

3. Лученкова Е.Б., Носков М.В., Шершнева В.А. Смешанное обучение математике: практика опередила теорию // Вестник КГПУ им. В.П. Астафьева. 2015. № 1. С. 54-59.

4. Зыкова Т.В., Карнаухова О.А., Сидорова Т.В., Шершнева В.А. Особенности электронного обучения математике студентов инженерного вуза // Вестник КГПУ им. В.П. Астафьева. 2014. № 3 (29). С. 55-61.

5. Парыгина С.А., Сенатова И.А., Гордобаева Т.В. О преодолении трудностей освоения студентами математических дисциплин в условиях реализации ФГОС ВПО в ЧГУ // Вестник Череповецкого государственного университета. 2013. № 3. Т. 1. С. 128-132.

#### **About the electronic educational course in mathematics**

*Marina Paleeva, PhD, Associate Professor*

*The problems of development and implementation of e-learning course "Mathematics" for students of technical areas of distance learning are described. The peculiarities of teaching materials, approaches to designing of the content, the functional tasks, used in e-learning system are analyzed.*

*Keywords – remote educational technologies, e-learning course, mathematical learning, students' self educational activity.*

УДК 004.42

### **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТЕПЛОТЕХНИКИ**

*Артём Александрович Портянкин, аспирант*

*Тел.: 8 913 553 3633, e-mail: aa\_portyankin@gmail.com*

*Сибирский федеральный университет*

*http://www.sfu-kras.ru*

*Светлана Михайловна Тинькова, канд. техн. наук, доцент*

*Тел.: 8 913 535 3106, e-mail: tinkovasvetlana@mail.ru*

*Сибирский федеральный университет*

*http://www.sfu-kras.ru*

*Татьяна Валериевна Пискажова, д-р техн. наук, зав. кафедры,*

*Тел.: 8 963 267 1709, e-mail: piskazhova@ya.ru*

*Сибирский федеральный университет*

*http://www.sfu-kras.ru*

*В связи с необходимостью повышения качества обучения специалистов горно-металлургической отрасли, ведется разработка специализированного комплекса программ для решения задач теплотехники. Разработанный комплекс позволяет проводить как типовые инженерные расчеты, так и исследования по различным критериям.*

*Ключевые слова: многослойная стенка, межфазный переход, граничные условия, теплопроводность, дистанционное обучение.*



**А.А. Портянкин**

Внедрение информационных технологий (ИТ) в процесс обучения инженерным предметам в настоящее время является недостаточным именно в области овладения специальными профессиональными компетенциями [1; 2]. Студенты пользуются в основном стандартным офисным программным обеспечением, предназначенным для решения общих задач и подготовки документов. Как следствие, по окончании



**С.М. Тинькова**

ВУЗа, специалисты часто не имеют опыта работы с различными специализированными программами и не умеют прогнозировать влияние различных переменных процесса на исследуемый объект. Работодателю необходимо доучивать новых работников, что требует дополнительных вложений и времени. Исходя из этого, необходимо повышать уровень знаний будущих специалистов во время их обучения. Эту задачу можно решить путем создания специализированного программного обеспечения и его внедрения в процесс подготовки будущих специалистов горно-металлургического комплекса.



Т.В. Пискажова

Специальные компьютерные программы повышают качество обучения за счет проведения большего количества операций за короткий промежуток времени, структурирования учебной информации на разных уровнях, систематизации процесса представления информации и организации интерактивного общения.

Целью работы является создание программного комплекса для подготовки специалистов горно-металлургической отрасли и решения исследовательских и типовых задач в теплотехнике.

Программный комплекс позволяет решать задачи, а с помощью цветowych анимационных иллюстраций и графического интерфейса наглядно представлять полученные результаты, предусматривает возможность интерактивного взаимодействия между пользователем и элементами программы, при этом обеспечивает мгновенный контроль усвоения материала. Данный комплекс может быть использован для дистанционного обучения.

Программное обеспечение реализовано в среде объектно-ориентированного программирования C++ Builder. При создании программы использованы: теория теплопередачи, численные методы для решения обыкновенных дифференциальных уравнений, метод конечных разностей и др.

### Описание программного комплекса

Разработанный программный комплекс для решения теплотехнических задач имеет структуру, представленную на рис.1:



Рис. 1. Структура программного комплекса

Далее рассмотрены возможности программ представленного комплекса.

*Модели скоростного конвективного нагрева металла для использования в алгоритмах АСУТП.*

Одним из актуальных направлений совершенствования технологического режима нагрева металла является внедрение современных АСУТП печей, что в свою очередь

требует энергосберегающих алгоритмов управления, использующих математические модели процессов. Технологический процесс прокатного производства содержит такие обязательные операции, как подготовка исходного материала, его нагрев, прокатка и отделка. Нагрев металла перед прокаткой повышает его пластичность и улучшает физико-механические свойства.

Программа имеет следующие функциональные возможности:

- расчет переменных, при нагреве сляба, методом конечных разностей;
- расчет переменных, при нагреве сляба, методом обыкновенных дифференциальных уравнений;
- экспорт данных в MS Excel.

Программа состоит из двух основных частей:

- Математического обеспечения, включающего уравнения и алгоритмы для расчетов температур и их динамических изменений при воздействиях.
- Интерфейса пользователя (рис.2), позволяющего вводить условия и видеть результаты расчетов.

В программе реализована авторская модель нагрева материалов, учитывающая теплопроводность нагреваемого материала, удобная к использованию в АСУТП.

По разработанным моделям были проведены исследования и сделан сравнительный анализ полученных результатов.

*Учебно-консультационная программа для определения параметров и переменных плоской многослойной стенки.*

При изучении теплотехнических дисциплин студенты сталкиваются с задачами по определению параметров и переменных многослойной стенки. Для того чтобы учащиеся могли лучше представлять и понимать процессы теплопередачи и плавления (кристаллизации) гарнисажа, была создана специализированная программа.

Программа имеет следующие функциональные возможности:

- расчет теплового потока и распределения температур по толщине плоской многослойной стенки при задании граничных условий 1-го или 3-го рода;

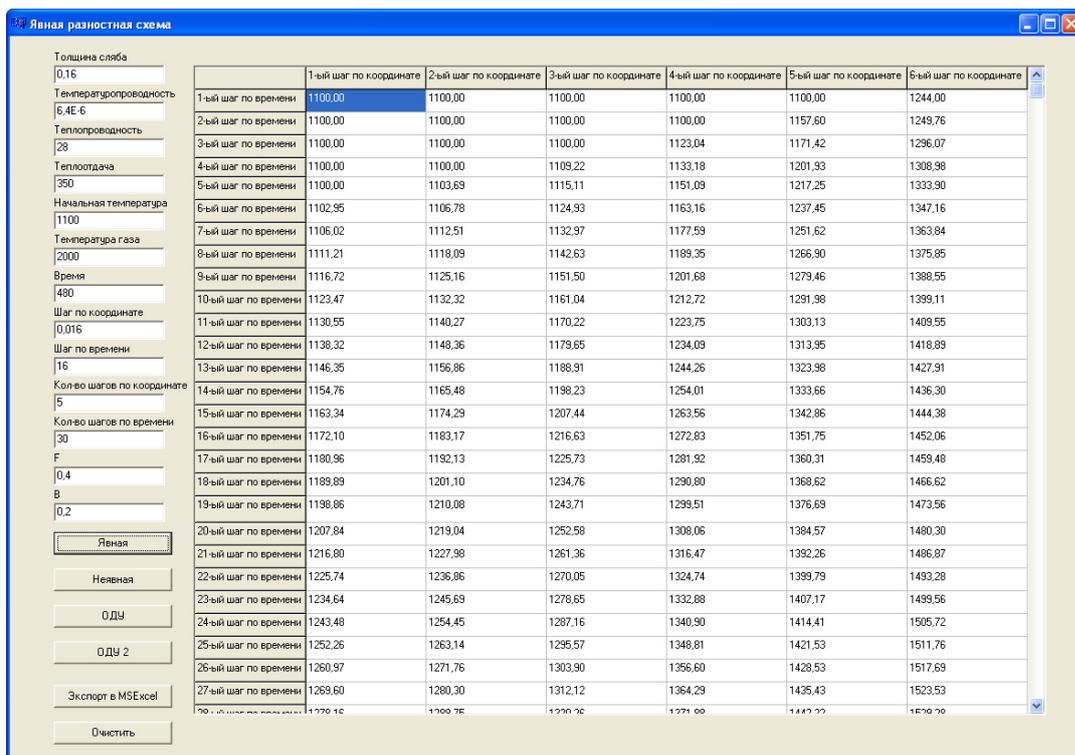


Рис. 2. Интерфейс программы для расчета переменных при нагреве сляба

- расчет толщины третьего слоя стенки при задании граничных условий 1-го рода – возможность выбора материала теплоизоляции;
- расчет толщины гарнисажа при задании граничных условий 3-го рода;
- динамический расчет изменения распределения температур в слоях стенки, при подаче различных воздействий;
- динамический расчет толщины гарнисажа на многослойной стенке, при изменении управляющего воздействия.

Программа состоит из трех основных частей:

- базы данных по огнеупорным и теплоизоляционным материалам;
- математического обеспечения, включающего уравнения и алгоритмы для расчетов потоков и температур в стационарных условиях и их динамических изменений при различных воздействиях;
- интерфейса пользователя, позволяющего вводить условия и видеть результаты расчетов.

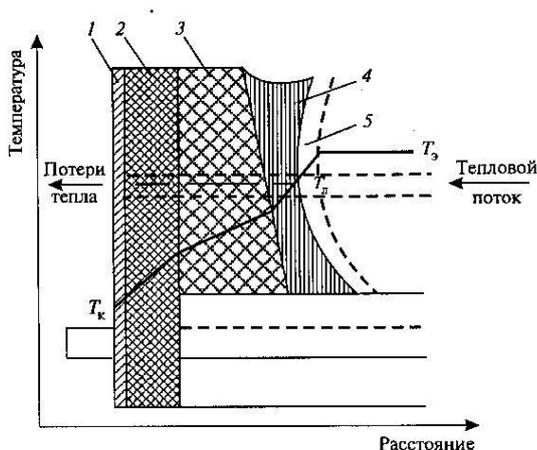
Допущения, используемые в программе:

- коэффициент внешнего теплообмена рассчитывается при задании температуры внешней среды (воздуха) равной  $20^{\circ}\text{C}$ ;
- коэффициент внутреннего теплообмена рассчитывается относительно начального (статического) распределения температур и теплового потока и не меняется с течением времени;
- температура на границе внутренней среды и гарнисажа равна температуре ликвидуса.

Представленная программа опробована в процессе обучения бакалавров и магистрантов института цветных металлов и материаловедения СФУ по направлениям «Металлургия», «Автоматизация технологических процессов и производств», «Управление в технических системах».

Типовые статические расчеты более подробно рассмотрены в [3].

Также на сегодняшний день на производстве остро стоит проблема определения поведения гарнисажа в печах [4]. Роль гарнисажа сводится в основном к изоляции расплава от поверхности ограждающей стенки для обеспечения чистоты расплава и сохранения поверхности. При этом гарнисаж играет также роль теплоизоляции, уменьшая тепловые потери плавильного устройства. Например, на рис. 3 изображен поперечный разрез стенки алюминиевого электролизера, в котором имеется гарнисаж (настыль).



**Рис. 3. Структура стенки и распределение температуры в ней**

1 – кожух; 2 – теплоизоляция; 3 – бортовой блок; 4 – гарнисаж (настыль); 5 – пограничный слой электролита;  $T_k$  – температура кожуха;  $T_l$  – температура ликвидуса;  $T_e$  – температура электролита.

Гарнисаж (настыль) играет важную роль в работе печи для производства алюминия:

- защищает блоки от разрушения; растворенный в электролите или жидкий металлический алюминий реагирует с углеродом с образованием карбида (Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>), который растворяется в электролите. Гарнисаж (настыль) является единственной надежной защитой бортовых блоков;

- служит естественным регулятором температуры электролиза. При повышении температуры гарнисаж растворяется, что приводит к уменьшению теплового сопротивления, увеличению тепловых потерь и падению температуры (рис. 3).

Перегрев электролита и увеличение коэффициента теплообмена на границе электролит–гарнисаж или металл–настыль снижают толщину гарнисажа;

- растворение настыли или ее кристаллизация – одна из главных причин изменения состава электролита;
- настыль формирует форму рабочего пространства, влияющую на выход по току [5].

Уравнение, описывающее изменение толщины гарнисажа, основано на условии Стефана.

Искомое температурное поле  $T(y,t)$  удовлетворяет уравнению теплопроводности

$$\partial T / \partial t = a(\partial^2 T / \partial y^2) \quad (1)$$

в области гарнисажа  $0 < y < \delta(t)$ , причем функцию  $\delta(t)$  необходимо рассчитывать в течение решения задачи.

Начальными условиями являются исходные геометрические и теплофизические параметры слоев и распределение температуры по толщине стенки

$$\begin{aligned} T(y,0) &= T_i(y), \\ 0 &\leq y \leq \delta_i, \\ \delta(0) &= \delta_i. \end{aligned} \quad (2)$$

Граничные условия при  $y = 0$  зависят от характера теплообмена на поверхности. Граничные условия на межфазной границе ( $y = \delta(t)$ ):

1. фазовое превращение происходит при температуре  $T_1$ , т.е. при температуре ликвидуса,

$$T_{y=\delta(t)} = T_1; \quad (3)$$

2. уравнение теплового баланса на границе раздела твердое тело–расплавы имеют вид

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=\delta(t)} = \alpha(T_0 - T_1) + Q' \frac{d\delta}{dt}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $T_0$  – температура расплава;  $T_1$  – температура ликвидуса;  $Q'$  – удельная (объемная) теплота фазового превращения (плавления или затвердевания), Дж/м<sup>3</sup>;  $\frac{d\delta}{dt}$  – скорость перемещения границы межфазной поверхности, м/с.

Уравнение (1) с условиями (2), (3), (4) выражает математическую постановку задачи теплопроводности с движущейся границей [6].

Наряду со статическими расчетами реализован блок расчета изменения толщины гарнисажа по авторской модели, методом обыкновенных дифференциальных уравнений, при задании граничных условий третьего рода, с использованием следующего уравнения [7]:

$$\delta_{n+1} = 0,5 \cdot \left( \delta_n - \frac{dt \cdot \alpha \cdot (T_0 - T_1)}{\rho_n \cdot L_n} \right) + \sqrt{0,25 \cdot \left( \delta_n - \frac{dt \cdot \alpha \cdot (T_0 - T_1)}{\rho_n \cdot L_n} \right)^2 + \frac{2 \cdot dt \cdot \lambda_n \cdot (T_1 - T_1)}{\rho_n \cdot L_n}},$$

где  $\delta_n$  – толщина гарнисажа в данный момент времени;  $\alpha$  – коэффициент внутренней теплоотдачи;  $\lambda_n$ ,  $\rho_n$  – коэффициенты теплопроводности и плотность гарнисажа, соответственно;  $L_n$  – удельная теплота плавления гарнисажа;  $T_0$  – температура внутренней

среды (расплава);  $T_1$  – температура ликвидуса расплава;  $\bar{T}_1$  – средняя температура слоя гарнисажа;  $dt$  – шаг по времени.

На рис. 4 представлен результат по определению динамического изменения толщины гарнисажа при задании граничных условий 3-го рода и подаче воздействия путем увеличения температуры ликвидуса на 5 градусов.

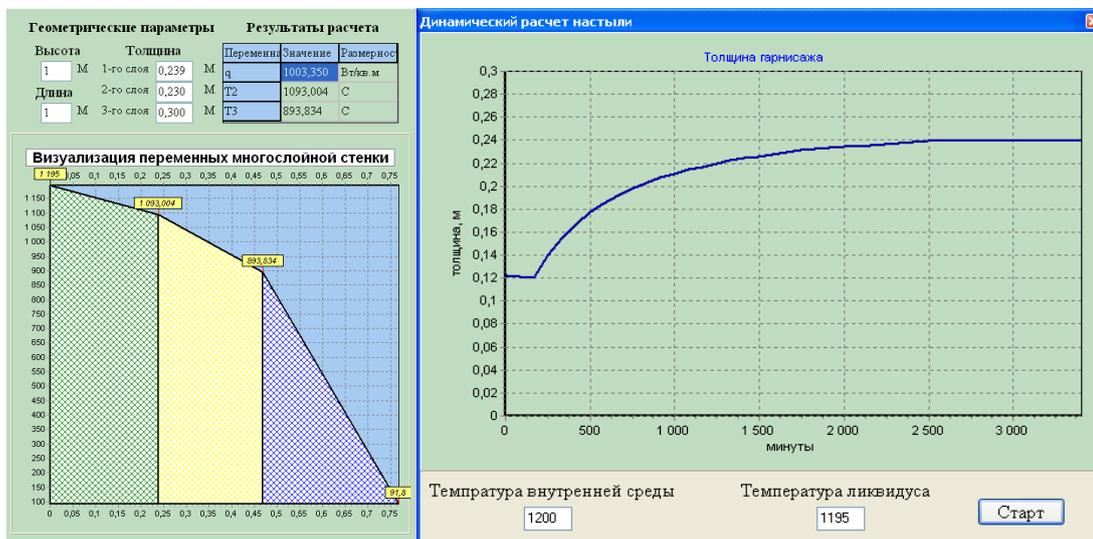


Рис. 4. Интерфейс для отображения результатов расчета изменения толщины гарнисажа

Программа расчета изменения толщины гарнисажа методом ловли фронта фазовый узел.

При изучении учета движения межфазной границы была реализована математическая модель для решения инженерной задачи по определению изменений толщины гарнисажа [6]. Интерфейс программы представлен на рис. 5:

Программа имеет следующие функциональные возможности:

- расчет изменения толщины гарнисажа в процессе перехода к новому стационарному состоянию;
- расчет изменения плотности теплового потока в процессе перехода к новому стационарному состоянию.

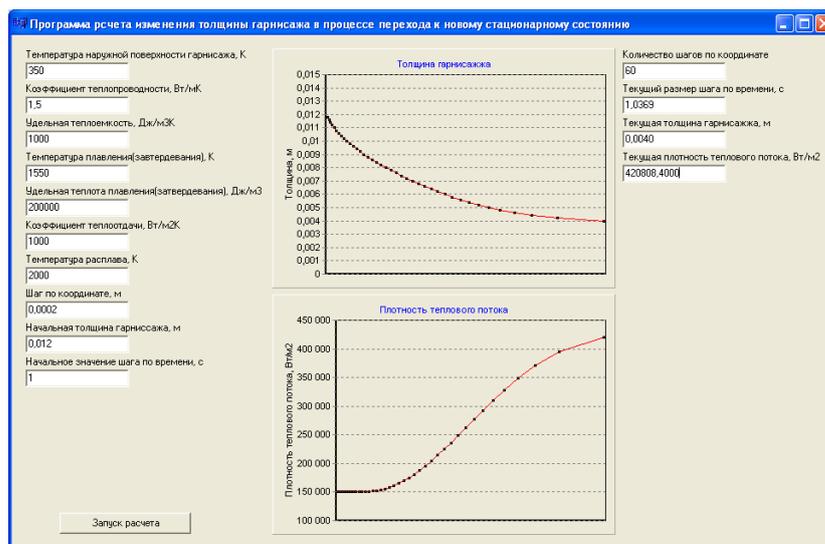


Рис. 5. Результаты расчета изменения толщины гарнисажа и теплового потока в процессе перехода к новому стационарному состоянию

Авторы считают, что в данной работе на основе специально разработанных моделей, оригинальное программное обеспечение позволяет повысить качество подготовки специалистов горно-металлургической отрасли и сократить временные затраты на про-

ведение исследований и типовых расчетов, структурировать учебную информацию на разных уровнях, систематизировать процесс представления информации и организовать интерактивное общение между обучаемым и программным комплексом. Подчеркивая актуальность внедрения специализированных программных продуктов в процесс обучения, стоит отметить основные отличия от существующих компьютерных приложений, которые в основном представляют собой презентационные программы (электронные учебники), используемые для ознакомления с учебными материалами, либо тестовые приложения, используемые для контроля знаний. Таким образом, разработанный программный комплекс позволяет решать исследовательские и типовые инженерные задачи с высокой степенью усвоения учебного материала и понимания взаимосвязей параметров и переменных при изменении управляющих воздействий объекта исследования.

### Литература

1. Piskazhova T.V., Mann V.C. The Use of a Dynamic Aluminum Cell Model // JOM. 2006. V. 58. № 2. P. 48-52.
2. Информационно-аналитический журнал Rational Enterprise Management //Имитационное моделирование как инструмент оптимизации производственных процессов в металлургии. URL: <http://www.anylogic.ru/upload/iblock/e56/e56ccf70ee38f9080c9bb7f69a25908> (дата обращения 07.04.2014).
3. *Портянкин А.А., Тинькова С.М., Пискажова Т.В.* Конференция «Молодёжь и наука» 2013. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s008/s008-007.pdf> (дата обращения 29.02.2016).
4. *Chuck C.* Modeling of Dynamic Ledge Heat Transfer // C. Chuck, John J. J. Chen, J. Barry // Light Metals. 1997. P. 309-317.
5. *Минцис М.Я., Поляков П.В., Сиразутдинова Г.А.* Электрометаллургия алюминия. – Новосибирск: Наука, 2001. С. 368.
6. *Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А.* Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. – М: Наука, 1990. С. 319.
7. *Белолипецкий В.М.* Математическое моделирование процесса электролитического получения алюминия // Решение задач управления технологией / Белолипецкий В.М., Пискажова Т.В. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013. С. 271.

### Development of software for solving problems of heat engineering

*Artyom Aleksandrovich Portyankin, Graduate Student*

*Svetlana Mihailovana Tinkoff, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor*

*Tatiana Valerievna Piskazhova, Doctor of Sciences, Head of the Department*

*Due to the need to improve the quality of training of specialists of mining and metallurgical industry, specialized software for complex solutions of heat engineering tasks is being developed. The developed system allows carrying out both standard engineering calculations and studies on various criteria.*

*Keywords: multi-layer wall, interfacial transition, boundary conditions, thermal conductivity, distances learning.*