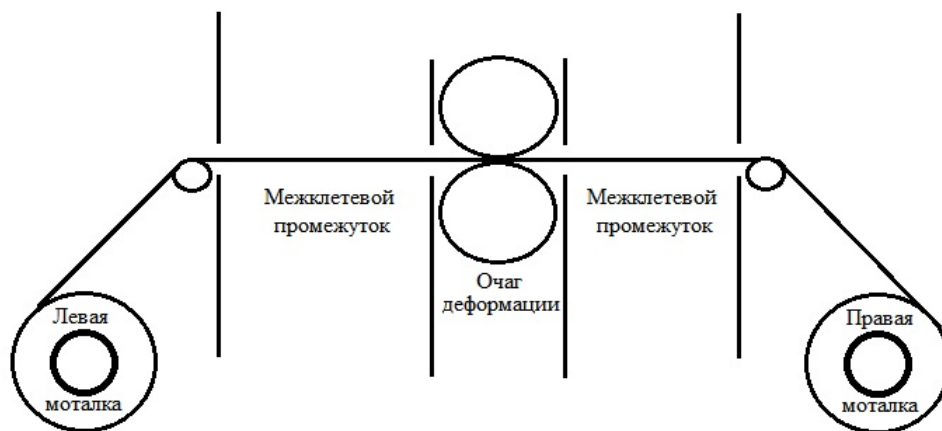


Рисунок 2 – Общая схема реверсивного стана холодной прокатки

- формулировка краевых задач для очага деформации и межклетевого промежутка;
- сведение полученной дифференциальной задачи к конечно-разностной;
- формализация задачи расчета напряженно-деформированного состояния рабочего слоя рабочего вала в контакте с полосой;
- разработка комплекса прикладных программ.

В главе 1 рассматривается математическое моделирование очага деформации, включающая моделирование энергосиловых режимов, расчет напряженно-деформированного состояния рабочего слоя вала в контакте с полосой и моделирование тепловых режимов для полосы и валков в очаге деформации. В главе 2 рассматривается математическая модель межклетевого промежутка. В главе 3 представлена программная реализация математических моделей описанных в главах 1 и 2. В главе 4 представлены расчеты программы.

Некоторые результаты работы опубликованы в сборниках материалов научной конференции по проблемам технических наук за 2014г. [4] и 2015г. [5], VII Международной студенческой электронной научной конференции РАЕ «Студенческий научный форум 2015» [6] и XII научно – практической конференции с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство» [7].

1 Разработка математической модели очага деформации

1.1 Моделирование энергосиловых режимов

1.1.1 Расчет контактных напряжений

Рассмотрим k -й очаг деформации. Пусть L – длина очага деформации, x – координата по очагу деформации. Для нахождения контактного напряжения $p_{contact}$ необходимо решить уравнения равновесия Т.Кармана [3] в очаге деформации:

$$dp = \left(K_c + \frac{\mu_k p}{\operatorname{tg} \phi} \right) \frac{dh}{h}, \quad (1)$$

$$dp = \left(K_c - \frac{\mu_k p}{\operatorname{tg} \phi} \right) \frac{dh}{h}, \quad (2)$$

где K_c – сопротивление деформации полосы (см. ниже); μ_k – коэффициент трения; ϕ – угол между касательной к поверхности валка и горизонтальной плоскостью; h – функция, описывающая изменение толщины полосы в очаге. Решение уравнения 1 будем обозначать через p_{back} , а решение уравнения 2 через p_{forw} . Контактное напряжение $p_{contact}$ задается формулой

$$p_{contact}(x) = \min_{x \in [0, L]} [p_{back}(x); p_{forw}(x)].$$

Нам понадобится также информация о нейтральном сечении, то есть точке x^* пересечения решений уравнений 1 и 2, и толщине $h_{neutr} = h(x^*)$ в нейтральном сечении. Длина очага деформации определяется по формуле

$$L = \sqrt{R_c \cdot (H_{k-1} - H_k)}, \quad (3)$$

где H_k – толщина полосы на входе в очаг; H_{k-1} – толщина полосы на выходе из очага; R_c – радиус деформированного валка в результате упругого сплющивания валков в контакте. Расчет R_c осуществляется по фактическому усилию прокатки $P_{пр}$ по формуле С.С. Чепуркина [3]

$$R_c = R \left[1 + \frac{C_b \cdot \theta \cdot F_k}{(H_{k-1} - H_k) \cdot width} \right], \quad (4)$$

где R — исходный радиус валка; $\theta = \frac{1 - \nu^2}{\pi E}$ — константа упругих свойств материала валка (ν — коэффициент Пуассона, E — константа Юнга); $C_b = 14,4$ — коэффициент параболической формы эпюры нагружения валка; $width$ — ширина полосы; F_k — фактическое усилие прокатки. Зная длину L очага деформации [3](#), можно вычислить время моделирования очага $t_{max_k} = \frac{L}{V_k}$.

Для дальнейших расчетов проведем дискретизацию по очагу деформации. Пусть M — число точек в очаге деформации (равное числу точек по времени), $x_{step} = \frac{L}{M}$ — шаг по очагу, $x_i = i \cdot x_{step}$ — расчетные узлы по очагу, $\tau = \frac{t_{max_k}}{M}$ — шаг по времени, $t_i = i \cdot \tau$ — расчетные узлы по времени, $h_i = h(x_i)$ — толщина полосы в i -ом узле (в x_i месте на очаге деформации). Аналогично для значений остальных функций в i -ом узле будем использовать обозначения p_{back_i} , p_{forw_i} , K_{c_i} , $p_{contact_i}$. Для толщины полосы справедлива [\[8\]](#) формула

$$h_i = H_k + \frac{x_i^2}{R_c}.$$

Для задания начальных условий для уравнений [1](#) и [2](#), вычислим [\[8\]](#) минимальные давления p_{back_0} и p_{forw_0} валков на входе в очаг деформации и на выходе из него по формулам

$$p_{back_0} = 1.15 \cdot \sigma_{in} - \sigma_{back}, \quad (5)$$

$$p_{forw_0} = 1.15 \cdot \sigma_{out} - \sigma_{forw}, \quad (6)$$

где $\sigma_{in}, \sigma_{out}$ — пределы текучести при растяжении на входе в очаг деформации и на выходе из него; $\sigma_{back}, \sigma_{forw}$ — продольное напряжение (растягивающие напряжения) в полосе на входе в очаг деформации и на выходе из очага. Пределы текучести при растяжении рассчитаем следующим образом

$$\sigma_{in} = \sigma_{T_0} + b \left(\frac{H_0 - H_{k-1}}{H_0} \cdot 100 \right)^c, \quad (7)$$

$$\sigma_{out} = \sigma_{T_0} + b \left(\frac{H_0 - H_k}{H_0} \cdot 100 \right)^c, \quad (8)$$

где σ_{T_0} — предел текучести подката; b, c — коэффициенты упрочнения полосы; H_0 — толщина подката. Продольные напряжения (растягивающие напряжения) в полосе на входе в очаг деформации и на выходе из очага определим соотношениями

$$\sigma_{back} = \frac{T_b}{H_{k-1} \cdot width}, \quad (9)$$

$$\sigma_{forw} = \frac{T_f}{H_k \cdot width}, \quad (10)$$

где T_b и T_f — полное переднее и заднее натяжение. Сопротивление деформации полосы рассчитывается [8] по формуле

$$K_{c_i} = 1.15 \cdot \sigma_{T_i}, \quad (11)$$

где предел текучести полосы $\sigma_{T_i}(h)$ определяется соотношением

$$\sigma_{T_i} = \sigma_{T_0} + b \left(\frac{H_0 - h_i}{H_0} \cdot 100 \right)^c. \quad (12)$$

Здесь σ_{T_0} — предел текучести подката; b, c — коэффициенты упрочнения полосы; H_0 — толщина подката.

Находим изменения толщины полосы и сопротивления полосы

$$\Delta h_i = h_i - h_{i-1}, \quad (13)$$

$$\Delta K_{c_i} = K_{c_i} - K_{c_{i-1}}. \quad (14)$$

Выпишем итоговые формулы расчета контактных напряжений p_{back_i} и p_{forw_i} соответствующим уравнениями 1 и 2:

$$p_{back_i} = p_{back_{i-1}} + \Delta K_{c_i} + K_{c_i} \cdot \frac{\Delta h_i}{h_i} + \frac{\mu_k \cdot p_{back_i} \cdot 2 \cdot x_{step}}{h_i}, i = 1, \dots, M, \quad (15)$$

$$p_{forw_i} = p_{forw_{i-1}} - \Delta K_{c_i} + K_{c_i} \cdot \frac{\Delta h_i}{h_i} + \frac{\mu_k \cdot p_{forw_i} \cdot 2 \cdot x_{step}}{h_i}, i = 1, \dots, M. \quad (16)$$

Напомним, что p_{back_0} и p_{forw_0} определяются по формулам 5 и 6. Тогда контактное напряжение определяется формулой

$$p_{contact_i} = \min [p_{back_i}; p_{forw_i}]. \quad (17)$$

Номер точки, соответствующей нейтральному сечению, можно рассчитать по формуле

$$i^* = \arg \min_i |p_{back_i} - p_{forw_i}|.$$

Положение нейтрального сечения можно рассчитать по формуле $x^* = x_{i^*}$. Тогда

$$h_{neutr} = h_{i^*}. \quad (18)$$

1.1.2 Нахождение коэффициентов трения

После расчета контактного напряжения $p_{contact_k}$ можно определить расчетные усилия прокатки \tilde{F}_k как суммарное давление по площади контакта D_k , то есть

$$\tilde{F}_k = \iint_{D_k} p_{contact_k}(x, y) dx dy.$$

Считая, что $p_{contact_k}$ не меняется по ширине полосы, получаем

$$\tilde{F}_k = \int_0^L p_{contact_k}(x) dx,$$

или в дискретном варианте

$$\tilde{F}_k = width \sum_{i=0}^N p_{contact_k} \cdot x_{step}. \quad (19)$$

Коэффициенты трения определяются обратным пересчетом по фактическому усилию прокатки. Опишем эту идею подробнее. Для нахождения коэффициента трения μ_k на k -ом очаге задается начальное приближение μ_k^0 . Затем для $j = 1, 2, \dots$ выполняются следующие действия [9].

Шаг 1. В соответствии с пунктом 1.1.1 рассчитать значения контактного напряжения $p_{contact_k}$ и определить расчетные усилия по формуле 19, соответствующие значению коэффициенту трения μ_k^j .

Шаг 2. В случае выполнения условия $|F_k - \tilde{F}_k^j| < \zeta$ коэффициент трения принять равным $\mu_k = \mu_k^j$ и остановить процесс. Иначе пересчитать

коэффициенты трения с помощью формулы

$$\mu_k^{j+1} = \begin{cases} \mu_k^j - \epsilon, & F_k < \tilde{F}_k^j - \zeta, \\ \mu_k^j + \epsilon, & F_k > \tilde{F}_k^j + \zeta \end{cases}$$

и перейти к шагу 1. В качестве ϵ , например, можно использовать значение порядка 10^{-4} , а в качестве ζ величину 0,1 % F_k . Для исключения заикливания процесса в случае плохого начального приближения необходимо использовать контроль превышения числа итераций. В таблице 1 приведены результаты численных экспериментов подбора коэффициентов трения при различных значениях усилий для 5 клетового стана холодной прокатки 2030. При этом разница между фактическими и расчетными усилиями не превышает 0,1 %.

Таблица 1 – Нахождение коэффициентов трения

№ опыта	Фактические усилия (заданные)	Коэффициенты трения (расчетные)	Расчетные усилия
1	1090	0,033	1090,41
	1071	0,0355	1071,42
	1107	0,0441	1107,46
	949	0,0423	948,465
	927	0,0288	926,478
2	1290	0,0658	1289,28
	1571	0,0878	1570,79
	1307	0,0607	1307
	1249	0,0631	1248,77

Окончание таблицы 1

№ опыта	Фактические усилия (заданные)	Коэффициенты трения (расчетные)	Расчетные усилия
	1327	0,047	1327,31
3	1390	0,0825	1389,24
	1371	0,0685	1370,13
	1407	0,0677	1406,99
	1449	0,0723	1448,71
	1427	0,0499	1427,64
4	1143	0,041	1142,22
	1171	0,0466	1170,36
	1471	0,0718	1470,47
	1224	0,0617	1223,61
	1006	0,0334	1005,91
5	1443	0,0908	1442,26
	1401	0,0716	1400,47
	1353	0,0639	1352,9
	1024	0,0487	1023,81
	1506	0,0518	1505,48

1.1.3 Моделирование тепловых источников в очаге деформации на основе энергосиловых параметров

Будем считать, что в соответствии с пунктом 1.1.2 подобраны коэффициенты трения и вычислены соответствующие им значения K_{c_i} , $p_{contact_i}$ и h_{neutr} по формулам 11, 17 и 18.

Для расчета тепловыделения за счет трения между полосой и валком необходимо:

1. Вычислить скорость скольжения w_{slip_i} по формуле

$$w_{slip_i} = \left| V_k \cdot \left(\frac{h_{neutr}}{h_i} - 1 \right) \right|, \quad (20)$$

где V_k — скорость полосы на k -ом очаге.

2. Вычислить касательные напряжения τ_{xi} по формуле

$$\tau_{xi} = \mu_k \cdot p_{contact_i}. \quad (21)$$

3. Рассчитать плотность теплового потока q , генерируемого трением в зоне контакта по формуле

$$q_i = \tau_{xi} \cdot w_{slip_i}. \quad (22)$$

Для расчета тепловыделения от объемной деформации полосы необходимо:

1. Вычислить значение выражения

$$\Delta T_{def_i} = \frac{\eta \cdot \sum_{i=0}^N K_{c_i} \ln \left(\frac{h_{i-1}}{h_i} \right)}{c_{\pi} \cdot \lambda_{\pi}}, \quad (23)$$

где $\eta = 0,85$ — коэффициент выходного потока тепла от пластической деформации; c_{π} — удельная теплоемкость полосы; λ_{π} — коэффициент теплопроводности полосы.

2. Значения теплового источника для полосы в очаге деформации в момент времени t_i вычислить по формуле

$$f_i = \frac{\Delta T_{def_i}}{t_i}. \quad (24)$$

1.2 Формализация задачи расчета напряженно-деформированного состояния рабочего слоя вала в контакте с полосой

Максимальные скалывающие напряжения рабочего слоя вала будут находиться в нейтральном сечении очага деформации [10]. Пусть OY направлена по радиусу вала в нейтральном сечении, а начало координат находится на поверхности. Каждой координате y по глубине вала поставим в соответствие безразмерную координату $\eta = \frac{y}{L}$, L — длина очага. Для нахождения величины $\tau_{max}(\eta)$ достаточно рассматривать значения $\eta \in \left[0; \frac{1}{2}\right]$.

Для максимальных скалывающих напряжений расчета воспользуемся [11] формулой

$$\begin{aligned}\tau_{max}(\eta) = & -\frac{\eta p_{cp}}{2\pi} \left[\frac{k_1}{a_1} \ln \frac{(a - a_1)^2 + \eta^2}{a^2 + \eta^2} - \frac{k_1 - p_0}{a - a_1} \ln \frac{\eta^2}{(a - a_1)^2 + \eta^2} + \right. \\ & + \frac{k_2 - p_0}{b_1} \ln \frac{b_1^2 + \eta^2}{\eta^2} - \frac{k_2}{b_1} \ln \frac{4b_1^2 + \eta^2}{b_1^2 + \eta^2} \left. \right] + \frac{6f_{cp}}{\pi} \left[1 - 2\frac{\eta}{a} \arctan \frac{a}{\eta} + \right. \\ & + \frac{a}{\eta} + \frac{\eta}{b_1} \arctan \frac{2b_1}{\eta} + \frac{\eta^2}{a^2} \ln \left(\frac{a^2}{\eta^2} + 1 \right) + \frac{\eta^2}{4b_1^2} \ln \left(\frac{4b_1^2}{\eta^2} + 1 \right) \left. \right],\end{aligned}$$

где η — нейтральное сечение, $p_{cp} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^M p_{contact_i}$ — средние нормальные

напряжения, $\tau_{cp} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^M \tau_{xi}$ — среднее касательные напряжения, $k_1 = \frac{1,15\sigma_{in} - \sigma_{back}}{p_{cp}}$ и $k_2 = \frac{1,15\sigma_{out} - \sigma_{forw}}{p_{cp}}$. σ_{in} и σ_{out} — начальное и конечное значение предела текучести, σ_{forw} и σ_{back} — переднее и заднее натяжение, $f_{cp} = \frac{\tau_{cp}}{p_{cp}}$ — коэффициент трения. $a = 1 - \frac{\gamma}{\alpha}$ где γ — характеризует положение нейтрального сечения, α — угол захвата. $a_1 = 0,25 - 0,5\frac{\gamma}{\alpha}$ $b_1 = 0,5\frac{\gamma}{\alpha}$ $p_0 = \frac{p_{max}}{p_{cp}} = \frac{4}{3} \left(2 - k_1 \left[1 - \frac{\gamma}{\alpha} \left(1 - \frac{k_2}{k_1} \right) \right] \right)$ — показатель неравномерности распределения давления. Для нахождения величины $\frac{\gamma}{\alpha}$ можно воспользоваться соотношением

$$\frac{\gamma}{\alpha} = \frac{L - x^*}{L} = \frac{L - \frac{i^* \cdot L}{M}}{L} = 1 - \frac{i^*}{M},$$

где i^* — номер точки пересечения решений уравнений 1 и 2. Глубина расположения y^* максимальных скалывающих напряжений определяется формулой

$$y^* = \eta^* \cdot L,$$

где $\eta^* = \arg \min_{\eta} (\tau_{max}(\eta))$, при $\eta \in \left[0; \frac{1}{2} \right]$. Для программной реализации можно использовать дискретизацию по ОУ. В дискретном случае при дискретизации с шагом h имеем набор узлов $y_j = j \cdot h$, $\eta_j = \frac{j \cdot h}{L}$.

1.3 Моделирование тепловых режимов для полосы и валков в очаге деформации

1.3.1 Формулировка краевой задачи

Рассмотрим k -й очаг. Полоса толщиной d деформируется валками радиуса R с обеих сторон (см. рисунок 3). Обозначим через u, w — распределение температур на валке и полосе. Ось OZ направлена по нормали к полосе, будем считать, что точка $z = 0$ соответствует центру полосы. В силу симметричности задачи достаточно рассчитать значения температуры полосы при $z \in \left[0, \frac{d}{2}\right]$ и значения температуры в точках одного валка при $z \in \left[\frac{d}{2}, R + \frac{d}{2}\right]$. Будем считать точку стыка, соответствующую значению $z = \frac{d}{2}$, точкой идеального контакта. Для моделирования распределения

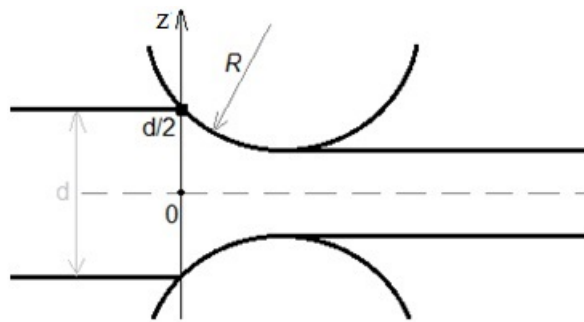


Рисунок 3 – Одна из клеток стана

температур по глубине полосы в очаге деформации сформулирована задача решения одномерного уравнения теплопроводности с краевыми условиями второго рода:

$$\begin{cases} w'_t - a_{\Pi}^2 w''_{zz} = f(z, t), & z \in \left[0, \frac{d}{2}\right], t \in [0, t_{max_k}], \\ w(z, 0) = C_2, & z \in \left[0, \frac{d}{2}\right], t \in [0, t_{max_k}], \\ \frac{\partial w}{\partial z}(0, t) = 0, & t \in [0, t_{max_k}], \\ \frac{\partial w}{\partial z}\left(\frac{d}{2}, t\right) = -\frac{q(t)}{\lambda_{\Pi}}, & t \in [0, t_{max_k}], \end{cases} \quad (25)$$

где $a_{\Pi}^2 = \frac{\lambda_{\Pi}}{\rho_{\Pi} c_{\Pi}}$, λ_{Π} — коэффициент теплопроводности стали, ρ_{Π} — плотность стали, c_{Π} — удельная теплоемкость стали, f — функция выделения тепла от деформации, q — плотность теплового потока, генерируемого трением в зоне контакта, C_2 — распределение температур по глубине полосы на входе в очаг деформации. Для расчета дискретных значений функций q и f необходимо воспользоваться формулами 22 и 24 соответственно.

Для моделирования распределения температур на валке в очаге деформации сформулирована задача решения одномерного уравнения теплопроводности с краевыми условиями первого рода:

$$\begin{cases} u_t' - a_{\text{В}}^2 u_{zz}'' = 0, & z \in \left[\frac{d}{2}, R + \frac{d}{2} \right], t \in [0, t_{\max_k}], \\ u(z, 0) = C_1, & z \in \left[\frac{d}{2}, R + \frac{d}{2} \right], \\ u\left(\frac{d}{2} + R, t\right) = C_3, & t \in [0, t_{\max_k}], \\ u\left(\frac{d}{2}, t\right) = w\left(\frac{d}{2}, t\right), & t \in [0, t_{\max_k}]. \end{cases} \quad (26)$$

где $a_{\text{В}}^2 = \frac{\lambda_{\text{В}}}{\rho_{\text{В}} c_{\text{В}}}$, $\lambda_{\text{В}}$ — коэффициент теплопроводности валка, $\rho_{\text{В}}$ — плотность стали валка, $c_{\text{В}}$ — удельная теплоемкость валка, d — исходная толщина полосы, R — радиус валка, C_1 — распределение температур по глубине рабочего слоя валка на входе в очаг деформации, $C_3 = C_1$ — температура в центре валка.

1.3.2 Сведение дифференциальной задачи к конечно-разностной

Рассмотрим первое уравнение системы 25. Будем использовать неявную конечно-разностную схему с четырехточечным шаблоном [12], [13], [14] см. рисунок 4.

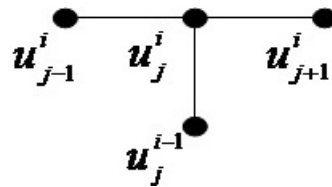


Рисунок 4 – Шаблон

Разобьем отрезок $[0, t_{max}]$ на M точек с шагом τ , а отрезок $\left[0, R + \frac{d}{2}\right]$ — на N точек с шагом h , при этом номер точки стыка $z = \frac{d}{2}$ обозначим через N_B . Тогда

$$\begin{aligned} t_i &= i \cdot \tau, \\ z_j &= j \cdot h, \\ f_j^{i+1} &= f(z_j, t_i), \\ w_j^{i+1} &= w(z_j, t_i), \\ u_j^{i+1} &= u(z_j, t_i), \end{aligned}$$

Заменим первое уравнение системы 25 разностными:

$$\frac{w_j^{i+1} - w_j^i}{\tau} = a_{\Pi}^2 \frac{w_{j+1}^{i+1} - 2w_j^{i+1} + w_{j-1}^{i+1}}{h^2} + f_j^{i+1} \quad i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N_B$$

или

$$-\frac{\tau a_{\Pi}^2}{h^2} w_{j-1}^{i+1} + \left(1 + \frac{2\tau a_{\Pi}^2}{h^2}\right) w_j^{i+1} - \frac{\tau a_{\Pi}^2}{h^2} w_{j+1}^{i+1} = w_j^i + f_j^{i+1} \quad i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N_B \quad (27)$$

Заменим разностным аналогом начальное и граничные условия

$$w_j^0 = C_2, \quad (28)$$

$$w_0^{i+1} = w_1^{i+1}, \quad (29)$$

$$w_{N_B+1}^{i+1} = w_{N_B}^{i+1} - \frac{q_i h}{\lambda_{\Pi}} = u_{N_B}^{i+1} - \frac{q_i h}{\lambda_{\Pi}}. \quad (30)$$

Подставим формулы 29 и 30 в 27, получим

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{\tau a_{\Pi}^2}{h^2}\right) w_1^{i+1} - \frac{\tau a_{\Pi}^2}{h^2} w_2^{i+1} &= w_1^i + f_1^{i+1}, \quad j = 1, \\ -\frac{\tau a_{\Pi}^2}{h^2} w_{N_B+1}^{i+1} + \left(1 + \frac{\tau a_{\Pi}^2}{h^2}\right) w_{N_B}^{i+1} &= w_{N_B}^i + f_{N_B}^{i+1} + \frac{\tau a_{\Pi}^2 q_i}{h \lambda_{\Pi}}, \quad j = N_B. \end{aligned}$$

Для нахождения остальных значений w_j^{i+1} справедливы соотношения

$$-\frac{\tau a_{\Pi}^2}{h^2} w_{j-1}^{i+1} + \left(1 + \frac{2\tau a_{\Pi}^2}{h^2}\right) w_j^{i+1} - \frac{\tau a_{\Pi}^2}{h^2} w_{j+1}^{i+1} = w_j^i + f_j^{i+1}, j = 2, \dots, N_{\text{B}} - 1.$$

Таким образом, для расчета значений слоя $i + 1$ получаем СЛАУ относительно w_j^{i+1} , $j = 1, \dots, N_{\text{B}}$. Первое уравнение системы [26](#) заменим разностными уравнениями:

$$\frac{u_j^{i+1} - u_j^i}{\tau} = a_{\text{B}}^2 \frac{u_{j+1}^{i+1} - 2u_j^{i+1} + u_{j-1}^{i+1}}{h^2}, \quad i = 1, \dots, M, \quad j = N_{\text{B}}, \dots, N$$

или

$$-\frac{\tau a_{\text{B}}^2}{h^2} u_{j-1}^{i+1} + \left(1 + \frac{2\tau a_{\text{B}}^2}{h^2}\right) u_j^{i+1} - \frac{\tau a_{\text{B}}^2}{h^2} u_{j+1}^{i+1} = u_j^i, \quad i = 1, \dots, M, j = N_{\text{B}}, \dots, N. \quad (31)$$

Начальные и граничные условия примут вид

$$u_j^{N_{\text{B}}} = C_1,$$

$$u_N^{i+1} = C_3, \quad (32)$$

$$u_0^{i+1} = w_{N_{\text{B}}}^{i+1}. \quad (33)$$

Подставим формулу [32](#) в [31](#) и [33](#) в [31](#), результате получим

$$-\frac{\tau a_{\text{B}}^2}{h^2} u_{N_{\text{B}}}^{i+1} + \left(1 + \frac{2\tau a_{\text{B}}^2}{h^2}\right) u_{N_{\text{B}}}^{i+1} = u_{N_{\text{B}}}^i + \frac{\tau a_{\text{B}}^2}{h^2} C^3, \quad j = N_{\text{B}}.$$

$$-\frac{\tau a_{\text{B}}^2}{h^2} u_{N_{\text{B}}+1}^{i+1} + \left(1 + \frac{2\tau a_{\text{B}}^2}{h^2}\right) u_1^{i+1} - \frac{\tau a_{\text{B}}^2}{h^2} u_2^{i+1} = \frac{\tau a_{\text{B}}^2 q_i}{\lambda h} u_1^i, \quad j = N_{\text{B}},$$

где $w_{N_{\text{B}}+1}^{i+1} = w_{N_{\text{B}}}^{i+1} - \frac{q_i h}{\lambda}$ точка стыка. Для нахождения остальных значений u_j^{i+1} справедливы соотношения

$$-\frac{\tau a_{\text{B}}^2}{h^2} u_{j-1}^{i+1} + \left(1 + \frac{2\tau a_{\text{B}}^2}{h^2}\right) u_j^{i+1} - \frac{\tau a_{\text{B}}^2}{h^2} u_{j+1}^{i+1} = u_j^i, \quad j = N_{\text{B}} - 1, \dots, N - 1.$$

Таким образом, для расчета значений слоя $i + 1$ получаем СЛАУ относительно u_j^{i+1} , $j = N_{\text{B}}, \dots, N$.

2 Разработка математической модели для межклетевого промежутка

2.1 Формулировка краевой задачи для межклетевого промежутка

На k -ом межклетевом промежутке происходит конвективный теплообмен полосы толщиной d с охлаждающей жидкостью с температурой $T_{\text{эм}}$ или с воздухом температурой $T_{\text{возд}}$. Обозначим через w — распределение температур на полосе. Ось OZ направлена по нормали к полосе. В силу симметричности задачи достаточно рассчитать значения температуры для $z \in \left[0, \frac{d}{2}\right]$. Время моделирования составляет $t_{\text{max}_k} = \frac{S}{Vm_k}$, где S — длина межклетевого промежутка, Vm_k — скорость на межклетевом промежутке. В качестве Vm_k для непрерывных станок используется скорость на предыдущей клетке, для реверсивных станок — скорость на соответствующем проходе.

Для моделирования распределения температур по глубине полосы в межклетевом промежутке сформулирована задача решения одномерного уравнения теплопроводности с краевыми условиями второго и третьего рода:

$$\begin{cases} w'_t - a_{\text{п}}^2 w''_{zz} = 0, & z \in \left[0, \frac{d}{2}\right], t \in [0, t_{\text{max}_k}], \\ w(z, 0) = C_4, & z \in \left[0, \frac{d}{2}\right], \\ \frac{\partial w}{\partial z}(0, t) = 0, & t \in [0, t_{\text{max}_k}], \\ \frac{\partial w}{\partial z}\left(\frac{d}{2}, t\right) = -\frac{\alpha}{\lambda_{\text{п}}} \left(w\left(\frac{d}{2}, t\right) - \theta(t)\right), & t \in [0, t_{\text{max}_k}], \end{cases} \quad (34)$$

где $a_{\text{п}}^2 = \frac{\lambda_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} c_{\text{п}}}$, $\lambda_{\text{п}}$ — коэффициент теплопроводности стали, $\rho_{\text{п}}$ — плотность стали, $c_{\text{п}}$ — удельная теплоемкость стали, C_4 — распределение температур по глубине полосы на входе в межклетевый промежуток, α — коэффициент теплообмена ($\alpha = \alpha_{\text{эм}}^{k,l}$) или $\alpha = \alpha_{\text{возд}}^{k,l}$), θ — температура окружающей среды ($\theta(t) = T_{\text{эм}}$ или $\theta(t) = T_{\text{возд}}$).

2.2 Сведение полученной дифференциальной задачи к конечно-разностной

Применим шаблон для неявной конечно-разностной схемы описанный выше для первого уравнения системы [34](#).

$$-\frac{\tau a_{\Pi}^2}{h^2} w_{j-1}^{i+1} + \left(1 + \frac{2\tau a_{\Pi}^2}{h^2}\right) w_j^{i+1} - \frac{\tau a_{\Pi}^2}{h^2} w_{j+1}^{i+1} = w_j^i, \quad i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N_{\text{в}}. \quad (35)$$

Заменяем разностным аналогом начальные условия системы [34](#)

$$w_j^0 = C_{4j},$$

граничные условия

$$w_0^{i+1} = w_1^{i+1}, \quad w_{N_{\text{в}}}^{i+1} = \frac{\lambda_{\Pi} w_{N_{\text{в}}}^{i+1} + \alpha h \theta(t)}{\lambda_{\Pi} + \alpha h}.$$

Подставим граничное условие $w_0^{i+1} = w_1^{i+1}$ в [35](#), получим

$$\left(1 + \frac{2\tau a_{\Pi}^2}{h^2}\right) w_j^{i+1} - \frac{\tau a_{\Pi}^2}{h^2} w_{j+1}^{i+1} = w_j^i, \quad j = 1. \quad (36)$$

Подставим граничное условие $w_{N_{\text{в}}}^{i+1} = \frac{\lambda_{\Pi} w_{N_{\text{в}}}^{i+1} + \alpha h \theta(t)}{\lambda_{\Pi} + \alpha h}$ в [35](#), получим

$$-\frac{\tau a_{\Pi}^2}{h^2} w_{N_{\text{в}}-1}^{i+1} + \left(1 + \frac{\tau a_{\Pi}^2 \lambda_{\Pi}}{h^2 (\lambda_{\Pi} + \alpha h)} + \frac{2\tau a_{\Pi}^2}{h^2}\right) w_{N_{\text{в}}}^{i+1} = w_{N_{\text{в}}-1}^i + \frac{\tau a_{\Pi}^2 \alpha h \theta(t)}{h^2 (\lambda_{\Pi} + \alpha h)}, \quad j = N_{\text{в}}. \quad (37)$$

Для нахождения остальных значений w_j^{i+1} справедливы соотношения

$$-\frac{\tau a_{\Pi}^2}{h^2} w_{j-1}^{i+1} + \left(1 + \frac{2\tau a_{\Pi}^2}{h^2}\right) w_j^{i+1} - \frac{\tau a_{\Pi}^2}{h^2} w_{j+1}^{i+1} = w_j^i, \quad j = 2, \dots, N_{\text{в}} - 1.$$

Таким образом, для расчета значений слоя $i + 1$ получаем СЛАУ относительно w_j^{i+1} , $j = 1, \dots, N_{\text{в}}$.

3 Разработка комплекса прикладных программ для решения поставленных задач

3.1 Краткое описание модулей

Программный продукт представляет собой комплекс программ, состоящий из двух модулей. Первый модуль – «workfile.exe», второй – «arm-technology.exe». Комплекс написан на языке C++, с использованием среды разработки Qt. Программное обеспечение предназначена для моделирования процесса холоднокатаного производства. Все результаты расчетов, представленные во втором модуле можно сохранить.

3.2 «Редактор ini.txt»

3.2.1 Общие сведения

Наименование: «Редактор ini.txt». Программа предназначена для работы с файлом технологических параметров «ini.txt» (создание и редактирование существующего).

3.2.2 Функциональное назначение

Модуль имеет два режима работы с файлом «ini.txt»:

- создание файла;
- правка файла.

В модуле реализованы функции записи, считывания и упорядоченного хранения данных.

3.2.3 Описание логической структуры

Программа имеет структуру обработчика событий по нажатию кнопки. Диаграмма классов представлена в приложении **A.1**. Используемые классы представлены в таблице **2**.

Таблица 2 – Классы и их назначение

Класс	Назначение
WorkFile	Выполняет связующую роль между классами Stan и MarkSteel. Обращается к ним, если осуществляется: просмотр и сохранение данных. Реализует работу главного окна и обращения к файлу с технологическими параметрами
MarkSteel	Реализует упорядоченное хранение и предоставление данных по маркам стали
Stan	Реализует упорядоченное хранение и предоставление данных по станам
addstan	Отвечает за окно добавления нового стана
addsteel	Отвечает за окно добавления новой марки стали

Описание методов класса WorkFile приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Описание класса WorkFile

Метод	Описание	Передаваемые параметры
void addStan (QString NewName, int NewNumKl, double NewLengthMkl, int NewModeStan, QString NewSpeed,QString NewSizeCstrip, double NewSizeRwr, double NewWidthCstrip, double NewTCold,QString NewFriction, QString NewTB, QString NewTF, int NewCstripPoints, int NewTimePoints, int NewBeginTemperature Cstrip, int NewBeginTemperature Rwr)	Добавление стана. Обраща- ется к классу Stan для до- бавления в него объектов	NewName - название ста- на; NewNumKl - число клетей, NewLengthMkl - длина межклетевого про- межутка, NewModeStan - тип стана, NewSpeed - скорость, NewSizeCstrip - размер полосы (с подка- том), NewSizeRwr - радиус валка, NewWidthCstrip - ширина полосы, NewTCold - температура охлаждаю- щей жидкости, NewFriction - коэффициенты трения, NewTB - заднее натяже- ние, NewTF - переднее натяжение, NewCstripPoints - число точек на по- лосе, NewTimePoints - число точек по времени, NewBeginTemperatureCstrip - начальная тем- пература полосы, NewBeginTemperatureRwr - начальная температура валка

Окончание таблицы 3

Метод	Описание	Передаваемые параметры
void addSteel (QString NewName, int NewGroup, double NewC, double NewRho, double NewLambda, double NewSigmaT0, double NewCT, double NewBT)	Добавление марки стали. Обращает- ся к классу MarkSteel для добавления в него объектов	NewName - название мар- ки, NewGroup - ее группа, NewC - коэффициент удель- ной теплоемкости, NewRho - плотность, NewLambda - ко- эффициент теплопроводно- сти, NewSigmaT0 - предел текучести, NewCT - коэффи- циент упрочнения, NewBT - коэффициент упрочнения

Описание методов класса MarkSteel приведено в таблице 4.

Таблица 4 – Описание класса MarkSteel

Метод	Описание	Передаваемые параметры
void addValue (QString NewName, int NewGroup, double NewC, double NewRho, double NewLambda, double NewSigmaT0, double NewCT, double NewBT)	Добавляет па- раметры марки стали в списки строк	NewName - название мар- ки, NewGroup - ее группа, NewC - коэффициент удель- ной теплоемкости, NewRho - плотность, NewLambda - ко- эффициент теплопроводно- сти, NewSigmaT0 - предел текучести, NewCT - коэффи- циент упрочнения, NewBT - коэффициент упрочнения

Описание методов класса Stan приведено в таблице 5.

Таблица 5 – Описание класса Stan

Метод	Описание	Передаваемые параметры
void addValue (QString NewName, int NewNumKl, double NewLengthMkl, int NewModeStan, QString NewSpeed, QString NewSizeCstrip, double NewSizeRwr, double NewWidthCstrip, double NewTCold, QString NewFriction, QString NewTB, QString NewTF, double NewT, int NewCstripPoints, int NewTimePoints, int NewBeginTemperature Cstrip, int NewBeginTemperature Rwr)	Добавляет па- раметры стана в списки строк	NewName - название ста- на; NewNumKl - число клетей, NewLengthMkl - длина межклетевого про- межутка, NewModeStan - тип стана, NewSpeed - скорость, NewSizeCstrip - размер полосы (с подка- том), NewSizeRwr - радиус валка, NewWidthCstrip - ширина полосы, NewTCold - температура охлаждаю- щей жидкости, NewFriction - коэффициенты трения, NewTB - заднее натяже- ние, NewTF - переднее натяжение, NewCstripPoints - число точек на по- лосе, NewTimePoints - число точек по времени, NewBeginTemperatureCstrip - начальная тем- пература полосы, NewBeginTemperatureRwr - начальная температура валка

3.2.4 Используемые технические средства

Минимальные требования для работы «Редактор ini.txt»:

- ОС: Windows 7, Windows 8, Windows 10;
- доп. ПО: Qt Creator;
- процессор: 2.8 ГГц;

- оперативная память: 512 МБ;
- видеоадаптер: от 256 МБ;
- свободное место не менее 50 МБ;
- устройства ввода информации: клавиатура, мышь.

3.2.5 Установка и удаление

Программа не требует установки. Папка с программой представляет собой каталог (см. рисунок 5), в котором присутствуют два текстовых файла формата ТХТ, исполняемый файл «workfile.exe» и папкой «Settings» с вложенным «ini.txt».

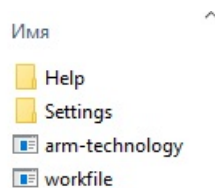


Рисунок 5 – Каталог программы

Если папки «Setting» не будет, она будет создана при запуске программы. При добавлении через приложение станков, марок стали полосы и валков будет осуществлена запись в файл.

3.2.6 Вызов и загрузка

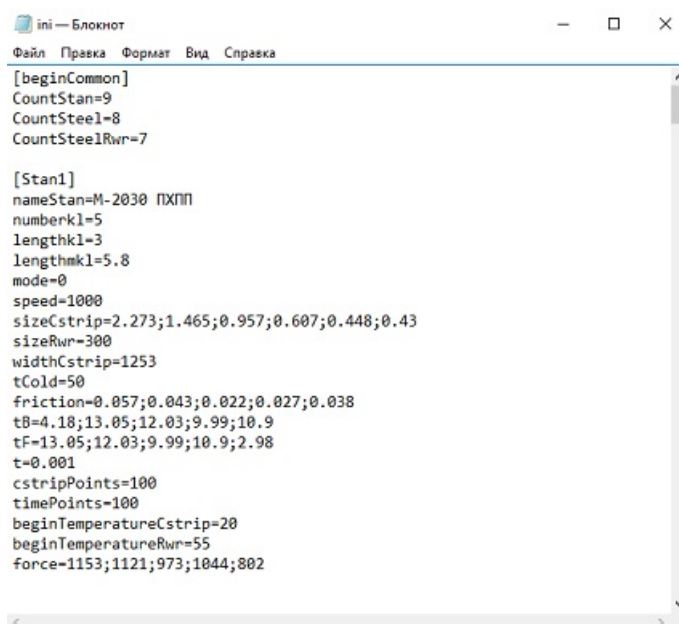
Для вызова программы необходимо запустить исполняемый файл «workfile.exe».

3.2.7 Входные данные

Входными данными для модуля является файл «ini.txt». Структура файла состоит из тегов и ключевых слов. После каждого ключевого слова должен стоять знак «=» и значение, а после каждого набора тег-значения пустая строка.

В первой строке указывается тег «[beginCommon]» – предназначен для указания ключевых слов: «CountStan» – количество станков в файле, «CountSteel» – количество марок стали полосы и «CountSteelRwr» – число марок валка. Затем теги записываются в следующем порядке: «[Stani]», «[Steeli]» и «[SteelRwri]», где вместо *i* ставится номер стана, марки стали полосы и марки стали валка соответственно. Тег

«[Stan]» описывается ключевыми словами: «nameStan» – название стана, «numberkl» – число клетей (проходов), «lengthmkl» – длина межклетевого промежутка, «mode» – тип стана, «speed» – скорость, «sizeCstrip» – толщина полосы, «sizeRwr» – размер валка, «widthCstrip» – ширина полосы, «tCold» – температура эмульсии, «friction» – коэффициенты трения, «tB» – заднее натяжение, «tF» – переднее натяжение, «cstripPoints» – число точек по полосе, «timePoints» – число точек по времени, «beginTemperatureCstrip» – начальная температура полосы, «beginTemperatureRwr» – начальная температура валка, «force» – усилия. Тег «[Steel]» характеризуется ключевыми словами: «nameSteel» – название марки, «group» – ее группа, «с» – удельная теплоемкость, «rho» – плотность, «lambda» – коэффициент теплопроводности, «sigma0» – предел текучести подката, а также ключами «ct» и «bt» – коэффициенты упрочнения полосы. У тега «[SteelRwr]» ключи аналогичны «[Steel]». Пример структуры файла представлен на рисунке 6.



```
ini — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка

[beginCommon]
CountStan=9
CountSteel=8
CountSteelRwr=7

[Stan1]
nameStan=M-2030 ПХПП
numberkl=5
lengthkl=3
lengthmkl=5.8
mode=0
speed=1000
sizeCstrip=2.273;1.465;0.957;0.607;0.448;0.43
sizeRwr=300
widthCstrip=1253
tCold=50
friction=0.057;0.043;0.022;0.027;0.038
tB=4.18;13.05;12.03;9.99;10.9
tF=13.05;12.03;9.99;10.9;2.98
t=0.001
cstripPoints=100
timePoints=100
beginTemperatureCstrip=20
beginTemperatureRwr=55
force=1153;1121;973;1044;802
```

Рисунок 6 – Структура файла «ini.txt»

3.2.8 Выходные данные

Результатом выполнения программы является файл с технологическими параметрами «ini.txt».

3.3 Руководство оператора

3.3.1 Назначение программы

Программа предоставляет инструменты для работы с «ini.txt» — файлом технологических параметров (создание и редактирование существующего).

3.3.2 Условия выполнения программы

Минимальные требования для работы модуля «Редактор ini.txt»:

- ОС: Windows 7, Windows 8, Windows 10;
- доп. ПО: Qt Creator;
- процессор: 2.8 ГГц;
- оперативная память: 512 МБ;
- видеоадаптер: от 256 МБ;
- свободное место не менее 50 МБ;
- устройства ввода информации: клавиатура, мышь.

3.3.3 Выполнение программы

Программа служит для создания «ini.txt» — файла с технологическими параметрами для «arm-technology.exe». На рисунке 7 представлено главное окно «workfile.exe».

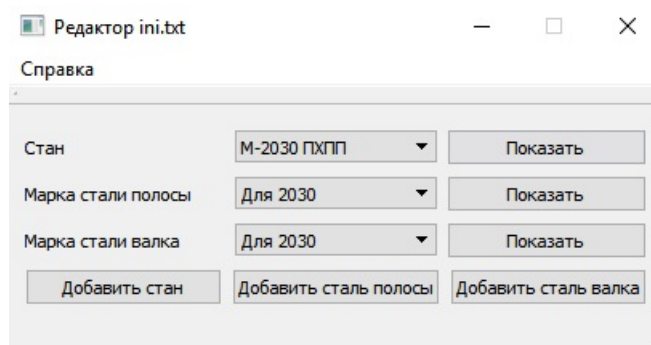


Рисунок 7 – Главное окно программы

С помощью модуля можно:

- добавить новый стан;
- добавить новую марку полосы и валка;
- посмотреть характеристики станков.

Если файл «ini.txt» не создан, тогда порядок действий для создания нового стана следующий:

- запустить «workfile.exe» (рисунок 7);
- с помощью кнопки «Добавить стан» вызвать окно с технологическими характеристиками стана (рисунок 8);

Добавить стан

Название стана	Скорость, м/мин	Козф. трения	Переднее натяжение, т
Тип стана: Непрерывный	Скорость на посл. кл. 0	Клеть 1 0,0100	Клеть 1 2,0
Число клеток: 1			
Длина межкл. промежутка 2,00			
Температура эмульсии, °C 40			
Начальные условия, °C	Характеристики полосы, мм	Усилия, т	Заднее натяжение, т
Валок 20	Радиус валка 125		
Полоса 20	Подкат 1,500	Клеть 1 100	Клеть 1 2,0
Характеристика сетки	Обжатие 1 кл. 0,200		
Кол-во точек по полосе 40	Ширина полосы 1000		
Кол-во точек по времени 40			
Добавить			

Рисунок 8 – Окно добавление нового стана

- заполнить все поля (рисунок 9).

При нажатии на кнопку «Добавить», окно закроется и будет создана запись в файле «ini.txt». В элементе «Стан» программы «workfile.exe», появится добавленный элемент (рисунок 10).

Добавление осуществляется в конец списка.

Если «ini.txt» файл существует и находится в папке «Settings», то программа запишет новый к уже имеющимся станам. Порядок действий для создания стана будет таким же, как при отсутствии файла «ini.txt».

Порядок действий для создания новой марки стали для полосы:

Добавить стан

Название стана: мой новый стан

Тип стана: Непрерывный

Число клетей: 4

Длина межкл. промежутка: 5,80

Температура эмульсии, °C: 50

Скорость, м/мин

Скорость на посл. кл.: 1000

Козф. трения

Клеть 1: 0,0100

Клеть 2: 0,0100

Клеть 3: 0,0100

Клеть 4: 0,0100

Переднее натяжение, т

Клеть 1: 22,0

Клеть 2: 17,3

Клеть 3: 10,0

Клеть 4: 6,1

Начальные условия, °C

Валок: 60

Полоса: 50

Характеристика сетки

Кол-во точек по полосе: 40

Кол-во точек по времени: 40

Характеристики полосы, мм

Радиус валка: 125

Подкат: 2,100

Обжатие 1 кл.: 1,600

Обжатие 2 кл.: 0,952

Обжатие 3 кл.: 0,534

Обжатие 4 кл.: 0,323

Ширина полосы: 1050

Усилия, т

Клеть 1: 748

Клеть 2: 801

Клеть 3: 798

Клеть 4: 687

Заднее натяжение, т

Клеть 1: 18,0

Клеть 2: 15,0

Клеть 3: 9,0

Клеть 4: 5,7

Добавить

Рисунок 9 – Заполнение полей

Редактор ini.txt

Справка

Стан: М-2030 ПХПП

Марка стали полосы: М-1400 ПДС

Марка стали валка: М-5 ПДС (реверс)

Добавить стан

Показать

Показать

Показать

Добавить сталь валка

М-2030 ПХПП

М-1400 ПДС

М-5 ПДС (реверс)

ПТС

3 ПДС (реверс)

4 ПДС (реверс)

5 ПДС (реверс)

6 ПДС (реверс)

мой новый стан

Рисунок 10 – Добавленный стан

- запустить «workfile.exe» (рисунок 7).
- с помощью кнопки «Добавить сталь полосы» вызвать окно добавления марки стали (рисунок 11);

Добавить марку стали

Название

Группа стали

Удельная теплоемкость, Дж/(кг · °C)

Плотность, кг/м³

Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °C)

Предел текучести подката, Н · мм²

Коэффициент упрочнения ct

Коэффициент упрочнения bt

Добавить

Рисунок 11 – Окно добавление марки стали для полосы

- заполнить поля (рисунок 12).

Добавить марку стали

Название

Группа стали

Удельная теплоемкость, Дж/(кг · °C)

Плотность, кг/м³

Коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °C)

Предел текучести подката, Н · мм²

Коэффициент упрочнения ct

Коэффициент упрочнения bt

Добавить

Рисунок 12 – Заполнение полей

При нажатии на кнопку «Добавить», окно закроется и произойдет запись данных в файл. В элементе «Марка стали полосы» программы «workfile.exe», появится добавленный элемент (рисунок 13).

Добавление осуществляется в конец списка.

Порядок действий для создания новой марки стали для валка:

- запустить «workfile.exe» (рисунок 7);

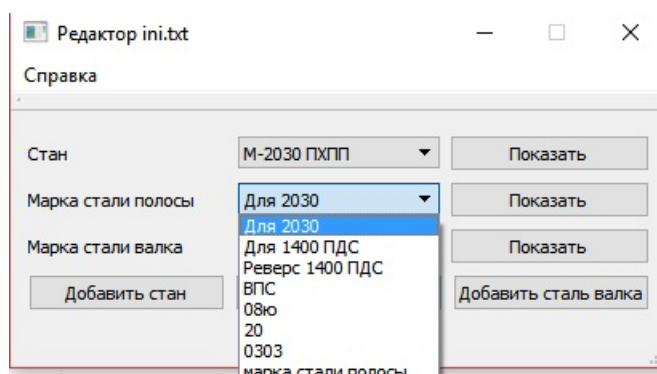


Рисунок 13 – Добавленная марка стали

- с помощью кнопки «Добавить сталь валька» вызвать окно добавления марки стали (рисунок 14);

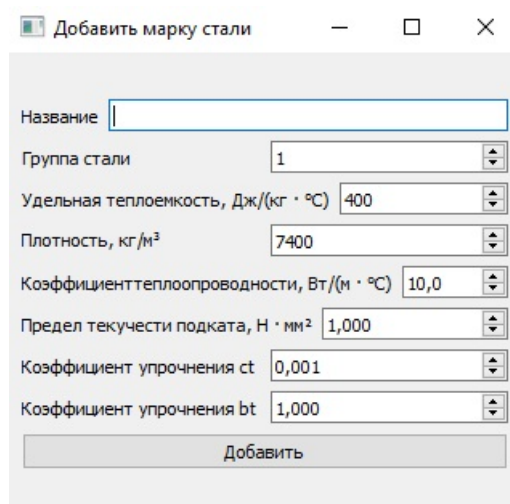


Рисунок 14 – Добавление марки стали для валька

Дальнейший порядок действий такой же, как при добавлении марки стали полосы.

Просмотр характеристик выбранного стана или марки стали Для просмотра характеристик станов и марок стали необходимо:

- запустить «workfile.exe» (рисунок 7);
- нажать на кнопку «Показать», откроется окно, в котором представлены характеристики стана или марки стали полосы и валька (рисунок 15).

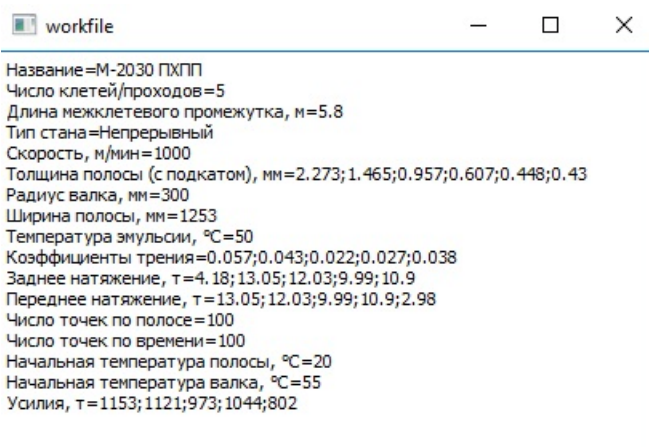


Рисунок 15 – Просмотр характеристик

3.3.4 Сообщения оператору

При запуске программы без файла «ini.txt» будет выведено предупреждение с сообщением «Файл с технологическими параметрами ini.txt не найден или его невозможно прочитать!» приведенное на рисунке 16).

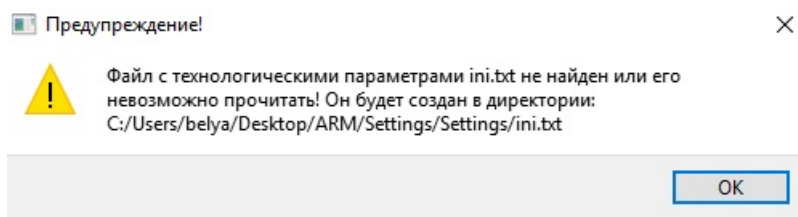


Рисунок 16 – Предупреждение о создании директории «Settings»

В случае возникновения предупреждения пользователю нужно нажать на кнопку «ОК» и продолжить работу с модулем «workfile.exe» для создания файла «ini.txt».

3.4 «Программа для вычисления распределения температур прокатного производства (ХП)»

3.4.1 Общие сведения

Наименование: «Программа для вычисления распределения температур прокатного производства (ХП)». Модуль предназначен для моделирования процесса холоднокатаного производства.

3.4.2 Функциональное назначение

Модуль реализуется в составе прикладного комплекса программ и обеспечивает расчет:

- распределения температур по всей линии стана от разматывателя до моталки, включая распределение по толщине полосы, длине очага деформации, глубине рабочего слоя валков, в межклетевых промежутках;
- расчет напряженно-деформированного состояния рабочего слоя рабочего валка в контакте с полосой, включая расчет глубины и величины максимальных скалывающих напряжений.

В таблице 6 представлены некоторые реализованные возможности модуля.

Таблица 6 – Возможности модуля

Возможность	Чем реализовано
Распределение температур на валке и в очаге деформации	Конечно-разностная схема с четырехточечным шаблоном
Графическое представление вычисляемой информации	Библиотека QCustomPlot реализует графическое представление с помощью стандартных средств Qt
Расчет фактических усилий	Пересчет коэффициента трения
Тепловой поток, генерируемый трением в зоне контакта	Формула 22
Максимальные скалывающие напряжения	Формула 1.2
Предел текучести	Формула 11

3.4.3 Описание логической структуры

Программа имеет структуру обработчика событий по нажатию кнопки. Диаграмма классов представлена в приложении А.2. Используемые классы представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Классы и их назначение

Класс	Назначение
WorkFile	Выполняет связующую роль между классами Stan и MarkSteel. Обращается к ним, если осуществляется: просмотр и сохранение данных. Реализует работу главного окна и обращения к файлу с технологическими параметрами
MarkSteel	Реализует упорядоченное хранение и предоставление данных по маркам стали
Stan	Реализует упорядоченное хранение и предоставление данных по станам
rollingsteel	Отвечает за логику прокатного производства

Описание методов классов WorkFile, MarkSteel и Stan приводилось выше в таблицах 3, 4 и 5. Описание методов класса rollingsteel представлено в таблице 8.

Таблица 8 – Описание класса rollingsteel

Метод	Описание	Передаваемые параметры
Kletb(int value, int iter)	Выполняет расчет <i>iter</i> -прохода очага деформации	value - позиция выбранного стана, iter - текущий очаг деформации
MKletb(int value, int iter)	Выполняет расчет <i>iter</i> -прохода межклетевого промежутка	iter - текущий межклетевой промежуток

3.4.4 Используемые технические средства

Минимальные требования для работы модуля «Программа для вычисления распределения температур прокатного производства (ХП)»:

- ОС: Windows 7, Windows 8, Windows 10;
- доп. ПО: Qt Creator;
- процессор: 2.8 ГГц;

- оперативная память: 1 ГБ;
- видеоадаптер: от 512 МБ;
- свободное место не менее 50 МБ;
- устройства ввода информации: клавиатура, мышь.

3.4.5 Установка и удаление

Программа не требует установки, для работы программы достаточно скопировать каталог с «arm-technology.exe» и папку «Settings» с файлами «ini.txt» и «heatini.txt» — предназначен для настройки коэффициентов теплообмена.

3.4.6 Вызов и загрузка

Для вызова программы необходимо запустить исполняемый файл «arm-technology.exe».

3.4.7 Входные данные

Входными данными для модуля является файл «ini.txt» и «heatini.txt» (их присутствие в каталоге обязательно). Структура файла «ini.txt» представлена в пункте 3.2.7. Опишем структуру файла «heatini.txt». Файл состоит из ключевых слов «mode0» и «model». Ключ «mode0» — используется для непрерывных станков, «model» — для реверсивных. После ключей идут значения коэффициента теплообмена с указанием среды («w» — эмульсия, «a» — воздух). Пример файла показан на рисунке 17.

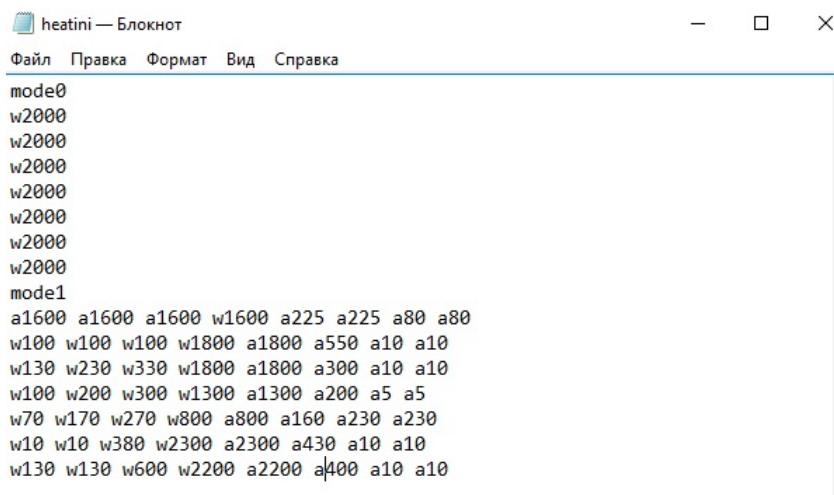


Рисунок 17 – Структура файла «heatini.txt»

Величины, приведенные в таблице 9, являются заданными и соответствуют технологическим параметрам, теплофизическим характеристикам полосы и валков и характеристикам оборудования станов. Толщина полосы должна быть всегда меньше, чем на предыдущем проходе. Для выполнения расчетов входные параметры автоматически преобразуются в систему СИ.

Таблица 9 – Входные параметры

Обозначение	Название	Диапазон значений	Единицы измерения (СИ)
H_0	Подкат	0,2-6	Миллиметры; мм
H_k	Толщина полосы после k -ого очага деформации	0,2-6	Миллиметры; мм
$\lambda_{\text{п}}$	Коэффициент теплопроводности для полосы	10-80	Ватты, деленные на произведение метры на градусы Цельсия; $\frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})}$
$\lambda_{\text{в}}$	Коэффициент теплопроводности для валка	10-80	Ватты, деленные на произведение метры на градусы Цельсия; $\frac{\text{Вт}}{(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})}$
$\rho_{\text{п}}$	Плотность металла полосы	7400-8000	Килограмм, деленный на объем; $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
$\rho_{\text{в}}$	Плотность металла валка	7400-8000	Килограмм, деленный на объем; $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
$c_{\text{п}}$	Удельная теплоемкость полосы	400-700	Джоуль, деленный на произведение килограмма и градуса Цельсия; $\frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})}$
$c_{\text{в}}$	Удельная теплоемкость валка	400-700	Джоуль, деленный на произведение килограмма и градуса Цельсия; $\frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})}$

Продолжение таблицы 9

Обозначение	Название	Диапазон значений	Единицы измерения (СИ)
F_k	Фактическое усилие в k -ом очаге	100-3000	Тонны; т
μ_k^0	Начальное приближение для коэффициента трения на k -ом очаге	0,01-0,2	Безразмерный
T_{f_k}	Переднее натяжение в k -ом очаге	2-30	Тонны; т
T_{b_k}	Заднее натяжение в k -ом очаге	2-30	Тонны; т
S	Длина межклетевого промежутка	2-15	Метры; м
R	Радиус вала	125-325	Миллиметры; мм
N	Число точек по полосе	40-100	Штук
M	Число точек по времени	40-100	Штук
V_k	Скорость в k -ом очаге	1-1800 на непрерывном стане и 1-900 на реверсивном	Метры в минуту; $\frac{\text{м}}{\text{мин}}$

Продолжение таблицы 9

Обозначение	Название	Диапазон значений	Единицы измерения (СИ)
ct, bt	Коэффициенты упрочнения	$ct=0,001-0,999$; $bt=1-30$	Безразмерный
σ_{T0}	Предел текучести подката	1-100	Ньютон, деленный на миллиметры в квадрате; $\frac{Н}{мм^2}$
$width$	Ширина полосы	1000-2000	Миллиметры; мм
$T_{п}$	Начальная температура полосы	20-200	Градусы Цельсия; °С
$T_{в}$	Начальная температура валка	20-200	Градусы Цельсия; °С
$T_{эм}$	Температура эмульсии (охлаждающей жидкости)	40-65	Градусы Цельсия; °С
$T_{возд}$	Температура воздуха окружающей среды	20-100	Градусы Цельсия; °С
$C_{в}$	Коэффициент параболической формы эпюры нагружения валка	10-20	Миллиметры в квадрате деленные на килограмм; $\frac{мм^2}{кг}$

Обозначение	Название	Диапазон значений	Единицы измерения (СИ)
ν	Коэффициент Пуассона	0,1-0,5	Безразмерный
E	Коэффициент Юнга	20000-25000	Килограмм, деленный на миллиметры в квадрате; $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$
$\alpha_{\text{эм}}^{k,l}$	Коэффициент теплообмена эмульсии (охлаждающей жидкости) на k -ом промежутке в l -ой зоне охлаждения	1-10000	Ватты, деленные на произведение метров в квадрате и градуса Цельсия; $\frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$
$\alpha_{\text{возд}}^{k,l}$	Коэффициент теплообмена воздуха на k -ом промежутке в l -ой зоне охлаждения	1-10000	Ватты, деленные на произведение метров в квадрате и градуса Цельсия; $\frac{\text{Вт}}{\text{мм}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$

3.4.8 Выходные данные

Результатом выполнения программы является:

- расчетные усилия при адаптированном коэффициенте трения;
- таблица распределения тепла на всех очагах деформации и межклетевых промежутках;
- график температур по глубине;
- график продольного среза полосы;
- график поперечного среза полосы;
- график максимальных скалывающих напряжений;
- график температуры на поверхности полосы;

- график контактных напряжений;
- график предела текучести;
- график теплового потока.

3.5 Руководство оператора

3.5.1 Назначение программы

Пакет прикладных программ осуществляет – при заданном технологическом режиме – расчет энергосиловых параметров прокатки (усилий, моментов, мощностей и др.), тепловыделения и распределения температур по поверхности и толщине полосы в клетях и межклетевых промежутках, температур и напряжений по поверхности и глубине рабочего слоя валков для действующих станов холодной прокатки НЛМК: 5-клетевого стана 2030 ПХПП, 4-клетевого стана 1400 ПДС, реверсивного стана ПДС, реверсивного стана ПТС. Использование пакета в технологической практике позволит анализировать и оптимизировать действующие технологические режимы (по критериям повышения производительности, выравнивания нагрузок, исключения перегрева, достижения требуемой температуры, энергоэффективности и т.д.), выявлять причины ухудшения качества проката (тепловые дефекты поверхности, пробуксовки и т.д.) и повреждения оборудования (перегрузки, перегрев). Использование пакета при разработке новых технологических режимов позволит сократить сроки и уменьшить потери при разработке, предотвратить повреждение оборудования и полностью использовать его ресурсы.

3.5.2 Условия выполнения программы

Минимальные требования для работы модуля «Программа для вычисления распределения температур прокатного производства (ХП)»:

- ОС: Windows 7, Windows 8, Windows 10;
- доп. ПО: Qt Creator;
- процессор: 2.8 ГГц;
- оперативная память: 1 ГБ;
- видеоадаптер: от 512 МБ;
- свободное место не менее 50 МБ;
- устройства ввода информации: клавиатура, мышь.

3.5.3 Выполнение программы

На рисунке 18 представлено главное окно «arm-technology.exe».

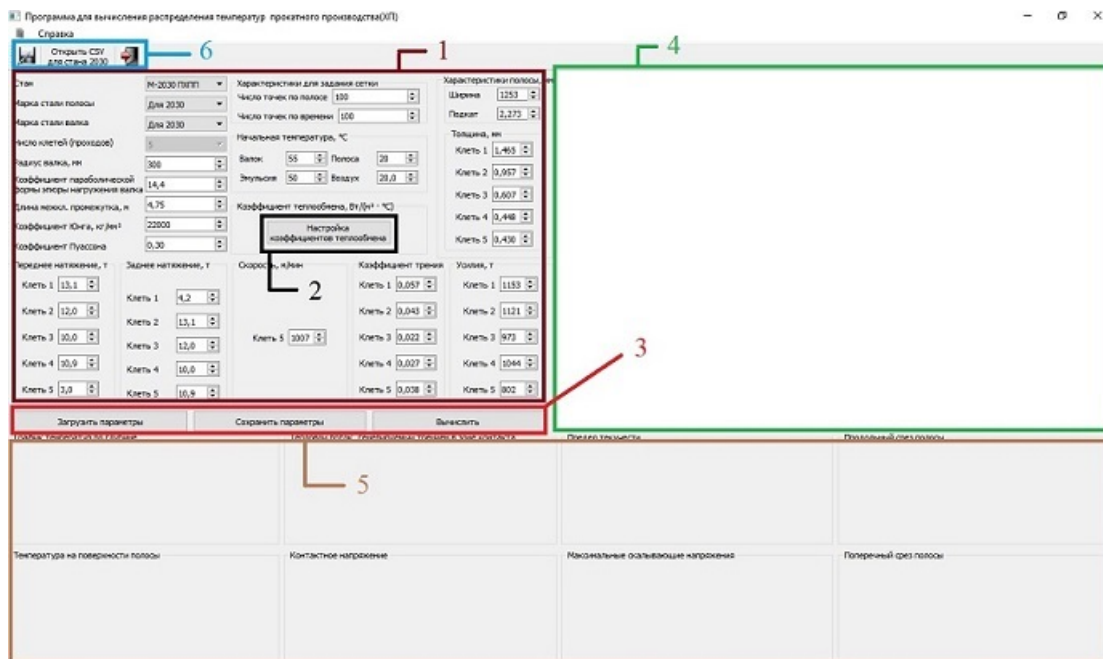


Рисунок 18 – Главное окно программы

1 – панель задания технологических параметров. Согласно файлу «ini.txt» технологических параметров можно выбрать: стан, марку стали полосы и валка, тогда значения остальных параметров предлагаются по умолчанию, их можно менять в допустимых пределах.

2 – кнопка настройки коэффициентов теплообмена. Изначально параметры предлагаются по умолчанию.

Окно настройки коэффициентов теплообмена для непрерывных станов представлены на рисунке 19, для реверсивных станов и 20.

Для непрерывных станов на межклетевом промежутке всегда включена эмульсия. Для реверсивных станов используют четыре зоны охлаждения полосы, на которых можно менять, с чем взаимодействует полоса (эмульсия или воздух) и как сильно она остывает за счет увеличения или уменьшения коэффициента теплообмена на каждой зоне [15]. Чем больше значение коэффициента теплообмена полосы при контакте с эмульсией или воздухом, тем сильнее она остывает. За счет изменения коэффициентов на разных зонах можно достигать различных температур полосы. Примеры коэффициентов теплообмена приведены в главе 4.

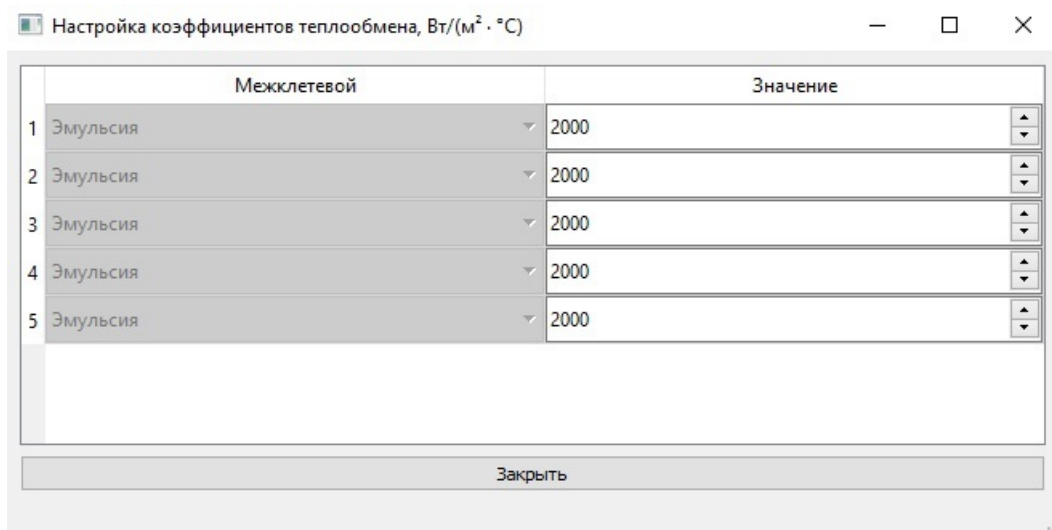


Рисунок 19 – Непрерывный стан. Настройка коэффициентов теплообмена

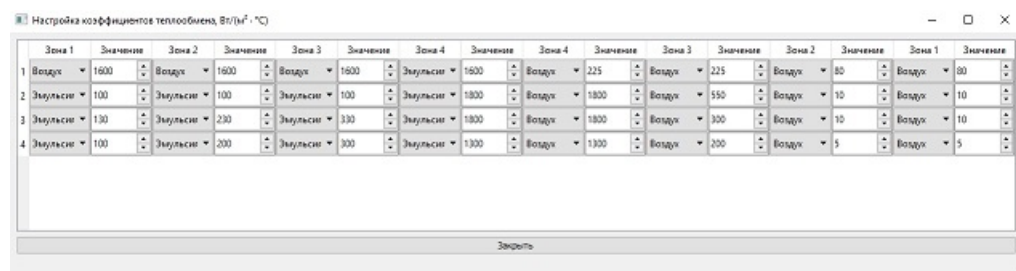


Рисунок 20 – Реверсивный стан. Настройка коэффициентов теплообмена

3 — кнопка «Вычислить», при ее нажатии производится расчет с текущими значениями, заданными в панели 1.

4 — таблица распределения температур.

5 — графическая область приложения. После окончания расчета здесь появится восемь различных графиков.

6 — панель быстрого доступа. С помощью нее можно сохранить результаты таблицы распределения температур в файл формата CSV. «Открыть CSV для стана 2030» — открывает файл с расширением «.csv» выгруженный из системы KROT и на его основе производится расчет. В файле обязательно должны присутствовать столбцы со значениями скорости и толщинами полос, включая подкат. Кнопка выхода из приложения.

После нажатия кнопки «Вычислить» появляются таблица распределения температур на полосе и валке в очаге деформации и межклетевом промежутке, графическая информация и сообщение о расчетных усилиях и коэффициенте трения (рисунок 21).

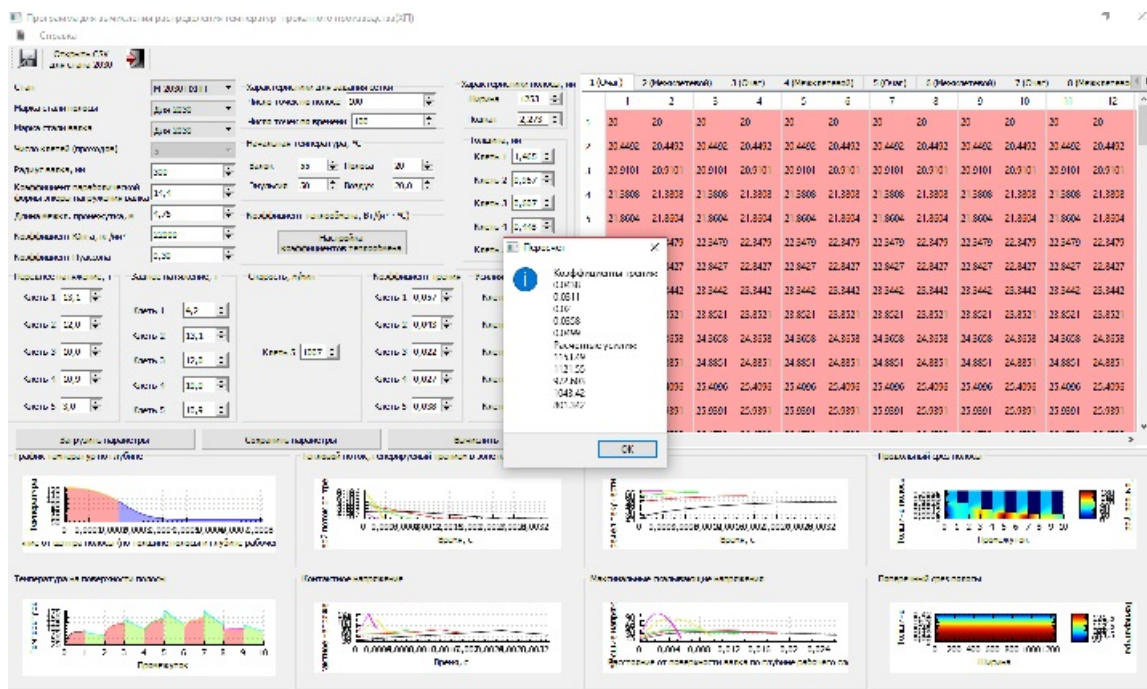


Рисунок 21 – Расчет окончен

В таблице распределения температур строки соответствуют разным моментам времени (первая строка – первый момент времени для очага или межклетевого промежутка), столбцы – точкам по глубине полосы

и валка (первый столбец — центр полосы). Таблица раскрашена в два цвета: красный — полоса, синий — валок. Табличные значения можно сохранить в файл с расширением «.csv» (рисунок 22).

	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC
978	90,6374	90,6371	90,6368	90,6365	90,6361	90,6357	90,6352	90,6347	90,6342	90,6336	90,6331	90,6324	90,6317	90,6311	90,6302	90,6294	90,6286	90,6277	90,6268	90,6259	90,6249	90,6
979	90,3604	90,3601	90,3598	90,3595	90,3591	90,3587	90,3582	90,3577	90,3572	90,3566	90,3561	90,3554	90,3547	90,3541	90,3533	90,3525	90,3517	90,3508	90,3499	90,349	90,348	90,
980	90,0852	90,085	90,0847	90,0843	90,084	90,0836	90,0831	90,0826	90,0821	90,0816	90,0811	90,0803	90,0797	90,0789	90,0782	90,0774	90,0766	90,0757	90,0748	90,0739	90,0729	90,0
981	89,812	89,8117	89,8114	89,8111	89,8107	89,8103	89,8099	89,8094	89,8089	89,8083	89,8077	89,8071	89,8064	89,8057	89,805	89,8042	89,8034	89,8026	89,8017	89,8007	89,7998	89,7
982	89,5406	89,5404	89,5401	89,5397	89,5394	89,539	89,5385	89,538	89,5375	89,537	89,5364	89,5358	89,5351	89,5344	89,5337	89,5329	89,5321	89,5312	89,5304	89,5294	89,5285	89,5
983	89,2711	89,2708	89,2705	89,2702	89,2698	89,2694	89,269	89,2685	89,268	89,2675	89,2669	89,2663	89,2656	89,2649	89,2642	89,2634	89,2626	89,2618	89,2609	89,26	89,259	89,
984	89,0034	89,0031	89,0028	89,0025	89,0021	89,0017	89,0013	89,0008	89,0003	89,9998	89,9992	89,9986	89,9979	89,9973	89,9965	89,9958	89,995	89,9941	89,9933	89,9924	89,9914	88,9
985	88,7375	88,7373	88,737	88,7366	88,7361	88,7359	88,7355	88,735	88,7345	88,7339	88,7334	88,7328	88,7321	88,7314	88,7307	88,7299	88,7292	88,7283	88,7275	88,7266	88,7256	88,7
986	88,4735	88,4732	88,4729	88,4726	88,4722	88,4718	88,4714	88,4709	88,4704	88,4699	88,4693	88,4687	88,4681	88,4674	88,4667	88,4659	88,4651	88,4643	88,4635	88,4626	88,4616	88,4
987	88,2112	88,2109	88,2107	88,2103	88,21	88,2096	88,2092	88,2087	88,2082	88,2077	88,2071	88,2065	88,2059	88,2052	88,2045	88,2037	88,2029	88,2021	88,2013	88,2004	88,1995	88,1
988	87,9507	87,9505	87,9502	87,9499	87,9495	87,9491	87,9487	87,9482	87,9478	87,9472	87,9467	87,9461	87,9454	87,9448	87,944	87,9433	87,9425	87,9417	87,9409	87,94	87,9391	87,9
989	87,692	87,6918	87,6915	87,6912	87,6908	87,6904	87,69	87,6896	87,6891	87,6886	87,688	87,6874	87,6868	87,6861	87,6854	87,6847	87,6839	87,6831	87,6822	87,6814	87,6805	87,6
990	87,4351	87,4348	87,4346	87,4343	87,4339	87,4335	87,4331	87,4327	87,4322	87,4316	87,4311	87,4305	87,4299	87,4292	87,4285	87,4278	87,427	87,4262	87,4254	87,4245	87,4236	87,4
991	87,1799	87,1797	87,1794	87,1791	87,1787	87,1784	87,1779	87,1775	87,177	87,1765	87,1759	87,1753	87,1747	87,1741	87,1734	87,1726	87,1719	87,1711	87,1703	87,1694	87,1685	87,1
992	86,9265	86,9262	86,9258	86,9256	86,9251	86,9249	86,9245	86,9241	86,9236	86,9231	86,9225	86,9219	86,9213	86,9207	86,92	86,9193	86,9185	86,9177	86,9169	86,916	86,9151	86,9
993	86,6748	86,6745	86,6742	86,6739	86,6736	86,6732	86,6728	86,6724	86,6719	86,6714	86,6708	86,6702	86,6696	86,669	86,6683	86,6676	86,6668	86,6661	86,6652	86,6644	86,6635	86,6
994	86,4248	86,4245	86,4242	86,4239	86,4236	86,4232	86,4228	86,4224	86,4219	86,4214	86,4209	86,4203	86,4197	86,419	86,4184	86,4176	86,4169	86,4161	86,4153	86,4145	86,4136	86,4
995	86,1765	86,1762	86,1758	86,1757	86,1751	86,1749	86,1745	86,1741	86,1736	86,1731	86,1726	86,172	86,1714	86,1708	86,1701	86,1694	86,1687	86,1679	86,1671	86,1662	86,1654	86,1
996	85,9299	85,9296	85,9294	85,9291	85,9287	85,9284	85,928	85,9275	85,9271	85,9265	85,926	85,9254	85,9248	85,9242	85,9235	85,9228	85,9221	85,9213	85,9205	85,9197	85,9188	85,9
997	85,6849	85,6847	85,6844	85,6841	85,6838	85,6834	85,683	85,6826	85,6821	85,6817	85,6811	85,6806	85,68	85,6793	85,6787	85,678	85,6772	85,6765	85,6757	85,6748	85,674	85,6
998	85,4417	85,4415	85,4412	85,4409	85,4406	85,4402	85,4398	85,4394	85,4389	85,4384	85,4379	85,4373	85,4367	85,4361	85,4355	85,4348	85,434	85,4333	85,4325	85,4317	85,4308	85,4
999	85,2001	85,1999	85,1996	85,1993	85,199	85,1986	85,1982	85,1978	85,1973	85,1969	85,1963	85,1958	85,1952	85,1946	85,1939	85,1932	85,1925	85,1917	85,191	85,1901	85,1893	85,1
1000	84,9601	84,9599	84,9597	84,9594	84,959	84,9587	84,9583	84,9579	84,9574	84,9569	84,9564	84,9559	84,9553	84,9547	84,954	84,9533	84,9526	84,9519	84,9511	84,9503	84,9494	84,9
1001	84,7218	84,7216	84,7214	84,7211	84,7207	84,7204	84,72	84,7196	84,7191	84,7186	84,7181	84,7176	84,717	84,7164	84,7157	84,7151	84,7143	84,7136	84,7128	84,712	84,7112	84,7
1002	84,4852	84,4849	84,4847	84,4844	84,4841	84,4837	84,4833	84,4829	84,4825	84,482	84,4815	84,4809	84,4803	84,4797	84,4791	84,4784	84,4777	84,477	84,4762	84,4754	84,4746	84,4
1003	84,2501	84,2499	84,2496	84,2493	84,249	84,2486	84,2483	84,2478	84,2474	84,2469	84,2464	84,2459	84,2453	84,2447	84,2441	84,2434	84,2427	84,242	84,2412	84,2404	84,2396	84,2
1004	84,0166	84,0164	84,0161	84,0158	84,0155	84,0152	84,0148	84,0144	84,0139	84,0135	84,013	84,0124	84,0119	84,0113	84,0106	84,01	84,0093	84,0085	84,0078	84,007	84,0062	84,0
1005	83,7847	83,7845	83,7843	83,784	83,7837	83,7833	83,7829	83,7825	83,7821	83,7816	83,7811	83,7806	83,78	83,7794	83,7788	83,7781	83,7774	83,7767	83,776	83,7752	83,7744	83,7
1006																						
1007																						
1008																						
1009																						

Рисунок 22 – Фрагмент сохраненного файла

В панели 5 можно выбрать график, чтобы посмотреть его подробнее в отдельном окне. В нем его можно: развернуть на весь экран, сохранить и включить или отключить легенду графика (по умолчанию включена). График температур по глубине по умолчанию отображает значения температуры на выходе из последнего очага деформации по глубине полосы и рабочего слоя валка. Розовая зона соответствует полосе, а голубая — валку. Можно выбрать другой очаг или межклетевой промежуток в любой момент времени.

График «Температура на поверхности полосы» отображает температуру на поверхности в продольном срезе полосы. Розовые зоны соответствуют очагам деформации, а зеленые — межклетевым промежуткам.

Графики «Предел текучести», «Контактное напряжение», «Тепловой поток, генерируемый трением в зоне контакта» и «Максимальные скалывающие напряжения» отображают соответствующие значения для всех очагов на одном рисунке. В окне у графика «Максимальные скалывающие напряжения» присутствует таблица со значением максимума и глубины по радиусу валка, где она достигается (рисунок 28).

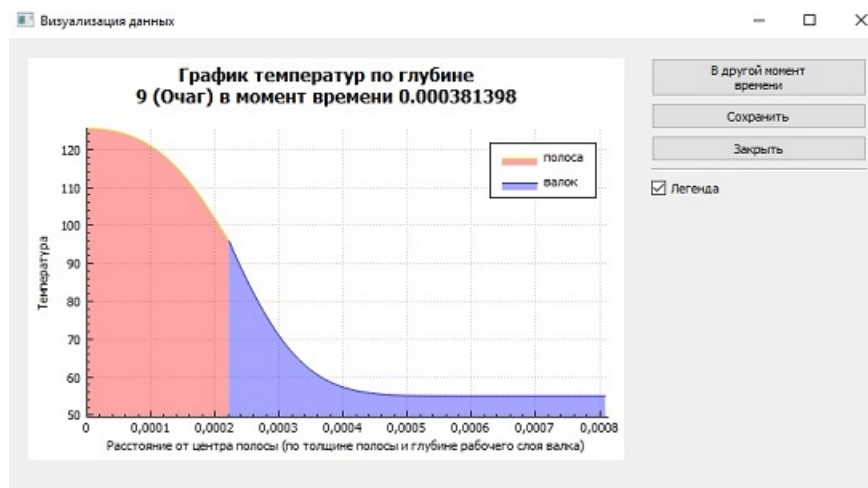


Рисунок 23 – График температур по глубине полосы

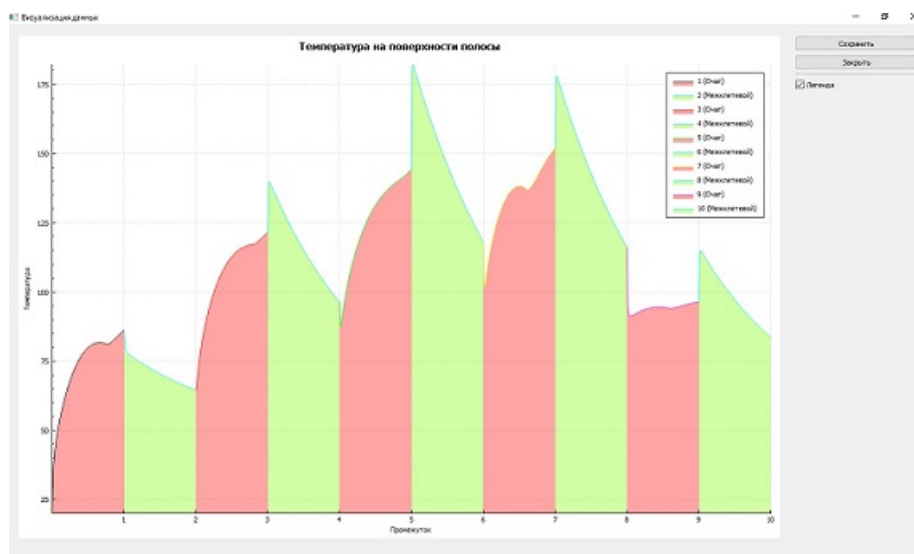


Рисунок 24 – График температур на поверхности полосы

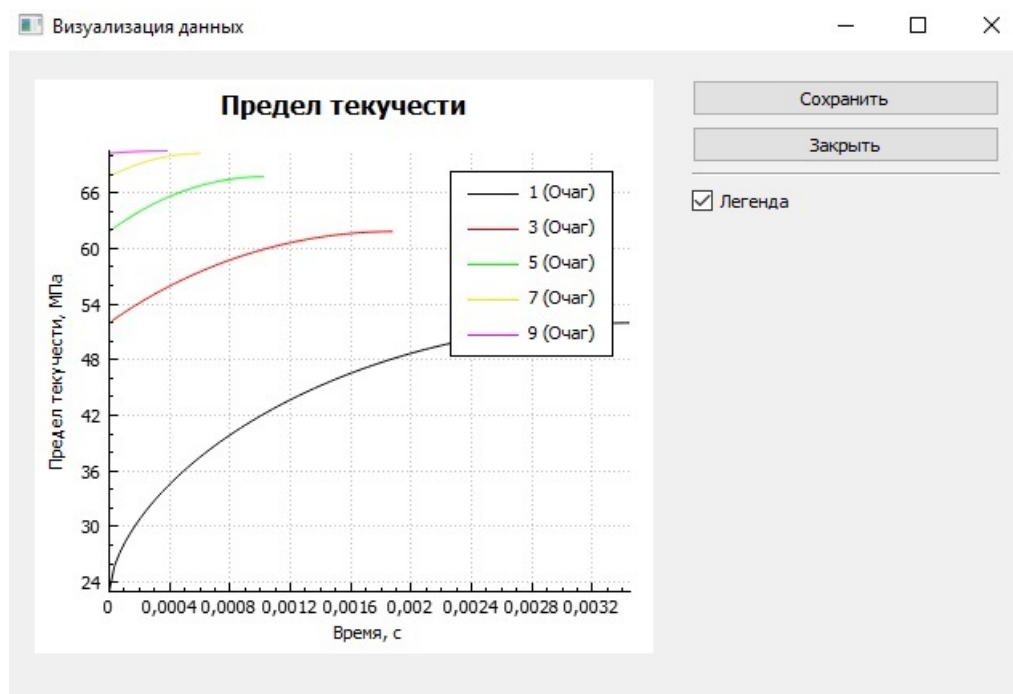


Рисунок 25 – Предел текучести

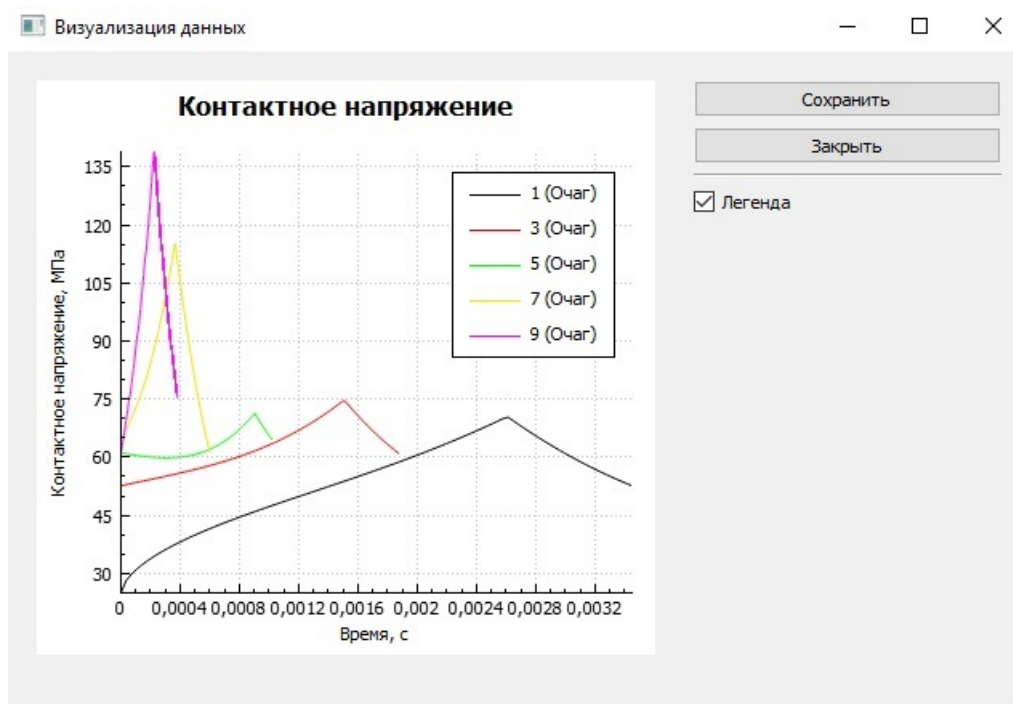


Рисунок 26 – Контактное напряжение

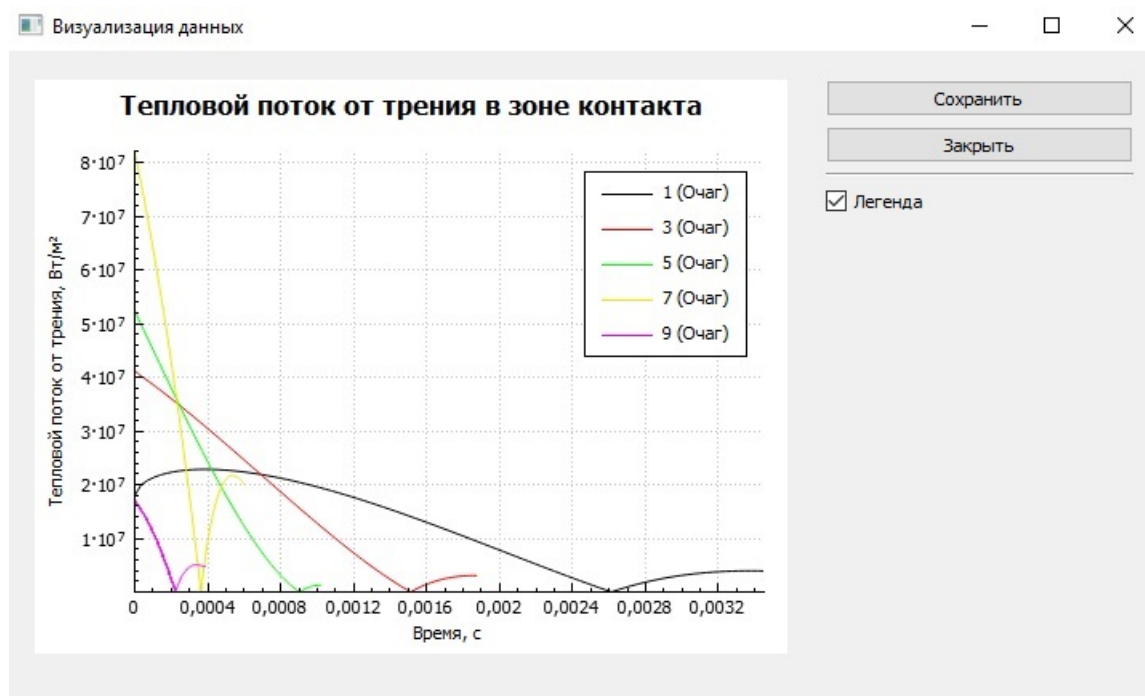


Рисунок 27 – Тепловой поток, генерируемый трением в зоне контакта

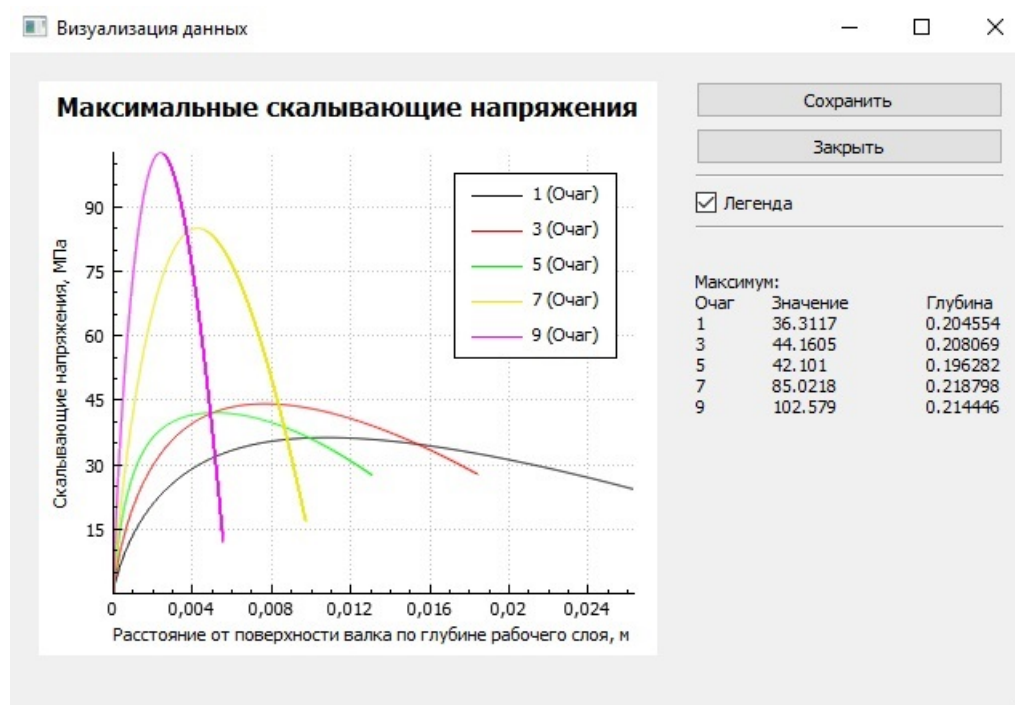


Рисунок 28 – Максимальные скалывающие напряжения

«Распределение температур в продольном сечении полосы» отображает значения температур по глубине полосы и рабочего слоя валка в очагах деформации, а также по глубине полосы в межклетевом промежутке (межклетевым промежуткам соответствуют зоны, над которыми находятся темно-синие прямоугольники).

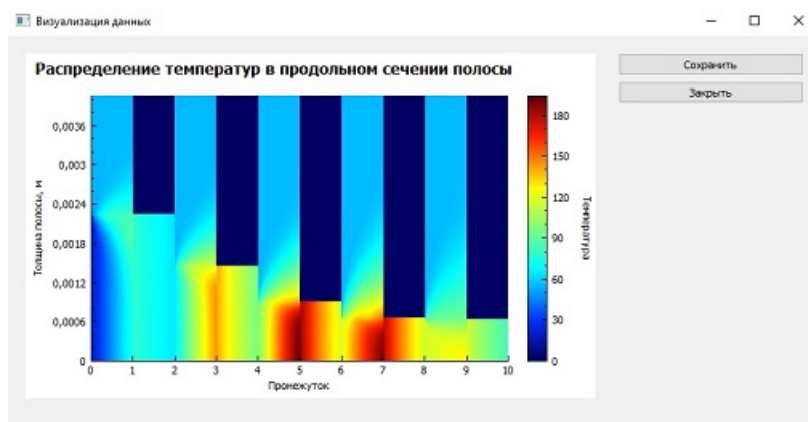


Рисунок 29 – Распределение температур в продольном сечении

«Распределение температур в поперечном сечении полосы» по умолчанию отображается в момент времени, соответствующий выходу из последнего очага. Можно выбрать другой очаг или межклетевой промежуток и любой момент времени для него.

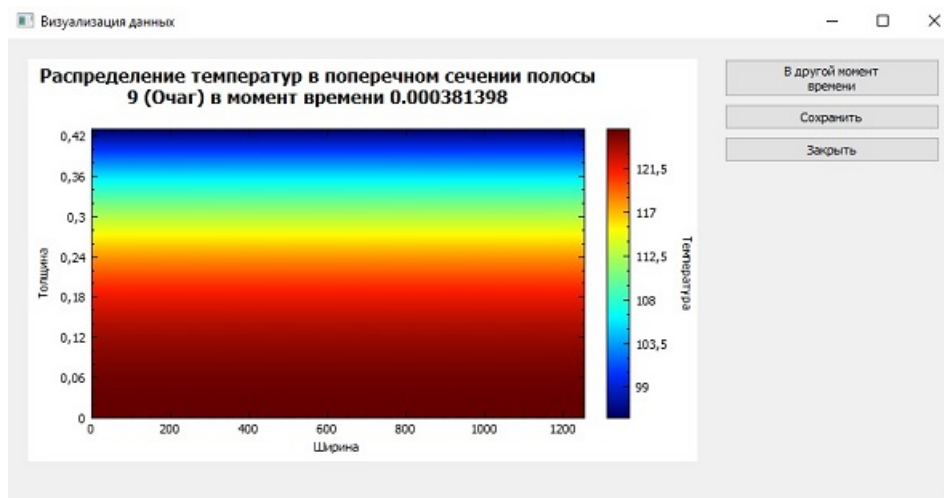


Рисунок 30 – Распределение температур в поперечном сечении полосы

3.5.4 Сообщения оператору

В программе представлены следующие сообщения об ошибках.

Сообщение «Файл не найден или его невозможно прочитать!» возникает при отсутствии файла «ini.txt». В случае возникновения ошибки пользователю нужно нажать на кнопку «ОК» и убедиться в наличии файла «ini.txt». Если его нет — создать с помощью модуля «workfile.exe».

Сообщение «Превышено максимальное число итераций! Не возможно подобрать коэффициент трения под режим усилий.» возникает при подборе коэффициента трения. В случае возникновения ошибки пользователю нужно нажать на кнопку «ОК» и изменить значения усилий на одной или нескольких клетях.

4 Настройка коэффициентов теплообмена

Представим исходные данные, подобранные коэффициенты теплообмена, показания пирометров и расчетных значений тепловых режимов на контрольных точках реверсивных станах. Таблицы с показаниями пирометров и смоделированных температур будем подразделять на 4 секции: 1 — входная моталка, 2 — стол до очага деформации, 3 — стол после очага деформации, 4 — выходная моталка.

4.1 Марка стали 08Ю

Пример 1.

Ширина полосы = 1250, марка стали – 08Ю, $T_{эм} = 50$, $T_{возд} = 20$.
Исходные данные приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Исходные данные

k -й проход	V_k	F_k	T_{b_k}	T_{f_k}	H_k
0	-	-	-	-	1,848
1	279	750	9,2	15,6	1,033
2	255	670	10,2	14,0	0,652
3	353	614	7,1	10,0	0,431
4	308	615	5,0	6,8	0,290
5	403	667	2,0	3,1	0,210

Полученные в результате адаптации коэффициенты теплообмена приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Коэффициенты теплообмена

k -й проход	Зона1	Зона2	Зона3	Зона4	Зона4	Зона3	Зона2	Зона1
1	1600в	1600в	1600в	1600э	225в	225в	80в	80в
2	100э	100э	100э	1800э	1800в	550в	10в	10в
3	130э	230э	330э	1800э	1800в	300в	10в	10в
4	100э	200э	300э	1300э	1300в	200в	5в	5в

Окончание таблицы 11

k -й проход	Зона1	Зона2	Зона3	Зона4	Зона4	Зона3	Зона2	Зона1
5	70э	170э	270э	800э	800в	160в	2300в	230в

В таблице 12 приведены экспериментальные значения температур, полученные с помощью пирометра.

Таблица 12 – Показания пирометра

k -й проход	1	2	3	4
1	58,66867	47,07479	121,5202	106,3478
2	100,3073	115,4795	121,2471	128,0421
3	122,8252	112,5566	120,5207	103,8607
4	97,23356	111,0839	111,2071	115,0236
5	109,1293	99,11263	110,2236	88,90903

В таблице 13 приведены расчетные значения температур, полученные с помощью программы с коэффициентами теплообмена из таблицы 11.

Таблица 13 – Коэффициенты теплообмена

k -й проход	1	2	3	4
1	58	47,0776	121,502	117,92
2	117,949	115,474	127,206	122,279
3	122,282	112,73	123,255	120,089
4	120,09	111,327	112,423	109,348
5	109,348	99,0145	110,616	88,5767

Пример 2.

Ширина полосы = 1250, марка стали – 08Ю, $T_{эм} = 50$, $T_{возд} = 20$.
Исходные данные приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Исходные данные

k -й проход	V_k	F_k	T_{b_k}	T_{f_k}	H_k
0	-	-	-	-	1,849
1	190	778	9,2	15,5	1,033
2	301	703	10,2	14,0	0,652
3	390	648	7,2	10,0	0,431
4	339	657	5,0	6,8	0,290
5	401	730	2,0	3,1	0,211

Полученные в результате адаптации коэффициенты теплообмена приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Коэффициенты теплообмена

k -й проход	Зона1	Зона2	Зона3	Зона4	Зона4	Зона3	Зона2	Зона1
1	1100в	1100в	1100в	1100э	120в	120в	50в	50в
2	80э	80э	80э	1800э	1800в	550в	10в	10в
3	130э	230э	330э	1900э	1900в	350в	10в	10в
4	100э	200э	300э	1360э	1360в	220в	5в	5в
5	70э	170э	270э	770э	770в	140в	215в	215в

В таблице 16 приведены экспериментальные значения температур, полученные с помощью пирометра.

Таблица 16 – Показания пирометра

k -й проход	1	2	3	4
1	59,62383	47,83656	123,1193	108,2653
2	104,1563	117,0698	130,3523	136,213
3	131,0967	121,0359	127,0696	112,7649
4	104,7047	118,1471	117,3804	120,6673
5	115,1507	104,854	115,5184	95,80751

В таблице 17 приведены расчетные значения температур, полученные с помощью программы с коэффициентами теплообмена из таблицы 15.

Таблица 17 – Расчетные значения температур

k -й проход	1	2	3	4
1	59	47,8122	123,142	118,476
2	118,505	116,971	134,105	129,662
3	129,665	120,636	129,634	126,19
4	126,192	117,509	118,426	115,199
5	115,2	104,793	115,898	94,0041

Пример 3.

Ширина полосы = 1270, марка стали – 08Ю, $T_{эм} = 50$, $T_{возд} = 20$.

Исходные данные приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Исходные данные

k -й проход	V_k	F_k	T_{b_k}	T_{f_k}	H_k
0	-	-	-	-	2,282
1	111	701	10,2	20,5	1,548
2	261	679	12,2	16,3	1,086
3	380	656	9,2	10,2	0,760
4	301	648	6,1	7,1	0,547
5	441	614	4,1	5,1	0,410

Полученные в результате адаптации коэффициенты теплообмена приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Коэффициенты теплообмена

k -й проход	Зона1	Зона2	Зона3	Зона4	Зона4	Зона3	Зона2	Зона1
1	1800в	1800в	1800в	1800э	240в	240в	80в	80в
2	200э	200э	200э	1800э	1800в	550в	10в	10в
3	230э	330э	430э	2200э	2200в	650в	35в	35в
4	200э	300э	400э	2100э	2100в	500в	5в	5в
5	240э	340э	440э	1450э	1450в	370в	30в	30в

В таблице 20 приведены экспериментальные значения температур, полученные с помощью пирометра.

Таблица 20 – Показания пирометра

k -й проход	1	2	3	4
1	47,18893	29,30495	75,87238	80,69667
2	77,59534	72,48068	104,8232	110,6942
3	105,4461	96,19495	115,0492	122,6013
4	115,4491	107,5942	100,2879	107,2015
5	103,7909	93,3341	98,44204	106,1495

В таблице 21 приведены расчетные значения температур, полученные с помощью программы с коэффициентами теплообмена из таблицы 19.

Таблица 21 – Расчетные значения температур

k -й проход	1	2	3	4
1	47	32,6722	81,218	77,5772
2	77,6022	74,3821	106,564	104,304
3	104,307	98,0634	120,249	116,42
4	116,429	109,621	107,448	103,934
5	103,934	93,5827	109,334	105,704

Пример 4.

Ширина полосы = 1250, марка стали – 08Ю, $T_{эм} = 50$, $T_{возд} = 20$.

Исходные данные приведены в таблице 22.

Таблица 22 – Исходные данные

k -й проход	V_k	F_k	T_{b_k}	T_{f_k}	H_k
0	-	-	-	-	2,492
1	143	727	10,2	20,3	1,649
2	389	671	13,3	18,4	1,155
3	553	624	11,2	12,8	0,820
4	371	595	8,2	9,2	0,612

k -й проход	V_k	F_k	T_{b_k}	T_{f_k}	H_k
5	464	574	5,1	6,1	0,480
6	294	709	2,1	2,7	0,211

Полученные в результате адаптации коэффициенты теплообмена приведены в таблице 23.

Таблица 23 – Коэффициенты теплообмена

k -й проход	Зона1	Зона2	Зона3	Зона4	Зона4	Зона3	Зона2	Зона1
1	2400 _В	2400 _В	2400 _В	2400 _Э	280 _В	280 _В	125 _В	125 _В
2	430 _Э	430 _Э	430 _Э	1800 _Э	1800 _В	560 _В	45 _В	45 _В
3	480 _Э	580 _Э	680 _Э	2600 _Э	2600 _В	800 _В	100 _В	100 _В
4	450 _Э	550 _Э	650 _Э	2570 _Э	2570 _В	630 _В	5 _В	5 _В
5	240 _Э	340 _Э	440 _Э	1980 _Э	1980 _В	545 _В	30 _В	30 _В
6	35 _Э	35 _Э	35 _Э	2400 _Э	2400 _В	195 _В	5 _В	5 _В

В таблице 24 приведены экспериментальные значения температур, полученные с помощью пирометра.

Таблица 24 – Показания пирометра

k -й проход	1	2	3	4
1	51,38486	35,32304	81,40515	85,70946
2	82,39244	76,44199	118,9985	122,6205
3	115,1823	107,5562	130,2705	139,128
4	128,4586	119,1285	111,5122	114,8363
5	110,6885	101,7826	103,1254	108,1684
6	83,27098	99,01802	90,76926	91,37973

В таблице 25 приведены расчетные значения температур, полученные с помощью программы с коэффициентами теплообмена из таблицы 23.

Таблица 25 – Расчетные значения температур

k -й проход	1	2	3	4
1	51	35,0377	86,4035	82,2331
2	82,2783	76,5504	118,333	116,03
3	116,048	107,528	133,517	128,865
4	128,897	119,373	113,479	110,125
5	110,126	101,481	103,365	99,8264
6	99,8304	99,0099	94,5238	91,0474

4.2 Марка стали 0303

Пример 1.

Ширина полосы = 1030, марка стали – 0303, $T_{эм} = 50$, $T_{возд} = 20$.

Исходные данные приведены в таблице 26.

Таблица 26 – Исходные данные

k -й проход	V_k	F_k	T_{b_k}	T_{f_k}	H_k
0	-	-	-	-	2,021
1	131	785	10,2	18,7	1,334
2	274	772	12,2	16,6	0,934
3	393	738	7,1	8,3	0,671
4	257	720	4,6	5,7	0,521

Полученные в результате адаптации коэффициенты теплообмена приведены в таблице 27.

Таблица 27 – Коэффициенты теплообмена

k -й проход	Зона1	Зона2	Зона3	Зона4	Зона4	Зона3	Зона2	Зона1
1	700в	700в	700в	850э	850в	280в	10в	10в
2	10э	10э	10э	2290э	2290в	575в	10в	10в
3	170э	170э	170э	2950э	2950в	720в	10в	10в
4	10э	10э	10э	2040э	2040в	500в	5в	5в

В таблице 28 приведены экспериментальные значения температур, полученные с помощью пирометра.

Таблица 28 – Показания пирометра

k -й проход	1	2	3	4
1	74,41118	60,71149	113,1083	109,4117
2	108,8148	111,3995	131,304	134,9157
3	133,1143	127,559	134,2169	132,2713
4	131,5456	132,7785	107,1856	108,0586

В таблице 29 приведены расчетные значения температур, полученные с помощью программы с коэффициентами теплообмена из таблицы 27.

Таблица 29 – Расчетные значения температур

k -й проход	1	2	3	4
1	74	60,6263	113,877	111,567
2	111,571	111,197	136,564	133,014
3	133,018	127,347	136,8	132,538
4	132,54	132,208	112,183	107,633

Пример 2.

Ширина полосы = 1030, марка стали – 0303, $T_{эм} = 50$, $T_{возд} = 20$. Исходные данные приведены в таблице 30.

Таблица 30 – Исходные данные

k -й проход	V_k	F_k	T_{b_k}	T_{f_k}	H_k
0	-	-	-	-	1,990
1	103	741	10,2	18,6	1,334
2	196	768	12,3	16,6	0,933
3	187	751	7,2	8,3	0,671
4	166	719	4,6	5,7	0,521

Полученные в результате адаптации коэффициенты теплообмена приведены в таблице 31.

Таблица 31 – Коэффициенты теплообмена

k -й проход	Зона1	Зона2	Зона3	Зона4	Зона4	Зона3	Зона2	Зона1
1	360э	360э	360э	1650э	1650в	300в	10в	10в
2	10э	10э	10э	1660э	1660в	475в	10в	10в
3	185э	185э	185э	1760э	1760в	450в	10в	10в
4	10э	10э	10э	1320э	1320в	270в	10в	10в

В таблице 32 приведены экспериментальные значения температур, полученные с помощью пирометра.

Таблица 32 – Показания пирометра

k -й проход	1	2	3	4
1	135,2356	120,1963	119,1932	115,1204
2	113,8882	116,3018	128,5581	131,5881
3	130,1957	122,9497	119,0522	114,8226
4	112,7766	114,0414	96,22141	99,08869

В таблице 33 приведены расчетные значения температур, полученные с помощью программы с коэффициентами теплообмена из таблицы 31.

Таблица 33 – Расчетные значения температур

k -й проход	1	2	3	4
1	135	120,407	119,923	116,607
2	116,611	116,098	134,99	130,792
3	130,796	122,581	119,42	114,325
4	114,327	113,788	103,21	99,1111

Пример 3.

Ширина полосы = 1030, марка стали – 0303, $T_{эм} = 50$, $T_{возд} = 20$. Исходные данные приведены в таблице 34.

Таблица 34 – Исходные данные

k -й проход	V_k	F_k	T_{b_k}	T_{f_k}	H_k
0	-	-	-	-	2,008
1	116	783	10,2	18,6	1,334
2	300	795	12,2	16,6	0,934
3	301	771	7,2	8,3	0,671
4	253	747	4,6	5,7	0,521

Полученные в результате адаптации коэффициенты теплообмена приведены в таблице 35.

Таблица 35 – Коэффициенты теплообмена

k -й проход	Зона1	Зона2	Зона3	Зона4	Зона4	Зона3	Зона2	Зона1
1	650э	650э	650э	1390э	1390в	245в	10в	10в
2	10э	10э	10э	2080э	2080в	485в	10в	10в
3	185э	185э	185э	2590э	2590в	565в	10в	10в
4	10э	10э	10э	2090э	2090в	300в	10в	10в

В таблице 36 приведены экспериментальные значения температур, полученные с помощью пирометра.

Таблица 36 – Показания пирометра

k -й проход	1	2	3	4
1	103,4887	89,64002	118,6145	114,4009
2	114,0988	116,6639	142,246	144,6559
3	143,9412	137,5817	135,7642	132,1058
4	131,0922	132,3982	110,7779	112,7201

В таблице 37 приведены расчетные значения температур, полученные с помощью программы с коэффициентами теплообмена из таблицы 35.

Таблица 37 – Расчетные значения температур

k -й проход	1	2	3	4
1	103	89,5574	119,046	116,551
2	116,555	116,099	146,745	143,707
3	143,711	137,34	136,873	132,352
4	132,355	131,924	115,805	112,425

Пример 4.

Ширина полосы = 1030, марка стали – 0303, $T_{эм} = 50$, $T_{возд} = 20$.
Исходные данные приведены в таблице 38.

Таблица 38 – Исходные данные

k -й проход	V_k	F_k	T_{b_k}	T_{f_k}	H_k
0	-	-	-	-	1,986
1	178	732	10,2	18,7	1,333
2	210	752	12,3	16,6	0,935
3	214	729	7,2	8,3	0,670
4	223	686	4,6	5,7	0,522

Полученные в результате адаптации коэффициенты теплообмена приведены в таблице 39.

Таблица 39 – Коэффициенты теплообмена

k -й проход	Зона1	Зона2	Зона3	Зона4	Зона4	Зона3	Зона2	Зона1
1	700в	700в	700в	920э	920в	330в	10в	10в
2	10э	10э	10э	2050э	2050в	375в	10в	10в
3	170э	170э	170э	2100э	2100в	370в	10в	10в
4	13э	13э	13э	1650э	1650в	300в	10в	10в

В таблице 40 приведены экспериментальные значения температур, полученные с помощью пирометра.

Таблица 40 – Показания пирометра

k -й проход	1	2	3	4
1	83,00573	70,52084	120,1364	117,0618
2	116,9653	119,3634	133,329	136,67
3	136,1063	128,7501	125,1579	121,3883
4	120,1565	121,1996	103,9453	107,1898

В таблице 41 приведены расчетные значения температур, полученные с помощью программы с коэффициентами теплообмена из таблицы 39.

Таблица 41 – Расчетные значения температур

k -й проход	1	2	3	4
1	83	70,809	121,645	119,576
2	119,581	119,267	139,473	136,137
3	136,141	128,58	125,901	121,853
4	121,855	121,17	110,975	107,345

Пример 5.

Ширина полосы = 1030, марка стали – 0303, $T_{эм} = 50$, $T_{возд} = 20$. Исходные данные приведены в таблице 42.

Таблица 42 – Исходные данные

k -й проход	V_k	F_k	T_{b_k}	T_{f_k}	H_k
0	-	-	-	-	1,994
1	123	739	10,2	18,8	1,335
2	221	773	12,2	16,6	0,934
3	223	743	7,1	8,3	0,671
4	262	684	4,6	5,7	0,522

Полученные в результате адаптации коэффициенты теплообмена приведены в таблице 43.

Таблица 43 – Коэффициенты теплообмена

k -й проход	Зона1	Зона2	Зона3	Зона4	Зона4	Зона3	Зона2	Зона1
1	500э	500э	500э	1380э	1380в	270в	10в	10в
2	10э	10э	10э	2150э	2150в	270в	10в	10в
3	185э	185э	185э	2240э	2240в	365в	10в	10в
4	15э	15э	15э	1830э	1830в	275в	10в	10в

В таблице 44 приведены экспериментальные значения температур, полученные с помощью пирометра.

Таблица 44 – Показания пирометра

k -й проход	1	2	3	4
1	118,6216	104,5897	126,2815	122,2748
2	121,6637	123,8968	135,4912	139,9116
3	139,6855	131,675	124,9676	123,0708
4	121,5912	122,3165	109,098	113,7745

В таблице 45 приведены расчетные значения температур, полученные с помощью программы с коэффициентами теплообмена из таблицы 43.

Таблица 45 – Расчетные значения температур

k -й проход	1	2	3	4
1	118	104,608	126,93	124,202
2	124,207	123,727	142,382	139,879
3	139,883	131,725	126,94	123,065
4	123,068	122,298	116,782	113,706

4.3 Марка стали ВПС

Пример 1.

Ширина полосы = 1040, марка стали – ВПС, $T_{эм} = 50$, $T_{возд} = 20$.
Исходные данные приведены в таблице 46.

Таблица 46 – Исходные данные

k -й проход	V_k	F_k	T_{b_k}	T_{f_k}	H_k
0	-	-	-	-	2,274
1	153	1080	9,2	22,5	1,532
2	507	1036	16,3	20,6	0,984
3	504	1088	10,7	12,9	0,630
4	529	1114	6,6	8,3	0,420
5	404	1236	5,1	6,2	0,285

Полученные в результате адаптации коэффициенты теплообмена приведены в таблице 47.

Таблица 47 – Коэффициенты теплообмена

k -й проход	Зона1	Зона2	Зона3	Зона4	Зона4	Зона3	Зона2	Зона1
1	2000э	2000э	1000э	1000э	1000в	685в	5в	5в
2	15э	15э	40э	1300э	1300в	770в	10в	10в
3	440э	440э	800э	1300э	1300в	800в	85в	85в
4	10э	10э	400э	1500э	1500в	150в	10в	10в
5	100э	100э	800э	1070э	1070в	107в	84в	84в

В таблице 48 приведены экспериментальные значения температур, полученные с помощью пирометра.

Таблица 48 – Показания пирометра

k -й проход	1	2	3	4
1	82,11049	68,21401	121,4183	119,3993
2	119,7977	119,1666	187,0934	191,6016
3	187,4124	173,2124	218,5094	208,3001
4	208,5213	204,4753	231,3628	230,2496
5	233,5801	213,5334	203,4249	189,9884

В таблице 49 приведены расчетные значения температур, полученные с помощью программы с коэффициентами теплообмена из таблицы 47.

Таблица 49 – Расчетные значения температур

k -й проход	1	2	3	4
1	82	68,2209	121,908	118,638
2	118,64	118,039	190,397	187,319
3	187,325	173,208	218,893	208,287
4	208,323	204,467	232,759	230,19
5	230,333	213,074	203,272	189,887

Пример 2.

Ширина полосы = 1040, марка стали – ВПС, $T_{эм} = 50$, $T_{возд} = 20$.
Исходные данные приведены в таблице 50.

Таблица 50 – Исходные данные

k -й проход	V_k	F_k	T_{b_k}	T_{f_k}	H_k
0	-	-	-	-	2,270
1	131	1069	9,2	22,3	1,533
2	290	1106	16,3	20,4	0,984
3	364	1133	10,7	12,7	0,631
4	416	1077	8,2	9,2	0,422
5	418	1025	7,1	8,2	0,285

Полученные в результате адаптации коэффициенты теплообмена приведены в таблице 51.

Таблица 51 – Коэффициенты теплообмена

k -й проход	Зона1	Зона2	Зона3	Зона4	Зона4	Зона3	Зона2	Зона1
1	1100э	1100э	900э	800э	20в	20в	20в	20в
2	200э	300э	400э	3000э	150в	150в	150в	150в
3	250э	350э	450э	4500э	120в	120в	120в	120в
4	100э	170э	230э	3200э	230в	230в	230в	230в
5	200э	250э	300э	5000э	50в	50в	50в	50в

В таблице 52 приведены экспериментальные значения температур, полученные с помощью пирометра.

Таблица 52 – Показания пирометра

<i>k</i> -й проход	1	2	3	4
1	71,44368	64,20819	134,857	144,89474
2	142,2845	134,55412	175,9338	188,68198
3	188,606	171,21463	210,0072	218,54111
4	214,9062	203,10501	195,4575	200,58264
5	199,8641	179,89991	195,661	194,96637

В таблице 53 приведены расчетные значения температур, полученные с помощью программы с коэффициентами теплообмена из таблицы 51.

Таблица 53 – Расчетные значения температур

<i>k</i> -й проход	1	2	3	4
1	71	64,2696	143,805	142,483
2	142,496	133,428	197,971	188,178
3	187,419	171,586	227,655	216,341
4	216,393	204,293	226,84	199,823
5	199,884	179,284	201,417	193,468

Заключение

В ходе работы были получены модели, описывающие процесс проката на непрерывных и реверсивных станах. Моделирование энергосиловых параметров производилось с помощью уравнения Т. Кармана. Коэффициент трения находился подбором значений под заданные усилия. Для моделирования тепловых режимов использовалось уравнение теплопроводности с граничными условиями первого и второго рода в очаге деформации, а второго и третьего рода в межклетевом промежутке. Также были приведены формулы максимальных скалывающих напряжений в нейтральном сечении очага деформации по радиусу вала.

Модели и расчетные формулы реализованы в пакете прикладных программ. Все выходные характеристики предоставляются в табличном или графическом виде. Использование программного обеспечения в технологической практике позволит анализировать и оптимизировать технологические режимы, выявлять причины ухудшения качества проката и повреждения оборудования.

Список использованных источников

1. *Полухин П. И., Хензель А., Полухин В.* Технология процессов обработки металлов давлением. — М.:Металлургия, 1988. — 408 с.
2. *Целиков А. И., Никитин Г. С., Рокотян С.* Теория продольной прокатки. — М.:Металлургия, 1980. — 320 с.
3. *Пименов В. А., Бабушко Ю. Ю., Бахтин С. В.* Разработка технологии реверсивной холодной прокатки тонкого высококремнистого проката на основе математической модели энергосиловых и тепловых процессов // *Сталь*. — 2014. — № 10. — с. 35—39.
4. *Беляев Д. Ю., Орешина М. Н.* Моделирование теплового режима контакта валок-полоса при холодной прокатке. // *Материалы научной конференции по проблемам технических наук*. т. 1. — Липецк : ЛГТУ, 2014. — с. 26—28.
5. *Беляев Д. Ю., Орешина М. Н., Пименов В. А.* Разработка математических моделей энергосиловых и тепловых режимов в очаге деформации при холодной прокатке. // *Материалы научной конференции по проблемам технических наук*. т. 1. — Липецк : ЛГТУ, 2015. — с. 17—19.
6. *Беляев Д. Ю., Орешина М. Н.* Моделирование теплового режима контакта валок-полоса в очаге деформации при холодной прокатке. // VII Международная студенческая электронная научная конференция РАЕ «Студенческий научный форум»-2015. т. 1. — : 2015. — URL: <http://www.scienceforum.ru/2015/1352/9558> (дата обр. 27.04.2015).
7. *Беляев Д. Ю., Орешина М. Н.* Математическое моделирование теплового режима непрерывной холодной прокатки. // Двенадцатая всероссийская научно – практическая конференция с международным участием «Современные проблемы горно-металлургического комплекса. Наука и производство. т. 1. — Старый Оскол : 2015. — с. 119—125.
8. *Робертс В. Л.* Холодная прокатка стали. — М.:Металлургия, 1982. — 544 с.

9. *Третьяков А. В.* Теория, расчет и исследование станов холодной прокатки. — М.:Металлургия, 1966. — 253 с.
10. *Новацкий В.* Теория упругости. — М.:Мир, 1975. — 872 с.
11. Контактное взаимодействие металла и инструмента при прокатке. / П. Полухин, В. Николаев, В. Полухин, А. Зиновьев [и др.]. — М.:Металлургия, 1974. — 200 с.
12. *Самарский А. А.* Введению в теорию разностных схем. — М.:Наука, 1971. — 533 с.
13. *Самарский А. А., Тихонов А. Н.* Уравнения математической физики. — М.:Наука, 1977. — 736 с.
14. *Самарский А. А., Гулин А. В.* Численные методы. — М.:Наука, 1989. — 432 с.
15. *Третьяков А. В., Гарбер Э. А.* Совершенствование теплового процесса листовой прокатки. — М.:Металлургия, 1973. — 304 с.

Приложение А (рекомендуемое)

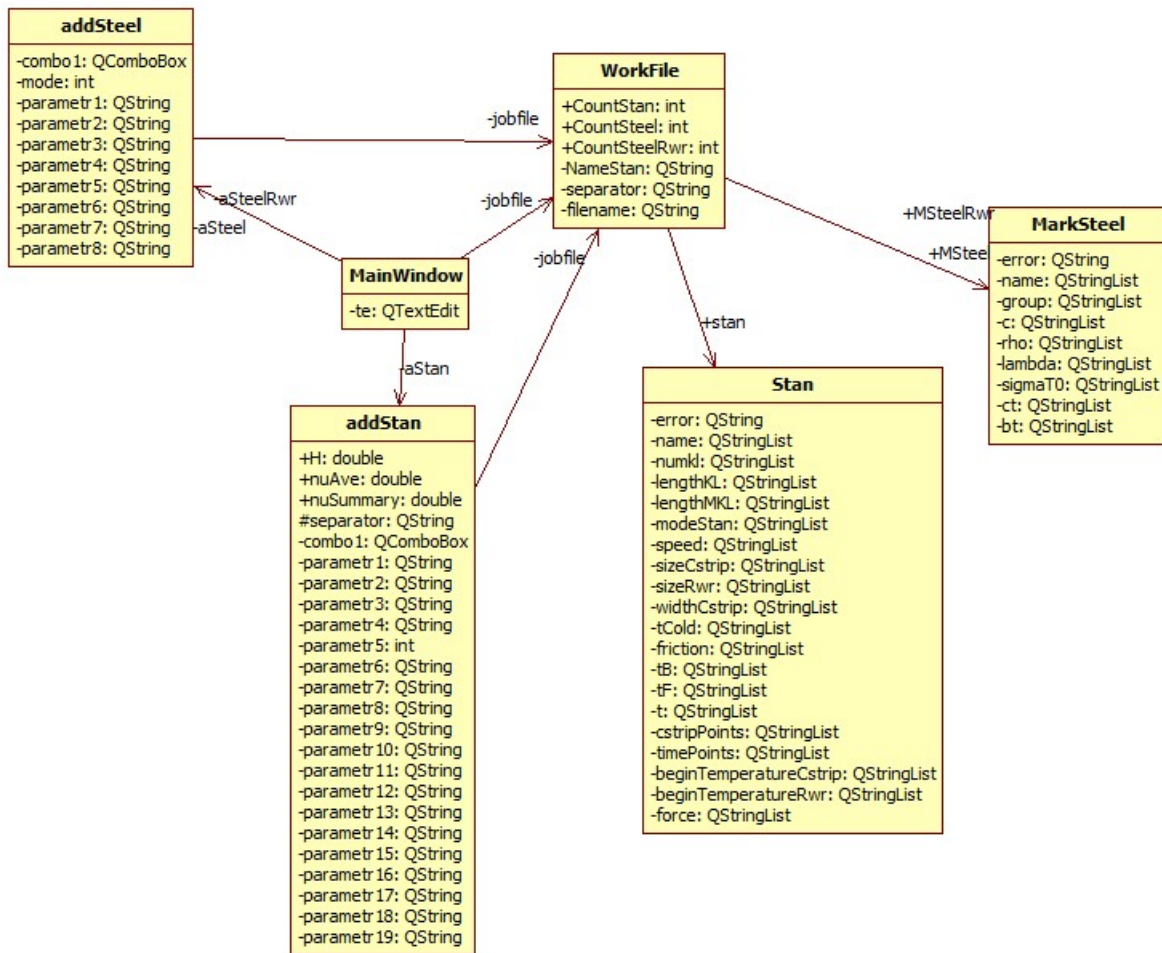


Рисунок А.1 – Диаграмма классов «workfile.exe»

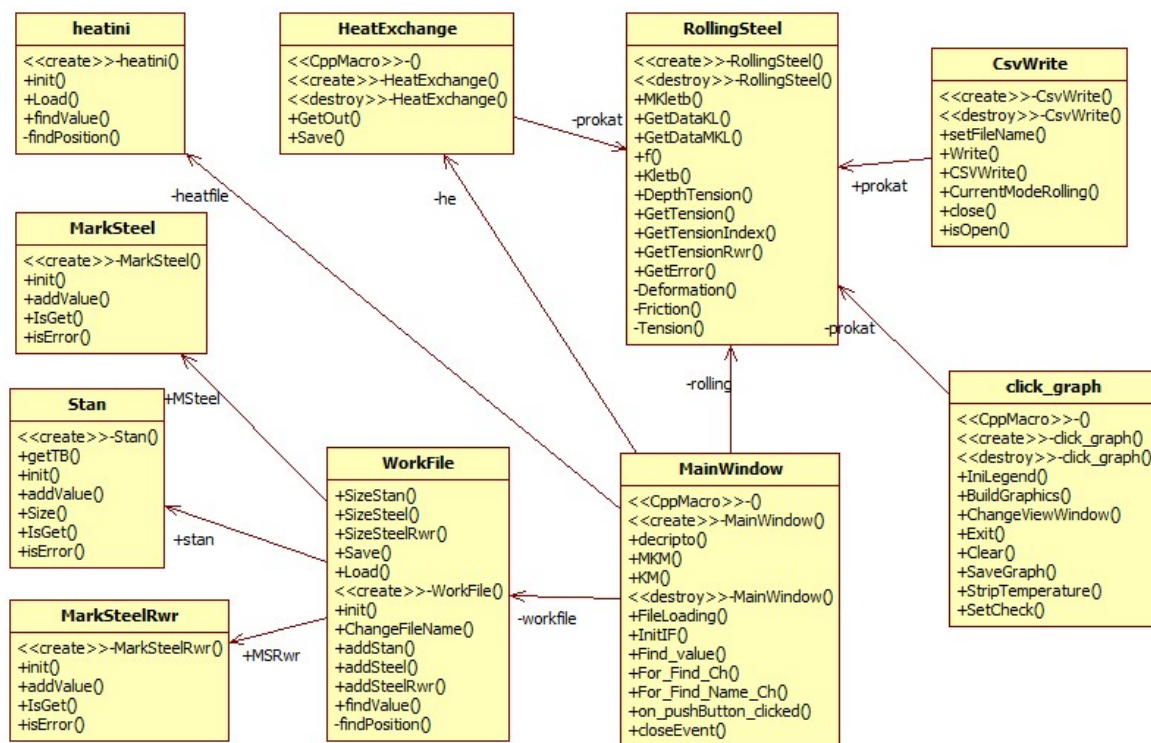


Рисунок А.2 – Диаграмма классов «arm-technology.exe»