

## УЧЕБНО-КОНСУЛЬТАЦИОННАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕПЛОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Портянкин А.А., Тинькова С.М., Пискажова Т.В.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

**Аннотация.** 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 учебно-консультационного комплекса для преподавания курса теплотехники при подготовке специалистов горно-металлургической отрасли и решения типовых инженерных задач.

Программа имеет следующие функциональные возможности:

- выполнение статических расчетов: теплового потока и распределения температур по толщине плоской стенки, расчет толщины слоя стенки (при задании различных граничных условий);
- выполнение динамических расчетов: перераспределения температур, плавление и кристаллизация гарнисажа как одного из слоев стенки, при подаче различных воздействий;
- использование встроенных баз данных, необходимых для проведения расчетов и проверки их правильности;
- визуализация результатов в виде графиков и таблиц.

Компьютерная программа позволяет с помощью цветowych анимационных иллюстраций и графического изображения наглядно представить полученные результаты, предусматривает возможность интерактивного взаимодействия между пользователем и элементами программы, при этом обеспечивает мгновенный контроль за усвоением материала. Данная программа может быть использована также и для дистанционного обучения.

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

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».

**Ключевые слова:** многослойная стенка, гарнисаж, тепловой поток, теплопроводность, граничные условия.

### Введение

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

Нами ведется разработка программного обеспечения, направленного на изучение и решение теплотехнических задач. Программа совмещает в себе не только возможность проведения консультационных расчетов, но и обладает высокой наглядностью представления материала, что в свою очередь предполагает инициацию всего процесса обучения, способствует повышению активности обучаемых через формирование мотивационной структуры учебно-познавательной деятельности.

В настоящее время существует много электронных обучающих систем и ресурсов, но немногие из них содержат встроенные процедуры, способные осуществлять инженерные расчеты. Имеются, конечно, широко известные

программы 3D-моделирования SolidWorks [1], Ansys [2], в которых можно выполнить большую часть интересующих нас теплотехнических расчетов, но для овладения этими программами нужно долго учиться, и расчеты в них длительные, что не всегда дает возможность быстро оценить результаты вводимого в объект изменения. Существует еще определенный класс учебно-консультационных программ, которые имитируют производственные процессы и объекты уже непосредственно для нужд производства – повышения квалификации, переподготовки, тренировки специалистов, а также для выполнения производственных расчетов [3, 4].

Целью нашей программы является:

- повышение уровня подготовки молодых специалистов;
- сокращение временных затрат при обучении на повторяющиеся вычислительные операции;
- визуализация полученных результатов;
- создание у обучающихся четкого представления о работе исследуемого объекта и понимания выполняемых расчетов.

### Описание программного обеспечения

При изучении теплотехнических дисциплин студенты сталкиваются с задачами по определению переменных теплопередачи в многослойной стенке. Для того чтобы лучше представлять и понимать тепловые процессы, была создана эта специализированная программа. Благодаря визуализации результатов понимание и усвоение информации происходит качественнее.

Программное обеспечение обладает наглядностью представления материала (цвет, анимационные иллюстрации), предусматривает возможность интерактивного взаимодействия (электронные лабораторные, обеспечивает мгновенный контроль за усвоением материала). Программа может быть использована для дистанционного обучения.

Весь материал, необходимый для изучения дисциплины, систематизирован и собран в единое целое, что позволит улучшить качество проведения занятий, облегчит труд преподавателя, а также позволит студентам самостоятельно заниматься изучением дисциплины в неаудиторной обстановке.

После изучения материала на лекциях учащиеся приступают к выполнению следующих

лабораторных работ с использованием описываемого ПО:

- расчеты теплового потока и распределения температур по толщине плоской многослойной стенки при задании граничных условий 1-го и 3-го рода;
- расчет толщины третьего слоя стенки при задании граничных условий 1-го рода – выбор теплоизоляции;
- расчет толщины гарнисажа на внутренней стенке при задании граничных условий 3-го рода;
- динамический расчет изменения распределения температур слоев стенки при задании граничных условий 3-го рода;
- динамический расчет толщины гарнисажа на многослойной стенке при задании граничных условий 3-го рода.

Программа состоит из трех основных частей:

1. База данных по огнеупорным и теплоизоляционным материалам.
2. Математическое обеспечение, включающее уравнения и алгоритмы для расчетов стационарных потоков и температур и их динамических изменений при воздействиях.
3. Интерфейс пользователя, позволяющий вводить условия и видеть результаты расчетов.

### Базы данных

Для задания теплофизических характеристик создана расширяемая база данных, которая позволяет осуществлять подбор материала для конструкции при задании различных исходных данных. Фрагмент базы представлен на **рис. 1**, где отражены теплофизические характеристики огнеупорных и теплоизоляционных материалов, такие как коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , удельная теплоемкость  $c$  и плотность материалов  $R$ .

Коэффициент теплопроводности определяется по уравнению

$$\lambda = A + B \cdot T,$$

где  $A$  и  $B$  – константы для данного материала;  $T$  – температура материала, °С.

Удельная теплоемкость рассчитывается следующим образом:

$$c = C_1 + C_2 \cdot T,$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – коэффициенты для определения теплоемкости;  $T$  – температура слоя, °С.

MATERIAL	A	B	C1	C2	R
Динас обычный	0,815	0,00067	870	0,193	1950
Динас высокоплотный	1,58	0,00038	870	0,193	2050
Многошамотные изделия	1,04	0,00015	865	0,21	2550
Шамот	0,7	0,00046	865	0,21	1900
Шамот класса А	0,88	0,00023	865	0,21	1850
Каолин плотный	1,75	0,00086	865	0,21	2450
Полукислые изделия	0,71	0,0007	868	0,19	2425
Совелитовый порошок (засыпка)	0,06	0,000116	920	0	500
ВГО-45	0,84	0,00058	835	0,25	2200
ВГО-62	1,76	-0,00023	835	0,25	2400
ВГО-72	1,76	-0,00023	835	0,25	2500
Муллит и корунд на глиняной связке	2,1	0,0018	795	0,21	2800
Муллит литой	2,8	-0,023	835	0,21	3000
Корунд литой	58	-0,029	880	0,21	3800
Магнезит	6,28	0,0027	1050	0,145	2700
Смолодоломит	1,86	-0,00078	1000	0	2775
Фостерит насадочный	4,23	-0,0016	900	0,21	2425
Фостерит обычный	1,63	-0,0007	900	0,21	2425
Шпинель	5,1	-0,0035	880	0	2875
Тальк	1,05	0,00031	677	0	2000
Периклазошпинелидные	4,17	-0,0011	920	0	3125
Хромомагнезит	2,8	-0,00087	920	0	2775
Магнезитохромит	4,1	-0,0016	920	0	2850
Цирконий	1,3	0,00046	540	0,12	3300
Циркон	2,1	-0,00093	530	0,125	3250
Карборунд рефракс	37,1	-0,0344	960	0,145	2100

Рис. 1. Фрагмент базы данных

Таким образом, использование базы дает возможность студенту перебрать разные материалы, например для футеровки металлургической печи и выбрать наиболее подходящий по необходимым параметрам.

#### Математическое обеспечение

Одной из задач является определение тепловых потоков через стенку. Если рассматривать металлургические печи, то величина этих потоков влияет на энергозатраты. Расчет тепловых потерь основан на уравнении теплопередачи [5]

$$q = k \cdot \Delta T,$$

где  $\Delta T$  – разница температур;  $k = 1 / \sum_{i=1}^n R$  – коэффициент теплопередачи;  $\sum_{i=1}^n R$  – сумма тепловых сопротивлений системы.

Для определения распределения температур в многослойной стенке при стационарных условиях разработана программа, которая базируется

на методе «холодных сопротивлений» при стационарных условиях [6].

На рис. 2 в виде блок-схемы представлен алгоритм расчета стационарного профиля температур и тепловых потоков при граничных условиях первого рода. Также этот алгоритм позволяет определять коэффициенты теплопроводности, температуры на границах слоев и удельный тепловой поток.

При определении коэффициентов теплопроводности в зависимости от температуры материала используется итеративная процедура.

На рис. 3 представлен интерфейс программного продукта. Пользователь имеет возможность задавать теплофизические параметры стенки путем выбора материала из универсальной базы данных, различные граничные условия и размеры слоев стенки. Также интерфейс дает возможность графической визуализации и табличного представления результатов расчетов. На графике изображен температурный профиль в многослойной стенке, по горизонтальной оси представлена заданная толщина слоя стенки, по вертикальной – температура, °C,  $T_2$  и  $T_3$  – значения температур на границах слоев.

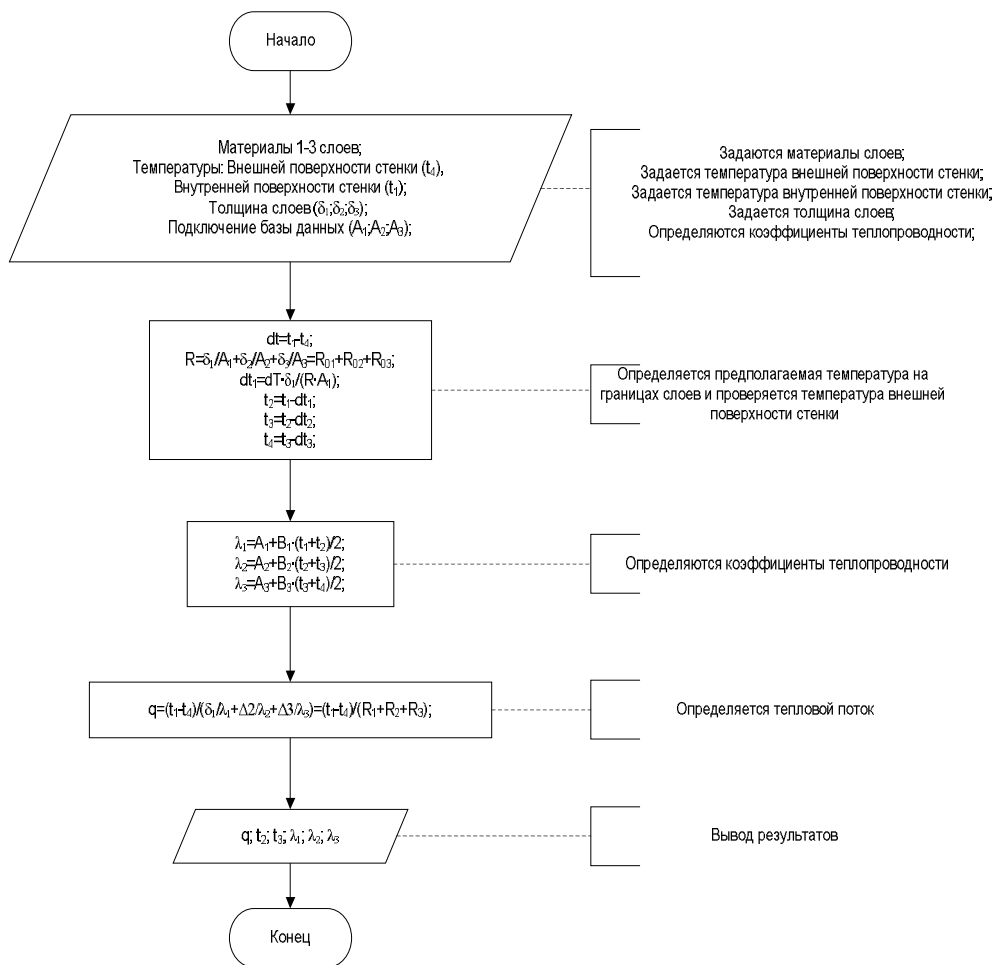


Рис. 2. Блок-схема для расчета теплового потока и распределения температуры по толщине плоской стенки

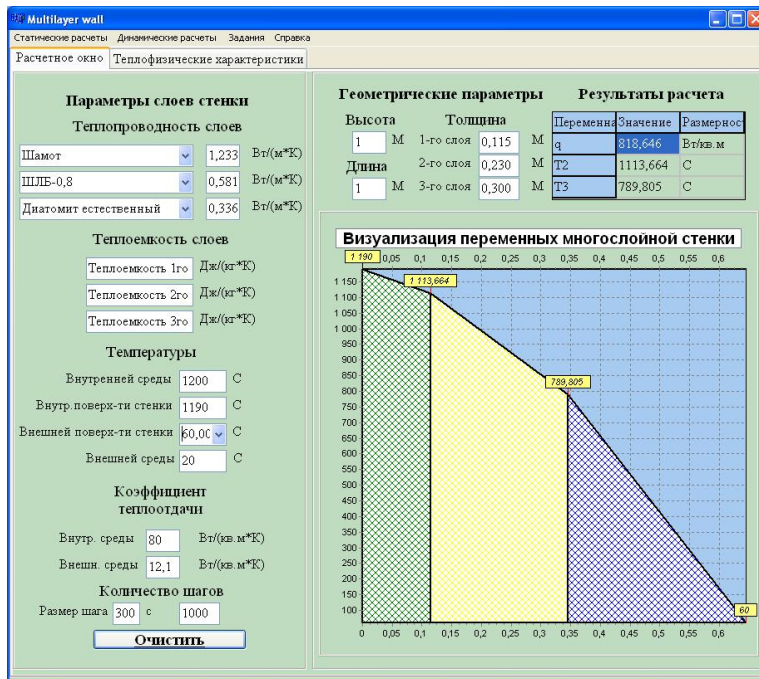


Рис. 3. Главная страница программы с исходными данными и результатами расчета

На производстве существует необходимость расчета толщины теплоизоляционного слоя с определенными температурными и размерными характеристиками. Для решения такой задачи в программе реализован алгоритм расчета толщины 3-го слоя стенки для выбранного материала.

Изучение нестационарных процессов в курсе теплотехники требует особой наглядности и визуализации, является предметом для научной работы студентов и углубленного изучения курса.

В программе реализована возможность расчета и анализа динамического изменения значений ряда переменных многослойной стенки в динамике, что позволяет наблюдать варьирование средних температур слоев, температур на их границах и поверхностях, толщины гарнисажа при различных воздействиях. Расчет средних температур слоев осуществляется по балансовому уравнению

$$m \cdot c \cdot \frac{d\bar{T}}{dt} = Q_{\text{вх}} - Q_{\text{вых}}$$

При этом средние температуры в слоях рассчитываются следующим образом:

$$m_1 \cdot c_1 \cdot \frac{d\bar{T}_1}{dt} = S \cdot k_1 \cdot (T_1 - \bar{T}_1) - S \cdot k_{1-2} \cdot (\bar{T}_1 - \bar{T}_2);$$

$$m_2 \cdot c_2 \cdot \frac{d\bar{T}_2}{dt} = S \cdot k_{1-2} \cdot (\bar{T}_1 - \bar{T}_2) - S \cdot k_{2-3} \cdot (\bar{T}_2 - \bar{T}_3);$$

$$m_3 \cdot c_3 \cdot \frac{d\bar{T}_3}{dt} = S \cdot k_{2-3} \cdot (\bar{T}_2 - \bar{T}_3) - S \cdot \alpha_{\text{внеш}} \cdot (T_3 - T_{\text{возд}}),$$

где  $Q_{\text{вх}}$  – входные тепловые потоки;  $Q_{\text{вых}}$  – выходные тепловые потоки;  $m_n$  – масса слоев стенки;  $c_{1,2,3}$  – удельная теплоемкость соответствующих материалов стенки;  $\frac{d\bar{T}}{dt}$  – скорость изменения

средней температуры слоя;  $S$  – площадь поверхности стенки;  $T_1$  – температура внутренней поверхности стенки;  $\bar{T}_{1,2,3}$  – средние температуры соответствующих слоев;  $\alpha_{\text{внеш}}$  – коэффициент теплоотдачи во внешнюю среду;  $T_3$  – температура границы между вторым и третьим слоем;  $T_{\text{возд}}$  – температура внешней среды;  $k_{1,2,3}$  – коэффициенты теплопередачи, которые рассчитываются по следующим формулам [7]:

$$k_1 = 2 \cdot \frac{\lambda_1}{\delta_1}; \quad k_{1-2} = \frac{2}{\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}\right)}; \quad k_{2-3} = \frac{2}{\left(\frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}\right)}.$$

Здесь  $\lambda_{1,2,3}$  – коэффициент теплопроводности материала соответствующего слоя;  $\delta_{1,2,3}$  – толщина соответствующего слоя.

Значения температур на границах слоев определяются из условий равенства температур и потоков на границе раздела слоев.

На рис. 4 представлены результаты расчета динамического изменения средних температур слоев и температуры границ слоев стенки в результате резкого увеличения температуры внутренней поверхности стенки (например, с температуры 1700 до 1900°C), что реально может наблюдаться при работе ряда металлургических печей.

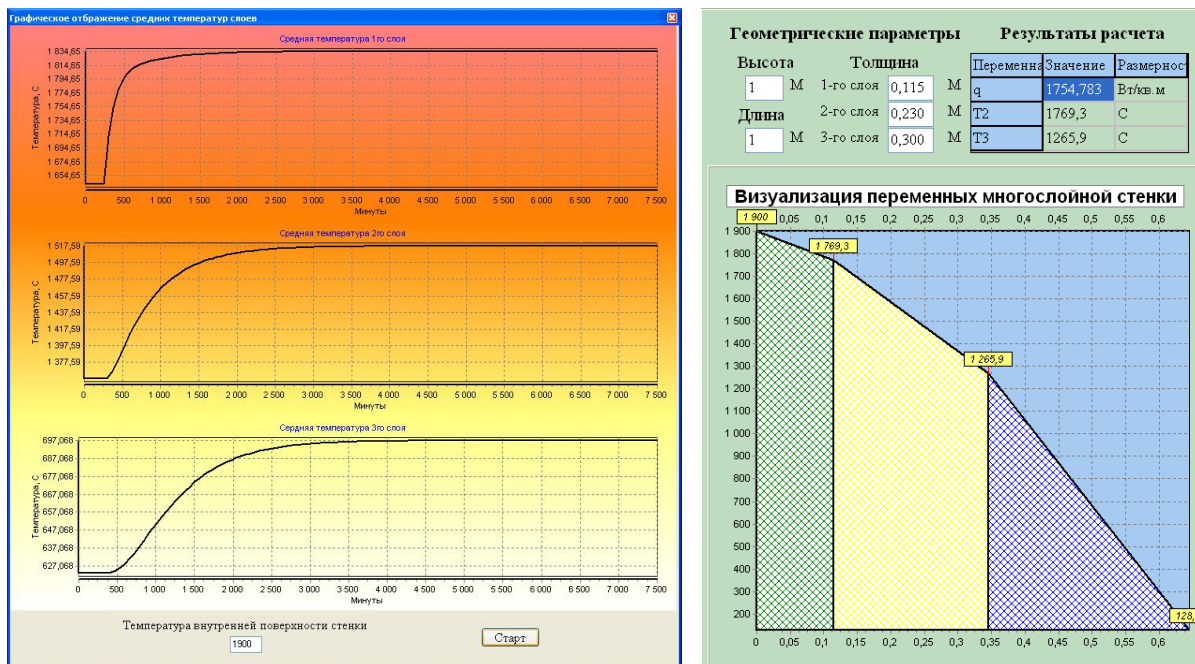


Рис. 4. Интерфейс для отображения расчетов динамического изменения температур стенки

Начальные, горизонтальные участки показывают среднюю температуру слоя к моменту воздействия, которое было подано на 240 минуте работы в установившемся режиме. В данном случае отчетливо видно, что изменение температуры первого слоя началось значительно раньше, чем у второго и третьего слоев.

Пользователь при изучении последствий тепловых воздействий может наблюдать за ходом изменения температур, определять время переходного процесса, зафиксировать распределение температур в определенный момент времени.

При управлении некоторыми металлургическими печами актуальной задачей является определение толщины гарнисажа [8]. Гарнисаж – твердый защитный слой, образующийся при плавке на внутренней (рабочей) поверхности стенок некоторых металлургических агрегатов, подвергающихся интенсивному охлаждению. При этом образуются тонкие корки застывших продуктов, толщина которых зависит от условий плавки и, особенно, от скорости охлаждения печи. Нами был реализован динамический расчет толщины гарнисажа при задании граничных условий третьего рода, с использованием следующего уравнения [7]:

$$\delta_{n+1} = 0,5 \cdot \left( \delta_n - \frac{dt \cdot \alpha_{\text{внут}} \cdot (T_0 - T_1)}{\rho_n \cdot L_n} \right) + \sqrt{0,25 \cdot \left( \delta_n - \frac{dt \cdot \alpha_{\text{внут}} \cdot (T_0 - T_1)}{\rho_n \cdot L_n} \right)^2 + \frac{2 \cdot dt \cdot \lambda_n \cdot (T_1 - \bar{T}_1)}{\rho_n \cdot L_n}}$$

где  $\delta_n$  – толщина гарнисажа в данный момент времени;  $\alpha_{\text{внут}}$  – коэффициент внутренней теплоотдачи;  $\lambda_n$ ,  $\rho_n$  – коэффициенты теплопроводности и плотность гарнисажа соответственно;  $L_n$  – удельная теплота плавления гарнисажа;  $T_0$  – температура внутренней среды;  $T_1$  – температура ликвидуса расплава;  $\bar{T}_1$  – средняя температура слоя гарнисажа;  $dt$  – шаг по времени.

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

### Выводы

Таким образом, разработана учебно-консультационная программа, которая позволяет мобильно анализировать тепловые изменения в многослойной стенке при различных характеристиках материалов и подаваемых воздействиях, что в свою очередь экономит время и ресурсы для проведения подобных расчетов. Программа обладает высокой наглядностью, представляя расчетный материал как в табличном, так и в графическом виде; формирует у обучаемого видение зависимости параметров и переменных объекта при решении инженерных задач.

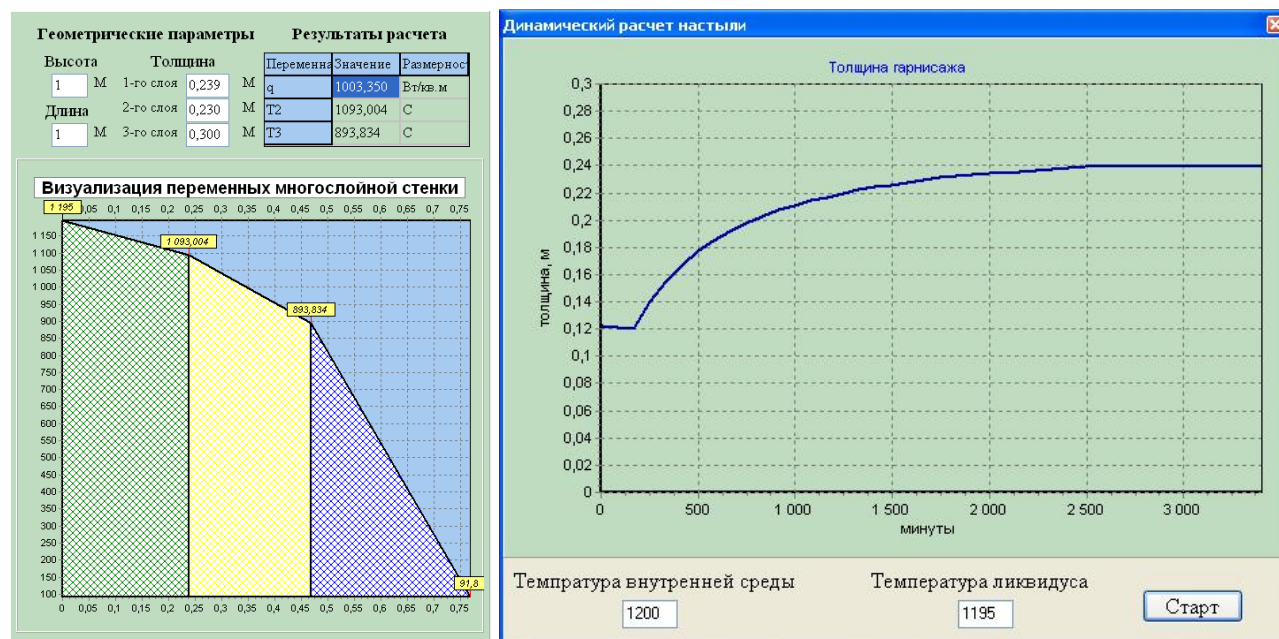


Рис. 5. Интерфейс для отображения результатов расчета изменения толщины гарнисажа

## Список литературы

1. Официальный сайт SolidWorks [Электронный ресурс]. URL: <http://www.solidworks.ru> (дата обращения: 06.03.2014).
2. Официальный сайт Ansys [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ansys.com> (дата обращения: 06.03.2014).
3. Piskazhova T.V., Mann V.C. The Use of a Dynamic Aluminum Cell Model // JOM. 2006. Vol. 58, №2. P. 48–52.
4. Информационно-аналитический журнал Rational Enterprise Management // Имитационное моделирование как инструмент оптимизации производственных процессов в металлургии [Электронный ресурс]. URL: <http://www.anylogic.ru/upload/iblock/e56/e56ccf70ee38f9080c9bb7f69f2b5908.pdf> (дата обращения 07.04.2014).
5. Теплотехника металлургического производства. Т. 1: Теоретические основы: учеб. пособие для вузов / В.А. Кривандин [и др.]. М.: МИСиС, 2002.
6. Тинькова С.М. Металлургическая теплотехника. Красноярск: Государственный университет цветных металлов и золота, 2005. 143 с.
7. Белоплицкий В.М., Пискажова Т.В. Математическое моделирование процесса электролитического получения алюминия. Решение задач управления технологией. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013. 271 с.
8. Chuck C., Chen J.J., Barry J. Modeling of Dynamic Ledge Heat Transfer // Light Metals. 1997. P. 309–317.
9. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупеников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Наука, 1990. 319 с.
10. Портянкин А.А., Тинькова С.М., Пискажова Т.В. // Конференция «Молодёжь и наука» [Molodezh i nauka] 2013г. [Электронный ресурс]. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s008/s008-007.pdf> (дата обращения: 06.03.2014).

Материал поступил в редакцию 20.07.15.

## INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-116-123

## TRAINING-SUPPORT SOFTWARE FOR STUDYING HEAT EXCHANGE PROCESSES

**Portyankin Artem Aleksandrovich** – Postgraduate Student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: [aaportyankin@gmail.com](mailto:aaportyankin@gmail.com).

**Tinkova Svetlana Mikhailovna** – Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

**Piskazhova Tatiana Valerievna** – D.Sc. (Eng.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: [piskazhova@ya.ru](mailto:piskazhova@ya.ru).

**Abstract.** Special software improves the quality of training by processing many transactions in a short period of time, structuring learning information at different levels, organizing the presentation of information, and managing interactive communication.

The objective is to develop a training-support complex for teaching a course on Thermal Engineering when training specialists for mining and the metallurgical industry and solving common engineering problems.

The software has the following features:

- static calculation of heat flow and temperature distribution over the thickness of a flat side-wall, calculation of the side-wall layer thickness (with various boundary conditions);
- dynamic calculations of temperature redistribution, melting and side-ledge crystallization as one of the side-wall layers, when applying various impacts;
- use of embedded databases required to perform and verify calculations;
- Graphical and tabular rendering of the results.

The software makes it possible to render the results obtained using color illustrations and animated graphics, provides for conversational interaction between the user and software components, and at the same time, ensures instant control in developing the material delivered. It can be used for distance learning as well.

The software has been implemented in the C++ Builder environment. The theory of heat transfer and numerical

methods of solving ordinary differential equations were used to design the software.

The proposed software was trialed during the training of undergraduate and graduate students of the Institute of Nonferrous Metals and Materials Science of the Siberian Federal University majoring in Metallurgy, Automation of Technological Processes and Production, and Management in Technical Systems.

**Keywords:** Multi-layered wall, ledge, heat flow, thermal conductivity, boundary conditions.

## References

1. The SolidWorks official website [electronic resource]. URL: <http://www.solidworks.ru> (accessed date: 03.06.2014).
2. The Ansys official website [electronic resource]. URL: <http://www.ansys.com> (accessed date: 03.06.2014).
3. Piskazhova T.V., Mann V.C. The Use of a Dynamic Aluminum Cell Model. JOM. 2006, vol. 58, no. 2, pp. 48–52.
4. Simulation modeling as a tool for optimization of production processes in the steel industry [electronic resource]. URL: <http://www.anylogic.ru/upload/iblock/e56/e56ccf70ee38f9080c9bb7f69f2b5908.pdf> (accessed date: 04.07.2014).
5. Krivandin V.A. *Teplotekhnika metallurgicheskogo proizvodstva. Tom 1: Teoreticheskie osnovy: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Heat engineering of metals practice. Vol. 1. Theoretical Foundations: Textbook for Universities]. Moscow: MISIS, 2002.
6. Tinkova S.M. *Metallurgicheskaya teplotekhnika* [Metallurgical heat engineering]. Krasnoyarsk: State University of Non-ferrous

- Metals and Gold, 2005. 143 p.
7. Belolipetsky V.M., Piskazhova T.V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessa ehlektroliticheskogo polucheniya alyuminiya. Reshenie zadach upravleniya tekhnologiej* [Mathematical modeling of electrolytic production of aluminum. Meeting the challenges of technology management]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2013. 271 p.
  8. Chuck C., John J.J. Chen, Barry J. Modeling of Dynamic Ledge Heat Transfeer. *Legkie metally* [Light Metals]. 1997, pp. 309–317.
  9. Arutyunov V.A., Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A. Mathematical modeling of thermal performance of industrial furnaces. Moscow: Nauka, 1990. 319 p.
  10. Portyankin A.A., Tinkova S.M., Piskazhova T.V. "Youth and Science" Conference [Molodiozh i nauka] 2013. [Electronic resource]. URL: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s008/s008-007.pdf> (accessed date 06.03.2014).

---

Портянкин А.А., Тинькова С.М., Пискажова Т.В. Учебно-консультационная компьютерная программа для изучения теплообменных процессов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №1. С. 116–123. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-116-123

Portyankin A.A., Piskazhova T.V., Tinkova S.M. Training-support software for studying heat exchange processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 1, pp. 116–123. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-1-116-123

---