

УДК 621.79151.001.573

АЗАРЯН А.А., СМОЛЯНСКИЙ П.С., ОСИПЧУК А.Н.

ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

Викладено методичні основи та опис апаратно-програмного забезпечення для визначення оптимального режиму зварювального виробництва

Изложены методические основы и описание аппаратно-программного обеспечения для определения оптимального режима сварочного производства.

Methodical bases and description of hardware and software to determine the optimal mode of welding production are presented.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. В настоящее время важнейшим условием совершенствования и интенсификации сварочного производства является не только развитие теоретических основ сварки с использованием новейших достижений в различных областях фундаментальных и прикладных наук, но и создание высокоэффективных методов и средств моделирования и имитации сварочных процессов. Применение математических методов и математического моделирования сварочных процессов превратилось в мощный инструментальный исследований и познания процессов, происходящих в сложных технологических системах, которые позволяют не только получить формализованное описание их основных закономерностей, но и эффективно управлять ими. [1]

Анализ публикаций. Метод конечных разностей (МСР) и метода конечных элементов (МКЭ) относятся к классу сеточных методов приближенного решения краевых задач. С точки зрения теоретических оценок точности методы обладают примерно равными возможностями. В зависимости от формы области, краевых условий, коэффициентов исходного уравнения оба метода имеют погрешности аппроксимации от первого до четвертого порядка относительно шага. В силу этого они успешно используются для разработки программных комплексов автоматизированного проектирования технических объектов. [3]

Методы конечных элементов и конечных разностей имеют ряд существенных отличий. Прежде всего, методы отличаются тем, что в МСР аппроксимируются производные искомых функций, а МКЭ – собственно решения, то есть зависимость искомых функций от пространственных координат и времени. Методы сильно отличаются и в способе построения сеток. В МСР строятся, как правило, регулярные сетки, особенности геометрии области учитываются только в около граничных узлах. В связи с

этим МСР чаще применяется для анализа задач с прямолинейными границами областей определения функций. К числу традиционных задач, решаемых на основе МСР, относятся исследования течений жидкостей и газов в трубах, каналах с учетом теплообменных процессов и ряд других. В МСЭ разбивки на элементы проводятся с учетом геометрических особенностей области, процесс разбиения начинается от границы для наилучшей аппроксимации ее геометрии. Затем разбивают на элементы внутренние области, причем алгоритм разбиения строится так, чтобы элементы удовлетворяли некоторым ограничениям, например стороны треугольников не очень отличались по длине и т.д. Поэтому МСЭ наиболее часто используется для решения задач с произвольной областью определения функций, таких как расчет на прочность деталей и узлов строительных конструкций, авиационных и космических аппаратов, тепловой расчет двигателей и т. д. [3]

Общей проблемой методов является высокая размерность результирующей системы алгебраических уравнений (несколько десятков тысяч в реальных задачах). Поэтому реализация МСР и МСЭ в составе САПР требует разработки специальных способов хранения матрицы коэффициентов системы и методов решения последней

Постановка задачи. Целью данной работы является разработка теоретических и прикладных подходов, которые позволяют реализовать компактные и быстрые вычислительные алгоритмы для моделирования сварочных процессов. Также целью является получение качественного сварного соединения, за счет применения методов математического моделирования при определении технологических параметров процесса сварки.

Изложение материала и результаты. Математическая модель - это «эквивалент» объекта, отражающий в математической форме важнейшие его свойства - законы, которым он подчиняется, связи, присущие составляющим его частям, и т. д. [2] В настоящее время математическое моделирование вступает в третий, принципиально важный этап своего развития, «встраиваясь» в структуры так называемого информационного общества. Впечатляющий прогресс средств переработки, передачи и хранения информации соответствует мировым тенденциям к усложнению и взаимному проникновению различных сфер человеческой деятельности. Без владения информационными ресурсами нельзя и думать о решении все более укрупненных и разнообразных проблем, стоящих перед мировым сообществом. Однако информация как таковая зачастую мало что дает для анализа и прогноза, принятия решений и контроля за их выполнением. Нужны надежные способы переработки информационного «сырья» в готовый «продукт», то есть в точное знание. История методологии математического моделирования убеждает: она может и должна быть интеллектуальным ядром информационных технологий, всего процесса информатизации общества. [2]

Технические, экологические, экономические и другие системы, изучаемые современной наукой, больше не подвергаются исследованию (нужной полноты и точности) обычными теоретическими методами. Прямой натурный эксперимент над ними длителен, не дешевый, часто опасный или просто невозможен, поскольку некоторые из этих систем существуют в единственном экземпляре. Цена ошибок и просчетов в обращении с ними недопустимо высока. Поэтому математическое (шире - информационное) моделирование является неизбежной составляющей научно-технического прогресса. [2]

Сама постановка вопроса о математическом моделировании любого объекта порождает четкий план действий. Его можно условно разбить на три этапа: модель - алгоритм - программа (рис. 1).

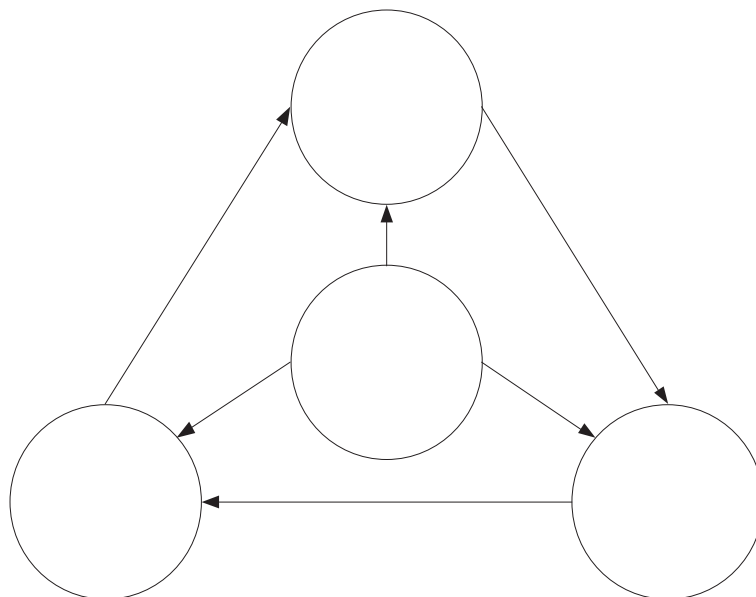


Рис. 1. Составляющие математического моделирования

На первом этапе выбирается (или строится) эквивалент объекта, отражающий в математической форме важнейшие его свойства - законы, которым он подчиняется, связи, присущие составляющим его частям, и т.д. Математическая модель (или ее фрагменты) исследуется теоретическими методами, что позволяет получить важные предварительные знания об объекте. [2]

Второй этап - выбор (или разработка) алгоритма для реализации модели на компьютере. Модель представляется в форме, удобной для применения численных методов, определяется последовательность вычислительных и логических операций, которые нужно провести, чтобы найти искомые величины с заданной точностью. Вычислительные алгоритмы должны не исказить основные свойства модели и, таким образом, исходного объекта, быть экономичными и такими, которые адаптируются к особенностям решаемых задач и используемых компьютеров. [2]

На третьем этапе создаются программы, переводящие модель и алгоритм на доступный компьютеру язык. К ним также предъявляются требо-

вания экономичности и адаптивности. Их можно назвать «электронным» эквивалентом исследуемого объекта, уже пригодным для непосредственного испытания на экспериментальной установке - компьютере. [2]

Создав триаду «модель - алгоритм - программа», исследователь получает универсальный, гибкий и недорогой инструмент, который сначала отлаживается и тестируется в пробных вычислительных экспериментах. После того как адекватность (достаточное соответствие) триады исходному объекту удостоверена, с моделью проводятся разнообразные и подробные исследования, которые дают все необходимые качественные и количественные свойства и характеристики объекта. [2]

Процесс моделирования сопровождается улучшением и уточнением, по мере необходимости, всех звеньев триады.

Будучи методологией, математическое моделирование не подменяет собой математику, физику, биологию и другие научные дисциплины, не конкурирует с ними. Наоборот, трудно переоценить его синтезирующую роль. Создание и применение триады невозможно без опоры на самые разные методы и подходы - от качественного анализа нелинейных моделей до современных языков программирования. Оно дает новые дополнительные стимулы самых разных направлений науки. [2]

На основе дифференциального уравнения теплопроводности (1) строим математическую модель по принципу черного ящика.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Предположим, что вся система - это некоторая совокупность действий, алгоритмов, преобразований и данных, на вход которой поступают входные параметры, а на выходе имеется решение. Таким образом, такую систему можно представить в виде черного ящика, в который поступают управляющие сигналы и сигналы с данными и на выходе имеем результирующий сигнал.

При исследовании системы наибольший интерес вызывает зависимость между входом и выходом. Соответственно изменение выходных параметров под влиянием входных квалифицируют как преобразование системы.

Математическая модель процесса переноса тепловой энергии $F = f(X_i, Y_i, Z_i, t_i)$ изображена на рис. 2

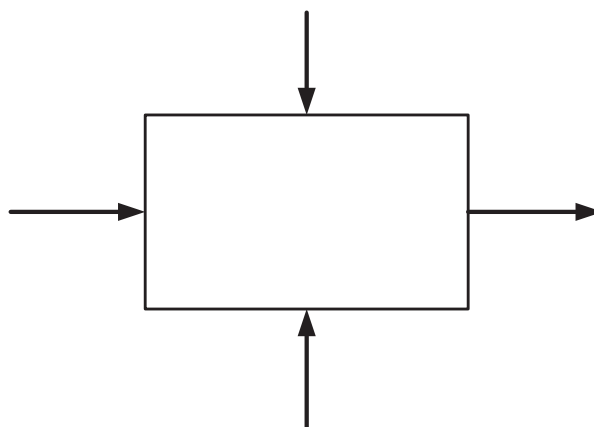


Рис. 2. Математическая модель процесса переноса тепловой энергии, f - некоторая преобразующая функция, на основе которой строим математическую модель, X_i - входные параметры, Y_i - выходные параметры, Z_i - управляющие параметры, t_i - временной сигнал (присущий только динамическим моделям)

Параметры математической модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры математической модели

X_i	Функции начального распределение температур. Граничные условия Границы нагреваемого тела Шаг по оси OX Шаг по оси OT Теплофизические коэффициенты
Y_i	Размерность сетки Распределение температур в теле (решение ДР)
Z_i	Точность (максимальная погрешность) Метод решения дифференциального уравнения Метод решения СЛАУ
t_i	Время, в течение которого осуществлялся процесс нагрева

Множество математических моделей описываются дифференциальным уравнением или системой дифференциальных уравнений с краевыми условиями первого, второго и третьего рода. Точное решение краевых задач удастся получить лишь для немногих случаев. Поэтому общий способ их решения, в том числе и в САПР, заключается в использовании различных приближенных моделей. В настоящее время наиболее широкое распространение получили модели на основе интегральных уравнений и модели на основе метода сеток (метод конечных разностей). [3]

Суть метода сеток заключается в аппроксимации искомой непрерывной функции совокупностью приближенных значений, рассчитанных в некоторых точках области - узлах. Совокупность узлов, соединенных оп-

ределенным образом, образует сетку. Сетка, в свою очередь, является дискретной моделью области определения искомой функции. Применение метода сеток позволяет свести дифференциальную краевую задачу к системе нелинейных в общем случае алгебраических уравнений относительно неизвестных узловых значений функций. [3]

Часто при работе с математическими моделями приходится исследовать зависимость параметров системы от времени. Такой класс задач называется нестационарным. Существует два способа получения решения: явный и неявный метод. При использовании любого из способов необходимо выбрать шаблон для замены частных производных на разностные аналоги. [3]

Разработанная система предоставляет возможность пользователю получить решение уравнения теплопроводности с помощью метода конечных разностей для граничных условий первого рода. Функциональная схема системы приведена на рис. 3.

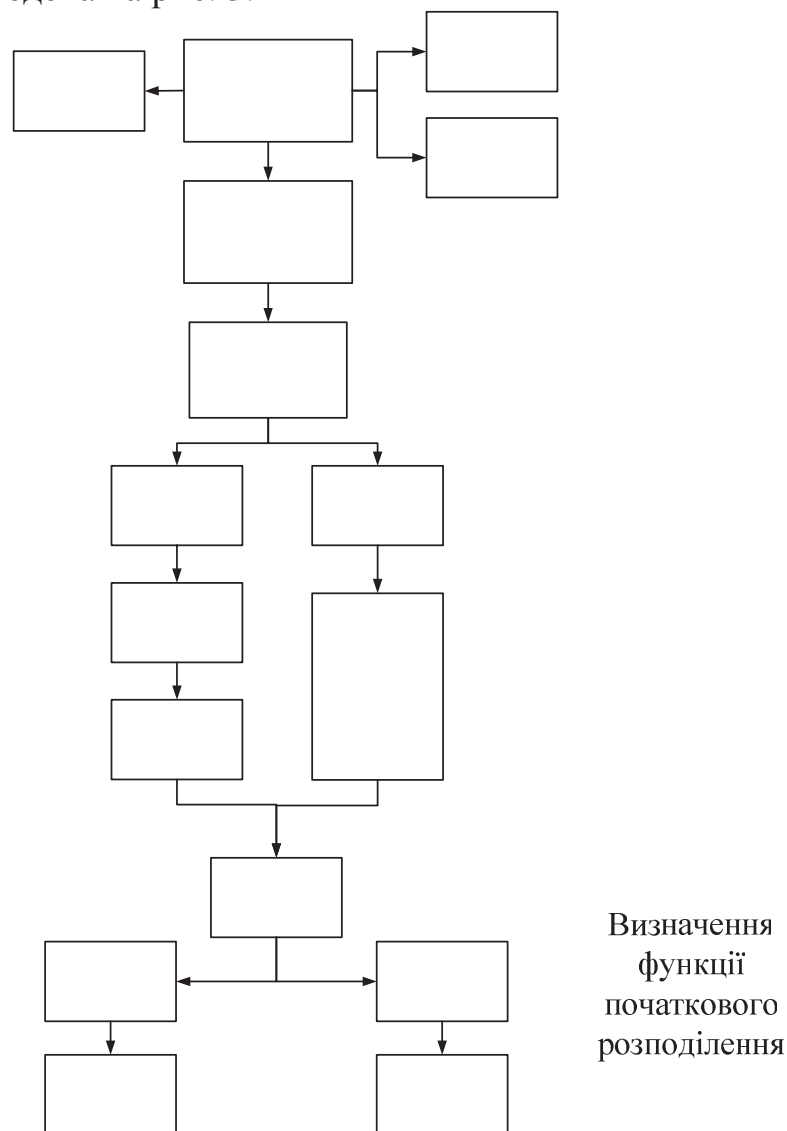


Рис. 3. Функциональная схема системы

Главным функциональными блоками системы являются блоки «Ввод данных», «Расчет начального распределения температур», «Решения

Введен
Розр
поча
розпо
темп

уравнения теплопроводности» и «Вывод решения уравнения». Остальные блоки дополняют или расширяют возможности системы.

Блок «Ввод данных» делится на три этапа. Первый этап - это работа блока «Определение функции начального распределения». На данном этапе от пользователя ожидается ввод с клавиатуры функции или значения-константы начального распределения температуры. Системой предусмотрено использование двух переменных (x и t) для определения значений по всей длине тела в течение указанного времени. Также есть возможность использовать следующие функции: Sin (синус), Cos (косинус), Pow (возведение в степень), Tan (тангенс), Sqrt (корень), Exp (экспонента). И использовать значение математической константы PI (3,14).

С помощью блока «Определение функций граничных условий» пользователь имеет возможность ввести в систему функции распределения тепла на границах тела (левая и правая границы). Возможности и ограничения при вводе функции аналогичные с блоком «Определение функции начального распределения».

Используя блок «Выбор размерности сетки» пользователь имеет возможность ввести границы отрезка, на котором будет произведен расчет, и число точек разбиения по осям x и t . Таким образом, однозначно определяются размеры сетки для использования сеточного метода решения уравнения теплопроводности.

Следующий значимый блок функциональной схемы это «Расчет начального распределения температур». На данном этапе система вычисляет начальное распределение температур во всех точках сетки на первом слое по времени.

Блок «Решения уравнения теплопроводности» объединяет в себе 2 алгоритмы решения дифференциального уравнения. На выбор пользователя подается две схемы расчетов: явная и неявная. Эти схемы представлены блоками «Явная схема решения» и «Неявная схема решения».

После выполнения блока «Явная схема решения» система переходит к блоку «Определение значений температуры на каждом этапе путем замены конечными разностями». На этом этапе частные производные дифференциального уравнения теплопроводности заменяются разностными аналогами и рассчитывается значение текущей точке сетки.

Если пользователь выбрал вариант с использованием блока «Неявная схема решения», система включает в работу блок «Формирования СЛАУ из конечных разностей». На основе разностных аналогов, которые заменяют частные производные дифференциального уравнения теплопроводности, формируется система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), которую можно свести к трехдиагональной матрице. Далее начинает свою работу блок «Решения СЛАУ». Этот блок предусматривает решение СЛАУ методом прогонки, который является наиболее эффективным для решения трехдиагональных матриц.

После получения решения ДУ любым из выше приведенных путем начинает работу блок «Вывод решения уравнения». Этот блок разветвляется по двум направлениям: вывод аналитической и вывода графической информации. Их выполнению соответствуют блоки «Табличное решение» и «Графическое решение» соответственно. С их помощью пользователь имеет возможность получить в приемлемом виде результаты проведенных расчетов.

Далее, если есть желание сохранить результаты расчетов, пользователь имеет возможность задействовать такие блоки как «Сохранение данных расчета» и «Сохранение графиков в графическом виде».

Разработанная система для исследования процессов переноса тепловой энергии изначально была задумана как упрощенный вариант работы с программными пакетами для математического моделирования протекания физических процессов. Целью работы было получить полноценную и простую для работы и понимания пользователем системы, путем отсеечения нагроможденности и избыточности существующих систем.

Для использования этой системы не предусматривалась любая регистрация или разрешение, что является привлекательным для использования. Такое решение было принято, потому что это сокращает время доступа пользователя к самим расчетам и не заставляет помнить пароли и логины.

Общий алгоритм работы с программой можно описать следующим образом. Пользователь вводит в систему начальные данные: функции граничного и начального распределения тепла, пределы тела, которое нагревается, количество шагов по переменным x и t , и время нагрева. Далее система произведет проверку на корректность данных. В случае ошибок пользователю будет выдано сообщение с конкретизацией сделанной им ошибки.

Далее пользователю необходимо выбрать схему, по которой нужно решать поставленную задачу. Таким образом, после выбора метода решения вызывается или подпрограмма для решения уравнения теплопроводности с помощью явной схемы, или подпрограмма неявной схемы.

После завершения вычислений система выводит результаты в аналитическом (табличном) и графическом вариантах, что и является завершением одного цикла работы программы. Далее система переходит в режим ожидания ввода новых начальных данных или выбора другого метода решения.

Общий алгоритм работы системы представлен на рис. 4.

Далее более подробно остановимся на алгоритме процедуры решения дифференциального уравнения методом конечных разностей по явной схеме.

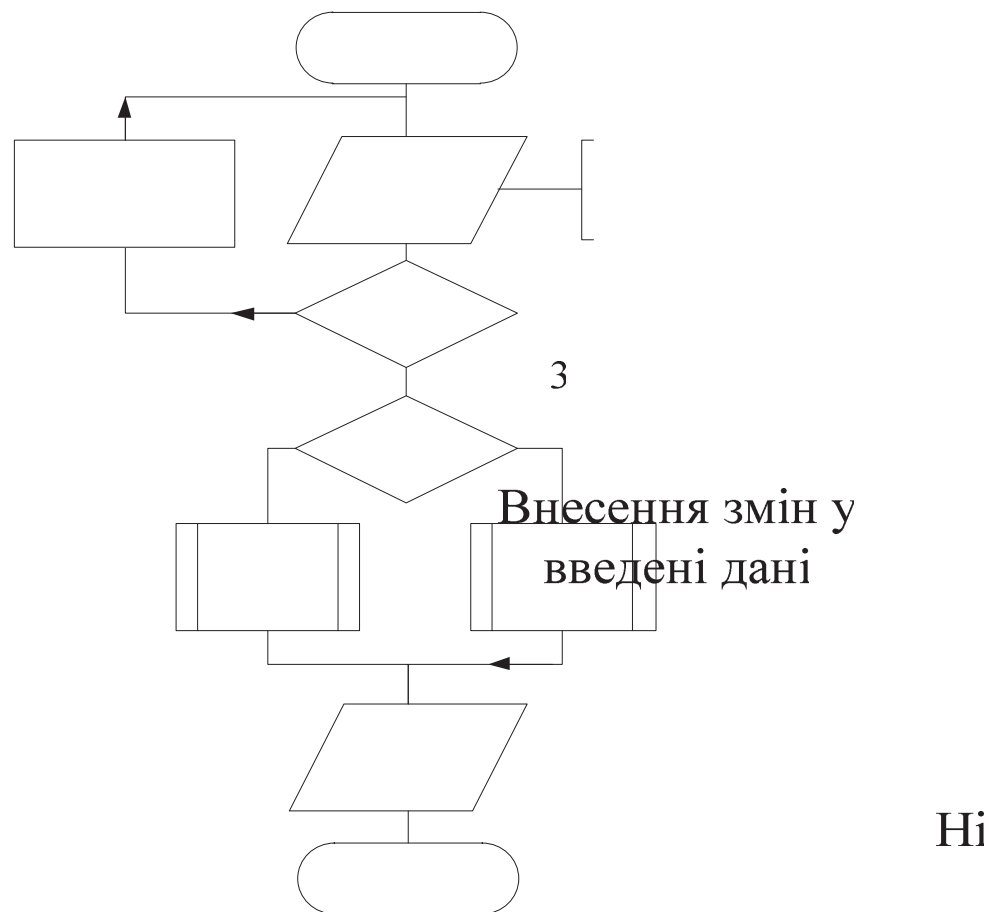


Рис. 4. Общій алгоритм роботи системи

В начале работы процедуры для решения поставленной задачи передаются и инициализируются входные параметры, которые были введены в начале работы с системой. Далее выполняется расчет размеров сетки для проведения последующих вычислений.

Так как мы получили функции граничного и начального распределения тепла, мы имеем возможность рассчитать значения температуры в каждой точке сетки на первом слое, когда время равно 0.

Далее в двойном цикле по явной схеме рассчитываем значения температуры в каждой точке сетки на следующих слоях с учетом течения времени.

После вычисления значений температуры на последнем слое надо рассчитать погрешность проведенных расчетов. Для этого с помощью функций граничных и начального распределений рассчитываем значения температур на последнем слое по времени. Затем находим разницу между этим значением и значением, которое было вычислено с помощью явной схемы метода конечных разностей. На этом этапе и завершается работа подпрограммы по выполнению расчетов по явной схеме.

Начало работы процедуры расчета по неявной схеме не отличается от предыдущей. Далее в двойном цикле заменяем частные производные на разностные аналоги. Таким образом формируем систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) и решаем ее методом прогонки.

После вычисления значений температуры на последнем слое также рассчитываем погрешность проведенных расчетов и заканчиваем работу процедуры.

Одним из приоритетных направлений развития нашей страны является внедрение информационных технологий во все сферы жизни. Использование современных технических средств предоставляет растущий экономический и общетехнический эффект. Использование автоматизированных расчетов для моделирования процесса переноса тепловой энергии при сварке значительно сокращает время, объемность и сложность расчетов по сравнению с ручными расчетами. Также повышает точность проведения таких расчетов за счет того, что компьютер может оперировать с более точными приближениями, чем человек.

В процессе работы над проектом была осуществлена адаптация существующих математических моделей распределения температурных полей на поверхности изделия и скорости охлаждения на оси шва при заданной температуре, созданных Рыкалиным М.М. для процессов стационарного движения электродной проволоки.

Параметры удельной теплоемкости, плотности и температуры плавления свариваемого металла приведены в усредненном значении и приняты за постоянные (согласно теории М.М. Рыкалина).

На рис. 5, 6 приведены графики зависимостей значения погрешности при изменении размера расчетной сетки и распределения тепловой энергии в теле, соответственно.

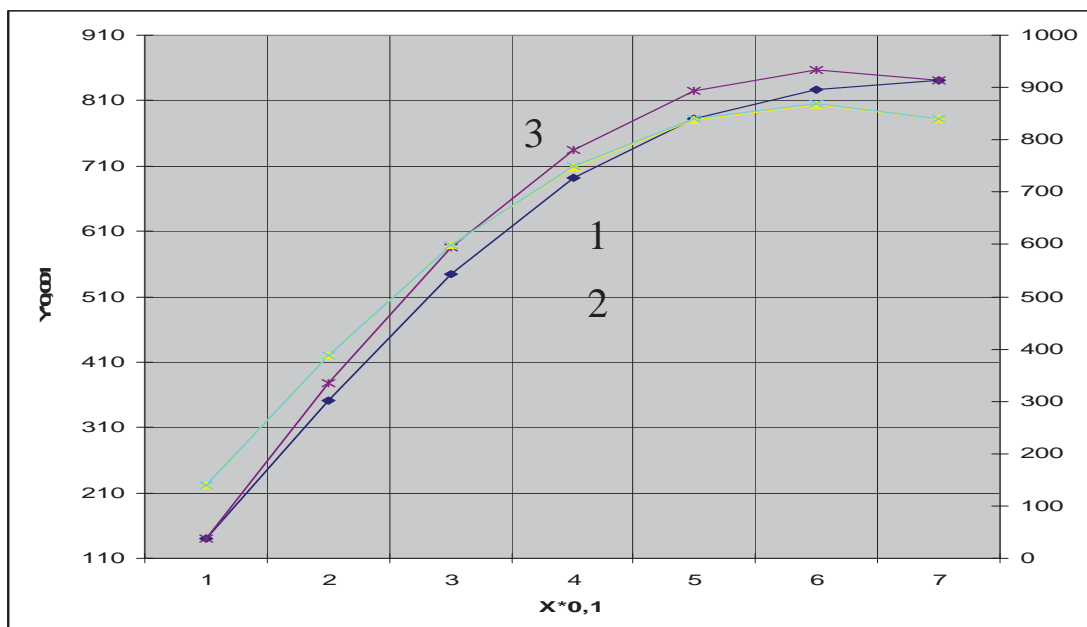


Рис. 5. График зависимости значения погрешности при изменении размера расчетной сетки: 1 - $N_x=6$, $N_x=12$, $N_x=36$

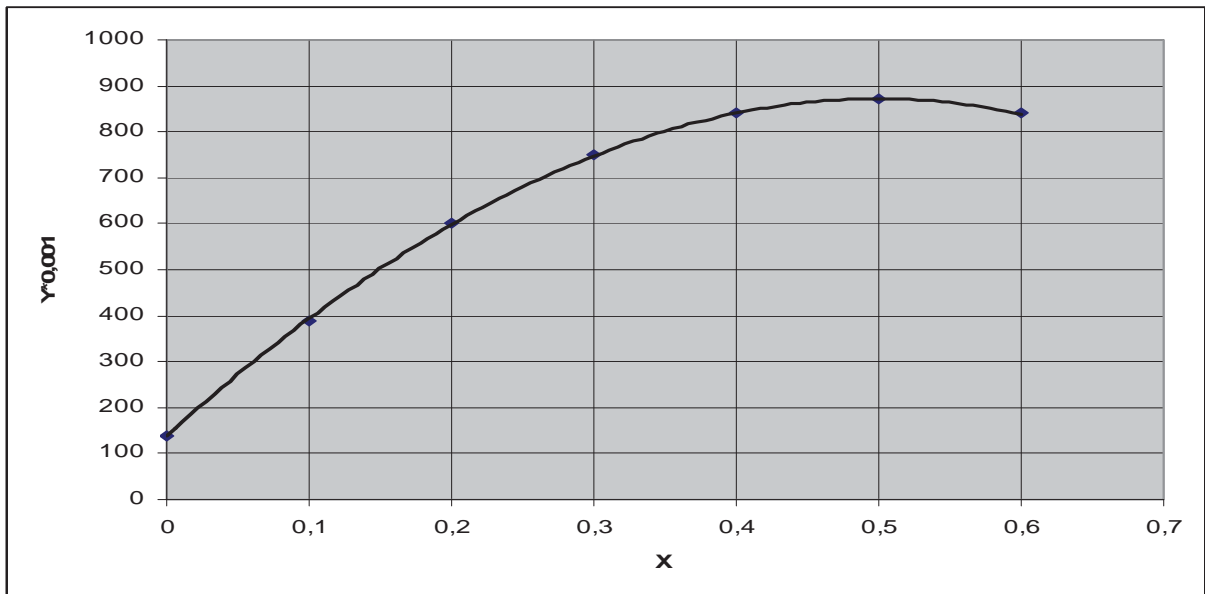


Рис. 6. График распределения тепловой энергии в теле. Получена аналитическая зависимость $Y = -555056.X^3 - 238.X^2 + 2796.X + 138,57$ с коэффициентом надежности 0,99.

Выводы

Установлены особенности влияния энергетических параметров процесса сварки на создание капли электродного металла.

Получены зависимости, позволяющие оценить качественно-количественные закономерности изменения распределения температурных полей на поверхности изделия и скорости охлаждения на оси шва при сварке.

Разработана функциональная схема и алгоритм работы автоматизированной системы, которая осуществляет расчет основных технологических параметров процесса сварки.

Список литературы

1. Павлов М. В. - Застосування методів математичного моделювання для визначення технологічних параметрів процесу зварювання з керованим каплепереносом електродного металу в суміші захисних газів, автореферат, Єкатеринбург, 2012
2. Самарський О. А., Михайлов О. П. Математичне моделювання. Ідеї.. Методи. Приклади. - 2-е вид., Випр. -М.:Фізматліт, 2001.
3. Трудоношин В.А., Трудоношин І.В., Шуткін М.М. - Метод кінцевих різниць: Навчально-методичний посібник, кафедра "Системи автоматизованого проектування" Московського державного технічного університету ім. Н.Е. Баумана