

МЕЖДУНАРОДНЫЙ СБОРНИК
НАУЧНЫХ ТРУДОВ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И
ПРОГРАММНОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ
В ПРОМЫШЛЕННОЙ И
СОЦИАЛЬНОЙ
СФЕРАХ
Часть I

Магнитогорск
2011

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический
университет и. Г.И. Носова»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ В ПРОМЫШЛЕННОЙ И СОЦИАЛЬНОЙ СФЕРАХ

Международный сборник научных трудов
Часть I

Магнитогорск
2011

УДК ...

ББК ...

Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах: сборник междунар. тр. – Магнитогорск:, 2011. – Ч. 1. – ...

ISBN

Сборник научных трудов состоит из трех частей. В первой части для апробации представлены труды научных работников, аспирантов, соискателей и студентов по разделам «Тенденции развития математического и программного обеспечения систем промышленной и социальной сфер» и «Математическое моделирование систем в промышленной сфере: цветная и черная металлургия, транспорт, промышленные системы автоматизации и навигации, промышленная теплоэнергетика, нефтегазохимическая промышленность».

Сборник представляет интерес для широкого круга специалистов научных и производственных организаций, занимающихся современными проблемами математического и программного обеспечения в различных промышленных и непромышленных областях.

Редакционная коллегия:

К.Н. Вдовин – д-р техн. наук., профессор (главный редактор),

И.М. Ячиков – д-р техн. наук., доцент (научный редактор).

О.С. Логунова – д-р техн. наук., доцент (научный редактор).

А.Б. Сычков – д-р техн. наук, профессор.

A. Schwarzkopf – д-р ф.-м. наук, профессор.

П.И. Каландаров – д-р техн. наук, профессор.

Ю.А. Скобцов – д-р техн. наук, профессор.

В.Д. Дмитриенко – д-р техн. наук, профессор.

К.С. Курочка – канд. техн. наук, доценту

П.П. Макарычев – д-р техн. наук, профессор.

Е.М. Разинкина – д-р пед. наук, профессор.

Д.Х. Девятов – д-р техн. наук, профессор.

Б.Н. Парсункин – д-р техн. наук, профессор.

В.В. Филатов – д-р ист. наук, профессор.

Л.Г. Егорова – канд. техн. наук, доцент (*ответственный секретарь*).

Сборник подготовлен при финансировании по государственным контрактам «02.740.11.059 от 15 марта 2010 г, П2402 от 18 ноября 2009 г и 02.740.11.0422 от 30 сентября 2009 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

ISBN

© ГОУ ВПО «МГТУ», 2011

СОСТАВ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ СБОРНИКА

Главный редактор:

Вдовин Константин Николаевич – д-р техн. наук., профессор, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, Лауреат Премии Правительства Российской Федерации в области металлургии, проректор по научной работе ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», **Россия**.

Научные редакторы:

Ячиков Игорь Михайлович – д-р техн. наук., член-корреспондент Уральского регионального отделения Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, профессор кафедры вычислительной техники и прикладной математики ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», руководитель государственного контракта П2402, **Россия**.

Логунова Оксана Сергеевна – д-р техн. наук., действительный член Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, профессор кафедры вычислительной техники и прикладной математики ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», **Россия**.

Редакционная коллегия сборника:

Сычков Александр Борисович – д-р техн. наук, профессор, заместитель директора по технической политике Восточно-Европейского дивизиона ОАО «Мечел», **Румыния**;

Dr. Alexander Schwarzkopf – RDI Industriemessgeraete GmbH, **Германия**;

Каландаров Палван Искандарович – д-р техн. наук, профессор, академик Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности, заместитель директора, Узбекский государственный институт «Узтяжнефтегазхимпроект» при Министерстве экономики Республики Узбекистан, г. Ташкент, **Узбекистан**;

Скобцов Юрий Александрович – д-р техн. наук, профессор, член международного НТО IEEE, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления, Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, **Украина**;

Дмитриенко Валерий Дмитриевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники и программирования, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, **Украина**;

Курочка Константин Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационные технологии», Учреждение образо-

вания «Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого», г. Гомель, **Белоруссия**;

Макарычев Петр Петрович – д-р техн. наук, профессор, Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, заведующий кафедрой «Математическое обеспечение и применение ЭВМ», ГОУ ВПО «Пензенский государственный университет», г. Пенза, **Россия**;

Разинкина Елена Михайловна – д-р пед. наук, профессор, проректор по учебной работе ГОУ ВПО «МГТУ», г. Магнитогорск, **Россия**;

Девятков Диляур Хасанович – д-р техн. наук, профессор, действительный член Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, заведующий кафедрой вычислительной техники и прикладной математики ГОУ ВПО «МГТУ», г. Магнитогорск, **Россия**;

Парсункин Борис Николаевич – д-р техн. наук, профессор, Заслуженный работник Высшей школы Российской Федерации, действительный член Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, профессор кафедры промышленной кибернетики и систем управления ГОУ ВПО «МГТУ», г. Магнитогорск, **Россия**;

Филатов Владимир Викторович – д-р ист. наук, профессор, декан факультета экономики и права, заведующий кафедрой истории и социологии ГОУ ВПО «МГТУ», г. Магнитогорск, **Россия**.

Ответственный секретарь: Егорова Людмила Геннадьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры вычислительной техники и прикладной математики ГОУ ВПО «МГТУ», **Россия**.



Ячиков
Игорь Михайлович



Вдовин
Константин Николаевич



Логунова
Оксана Сергеевна

*То что я понял – превосходно. Думаю,
таково же и то, что я не понял.*

Сократ

Дорогие коллеги!

Редакционная коллегия рада приветствовать Вас на страницах Международного сборника трудов. «Математическое и программное обеспечение систем в промышленной социальной сфере».

Предпосылкой подготовки и издания сборника является проведение Правительством России Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» 2009 – 2013 года. Финансирование научной деятельности позволило организовать апробацию результатов исследований для ведущих научных работников, аспирантов, соискателей и студентов. Инициатором издания выступили работники кафедры «Вычислительная техника и прикладная математика (ВТ и ПМ)» ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Эта инициатива нашла поддержку у руководства вуза и работников других кафедр. Сборник является логическим продолжением работы заведующего кафедрой ВТ и ПМ, доктора технических наук, профессора Девятова Дилиюра Хасановича, по инициативе которого в 2003 и 2004 годах был подготовлен и издан сборник трудов «Новые программные средства для предприятий Урала», в 2005 и 2007 годах – «Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях Российской Федерации»; в 2006 – «Разработка новых программных средств для предприятий Урала».

Активное поступление работ в сборник позволило напечатать его в трех частях, в которые вошли семь разделов. Часть I включает в себя разделы: «1 – Тенденции развития математического и программ-

ного обеспечения систем промышленной и социальной сфер»; «2 – Математическое моделирование систем в промышленной сфере: цветная и черная металлургия, транспорт, промышленные системы автоматизации и навигации, промышленная теплоэнергетика, нефтегазохимическая промышленность». Часть II включает в себя разделы: «3 –

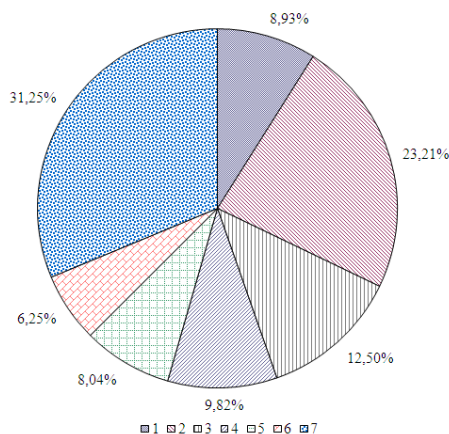


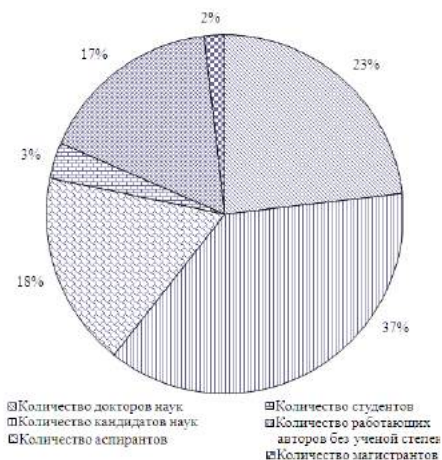
Рис. 1. Процентное соотношения количества работ представленных в сборник

Проектные решения и реализация программного обеспечения для промышленной сферы: цветная и черная металлургия, транспорт, промышленные системы автоматизации и навигации, промышленная теплоэнергетика, нефтегазохимическая промышленность»; «4 – Имитационное моделирование объектов и процессов в промышленной сфере»; «5 – Математическое и программное обеспечение цифровой обработки изображений и сигналов»; «6 – Имитационное моделирование объектов и процессов в социальной сфере». Часть III включает в себя раздел «7 – Моделирование объектов и процессов в системе непрерывного профессионального образования» с обсуждением материалов на электронной конференции.

Статический анализ структуры сборника показал, что предлагаемая тематика вызвала большой интерес различных групп научных сотрудников практически на всей территории России и за ее пределами. На рис. 1 представлена структура сборника по разделам.

На рис. 2 показана структура авторского состава, предоставивших работы для апробации. Следует отметить высокую активность докторов (23%) и кандидатов (37%) наук, принявших участие в подготовке работ в сборник. Интересными и содержательными являются работы, объединяющие специалистов различных отраслей. В сборнике представлены работы научных коллективов, включающих докторов физико-математических наук, педагогических наук; докторов технических наук и кандидатов биологических наук. Такое творческое сотрудничество позволяет изменить традиционные подходы к решению за-

дач, принятых в рассматриваемой области, и создать новые технологии, методы и методики для их реализации.



*Рис. 2. Структура авторского состава
Международного сборника научных трудов*

Научные редакторы отмечают широкую территориальную распределенность авторов сборника. На рис. 3 приведена картодиаграмма представленных работ. На рис. 3 треугольником отмечены города, области, регионы и страны участники. Особую благодарность мы выносим зарубежным участникам проекта, проявившим высокую активность в подготовке и редактировании сборника: д.т.н. П.И. Каландарову, А.Б. Сычкову и др. В сборнике

представлены работы из шести стран: Россия, Узбекистан, Латвия, Украина, Румыния, Казахстан.



*Рис. 3. Картодиаграмма распределенности авторов по территории
России и за ее пределами*

Всего в сборник представлено 112 работ из 34 городов России и зарубежья. Общее количество авторов составило 216 человек.

Благодарим всех принявших участие в подготовке сборника. Желаем эффективной работы и достижения новых творческих успехов!

Научные редакторы сборника

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ ПРОМЫШЛЕННОЙ И СОЦИАЛЬНОЙ СФЕР

*Если вы строили воздушные замки,
это не значит, что работали
понапрасну: воздушным замкам
место в воздухе. Остается подвести
под них фундамент.
Генри Дэвид Торо*

*Когда изучаешь какой-либо вопрос,
считаешь, что знаешь его; когда
можешь писать о нем, становишься
уверенней в своих знаниях;
уверенность возрастает, когда
можешь научить этому кого-нибудь
другого; и совершенно уверен, когда
начинаешь программировать.
Алан Дж. Перлис*

ОСНОВЫ АЛГЕБРАИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ОПИСАНИЯ АЛГОРИТМОВ С ДАННЫМИ

Акуловский В.Г.

*Академия таможенной службы Украины
Украина, 49000, г. Днепропетровск, ул. Дзержинского, д. 2\4
academy@amsu.dp.ua.*

Предлагается алгебраический аппарат, ориентированный на описание в алгоритмах потоков управления совместно с обрабатываемыми данными.

THE BASES OF ALGEBRAIC DEVICE FOR THE DESCRIPTION OF ALGORITHMS WITH THE DATA

Akulovsky V.G.

The algebraic device focused on the description in algorithms of streams of management with the processed data is offered.

Введение

Достаточно давно известно, что в программе данные и управление оказывают друг на друга существенное взаимное влияние. По этому поводу уместно привести следующую цитату. «Стало ясно, что решения о структурировании данных нельзя принимать без знания алгоритмов, применяемых к этим данным, и наоборот, структура и выбор алгоритмов существенным образом зависят от структуры данных. Говоря короче, строение программ и структуры данных неразрывно связаны» [1].

При этом характер, вид и степень взаимного влияния данных и управления изучены, по-видимому, недостаточно, во всяком случае, на уровне алгоритмов. Этим (вероятно, не только этим) объясняется тот факт, что в настоящее время доминируют два подхода к программированию: программирование от данных и программирование от управления. В первом случае изначально заданная структура обрабатываемых данных в существенной мере предопределяет последовательность действий по их обработке. Во втором - заданная последовательность действий в существенной мере предопределяет структуры обрабатываемых данных. Оба подхода, реализованные в рамках объектно-ориентированной и структурной методологий программирования широко применяются в первую очередь при разработке соответственно информационных и управляющих программных систем. Упомянутые методологии, в соответствии со спецификой реализуемых подходов, радикально различаются с точки зрения проектирования, анализа и

конструирования программного обеспечения [2]. То есть указанные подходы и методологии не являются универсальными и области их применения не совпадают. Из изложенного следует, что изучение взаимного влияния данных и потоков управления в алгоритмах представляет как теоретический, так и практический интерес. Наличие знаний о характере, виде и степени взаимного влияния данных и управления желательно и при традиционных подходах, но они необходимы при синтетическом подходе к разработке такого класса программных систем, для которых ни один из традиционных подходов не является оптимальным. К системам этого класса относятся широко применяемые в промышленности информационно-управляющие системы.

Целью данной работы является разработка формального аппарата, ориентированного на описание алгоритмов в такой форме, в которой одновременно отображались бы потоки управления и данные. Что позволит изучить взаимные влияния управления и данных и учитывать эти влияния на процессы проектирования, анализа и преобразование алгоритмов.

Алгебра алгоритмов, включающих данные

На основе оснащенной памятью модели ЭВМ, предложенной В.М. Глушковым [3], построим алгебраический аппарат.

Рассмотрим основные понятия, связанные с предлагаемым формальным аппаратом.

Данными D будем называть упорядоченную пару $\langle \Delta, Z_t \rangle$, где Δ – носитель данных (фрагмент памяти), Z_t – кортеж значений, хранимый этим носителем данных в текущий момент времени. Множество данных, расположенных в оперативной памяти и обрабатываемых некоторым алгоритмом, запишем в виде $D^{OP} = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$.

Динамическими данными D^d будем называть кортеж значений Z_d , определенный (существующий) в текущий момент времени в динамической памяти, время существования которого ограничено. Логические условия $\alpha^k \in E_{k+1} = \{0, 1, \dots, k-1, \mu\}$, где μ – неопределенное значение этого логического условия. Логические условия могут быть произвольной значности, в частном случае двузначными α^2 . Все возможные логические условия образуют множество L .

Вычислительный процесс на некотором i -м шаге выполнения находится в одном из трех возможных состояний: $D_i^T = D_i^{op}$,

$D_i^T = D_i^{op} \cup D_i^d$, $D_i^T = D_i^{op} \cup \{\alpha_i^k\}$, где D_i^{op} - текущее состояние множества оперативных данных (статическая составляющая), D_i^d - текущее состояние множества динамических данных и α_i^k - состояние логического условия (динамическая составляющая). Статическая составляющая состояния вычислительного процесса имеет место на каждом его шаге. Динамическая составляющая определена только на некоторых шагах вычислительного процесса, то есть $\exists p$, где $D_p^d \neq \emptyset$ в состоянии D_p^T , и $\exists m$, где $\{\alpha_m^k\} \neq \emptyset$ в состоянии D_m^T , и существует только на этом шаге, то есть для любого D_j^T , где $j \neq p$ и $j \neq m$, выполняется $D_p^d = \emptyset$ и $\{\alpha_m^k\} = \emptyset$.

Д-операторы (в общем случае $(D)X(D')$), на входе и выходе которых специфицированы обрабатываемые данные, изменяющие состояние вычислительного процесса, представляют собой следующий базовый набор:

- $(D)O(D')$, который переводит вычислительный процесс из любого исходного для него состояния D_i^T в состояние $D_{i+1}^T \neq D_i^T$, где $D_{i+1}^d = \emptyset$ и $\{\alpha_{i+1}^k\} = \emptyset$;
- $(D)O(D^d)$ переводит вычислительный процесс из любого исходного для него состояния D_i^T в состояние D_{i+1}^T такое, что $D_{i+1}^T = D_{i+1}^{on} \cup D_{i+1}^d$, где $D_{i+1}^{on} = D_i^{on}$, $D_{i+1}^d \neq \emptyset$, $\{\alpha_{i+1}^k\} = \emptyset$;
- $(D^\pi)P(\alpha^k)$, который в дальнейшем будем называть предикат, представляет собой n -местную логическую функцию $P_{k+1}^n: \rho_D^n \rightarrow \alpha^k \in E_{k+1} = \{0, 1, \dots, k-1, \mu\}$, где α^k - k -значное логическое условие, продуцируемое предикатом. Этот Д-оператор переводит вычислительный процесс из любого исходного для него состояния D_i^T в состояние D_{i+1}^T такое, что $D_{i+1}^T = D_{i+1}^{on} \cup \{\alpha_{i+1}^k\}$, где $D_{i+1}^{on} = D_i^{on}$, $D_{i+1}^d = \emptyset$, $\{\alpha_{i+1}^k\} \neq \emptyset$. Если предикат не определен на множестве данных D^π , то $\alpha^k = \mu$.

Все возможные Д-операторы образуют множество U . Рассмотрим основные понятия, перейдем к операциям алгебраического аппарата. На множестве логических условий L , продуцируемых предикатом

- обобщенное отрицание $\overline{\alpha}^k = \alpha^k + 1(\text{mod } k)$;
- обобщенная дизъюнкция $\alpha_1^k \vee \alpha_2^k = \max(\alpha_1^k, \alpha_2^k)$;
- обобщенная конъюнкция $\alpha_1^k \wedge \alpha_2^k = \min(\alpha_1^k, \alpha_2^k)$.

На множестве Д-операторов U определены следующие операции.

Композиция Д-операторов $(D)O(D^d)^*(D^n)P(\alpha^k)$, в силу того, что динамические данные не влияют на состояние оперативной памяти, позволяет реализовать прогнозирование вычислительного процесса. Объединение Д-операторов, связанных операций композиции, в частности и вышеупомянутый случай, позволяет получать более общие случаи Д-операторов. При этом функциональность полученного Д-оператора выше, чем у любого из исходных Д-операторов, а часть этой функциональности и данных инкапсулируется в нем.

[illegible]

Результатом выполнения этой операции является один из $k+1$ возможных Д-операторов, который выбирается в соответствии со значением логического условия α^k . Частные случаи, когда используются логические условия отличной значности, записываются аналогично.

Операция р-итерации $[(D^\pi)P(\alpha^2)]\{(D)O(D')\}$ состоит в вычислении предиката и проверке полученного логического условия α^2 . Если $\alpha^2 = 1$, выполняется Д-оператор $(D)O(D')$ и вновь вычисляется предикат и проверяется условие α^2 . Циклический процесс, состоящий в проверке условия α^2 и выполнении Д-оператора, осуществляется до тех пор, пока условие $\alpha^2 = 1$ в противном случае операция р-итерации завершается. Композиции Д-операторов, продуцирующие логические условия, в частности композиции предикатов, могут использоваться в приведенных операциях, в результате чего увеличивается их функциональность.

Таким образом построена (САА/Д) - двухосновная алгебраическая система $\langle U, L, \Omega \rangle$, основами которой являются множество Д-операторов U и множество логических условий L , а $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$ - её сигнатура, состоящая из Ω_1 , принимающих значения на множестве L , и Ω_2 , принимающих значения на множестве U .

Представление любого Д-оператора из U через образующие элементы системы $\langle U, L, \Omega \rangle$ называется регулярной схемой этого Д-оператора (РСД). РСД, в которой используется единственная операция – композиция, а остальные операции множества Ω_2 записанные в виде Д-операторов, называются композиционной схемой (КС) [6].

Заключение

Произвольный алгоритм может быть записан в виде РСД или КС. Принципиально важное отличие САА/Д от других известных алгебраических аппаратов состоит в том, что подлежащие обработке данные специфицируются на входе и выходе Д-операторов, что позволяет одновременно описывать управляющие структуры и обрабатываемые ими данные. При этом открываются возможности описания информационных связей между Д-операторами, преобразование КС и РСД на основе анализа таких связей [7]. То есть на основе предлагаемого формального аппарата может быть реализован такой подход к программированию, при реализации которого проектирование потоков управления и структур данных будет осуществляться одновременно и согласовано.

Направлением дальнейших исследований является формализация взаимодействия алгоритмов с объектами управления, преобразо-

вание и распараллеливание алгоритмов на основе анализа информационных связей и потоков данных в них.

Список литературы

1. Вирт Н. Алгоритмы + структуры данных = программы. – М.: Мир, 1985. – 656 с.
2. Кинг Г. У. Объектно-ориентированный подход действительно лучше структурного / пер. с англ. А. И. Легалова. <http://www-eksl.cs.umass.edu/gwking/whyoop.htm>
3. Глушков В.М., Цейтлин Г.Е., Ющенко Е.Л. Алгебра. Языки. Программирование. – К.: Наук. думка, 1978.- 319 с.
4. Яблонский С.В. Введение в дискретную математику: учеб. пособие для вузов/под. ред. В.А. Садовниченко. – М.: Высш.шк., 2002. – 384 с.
6. Акуловский В.Г. Основы алгебры алгоритмов, базирующейся на данных. // Проблеми програмування. – 2010. – №2-3. – С.89-96.
7. Акуловский В.Г. Некоторые аспекты преобразования алгоритмов на основе формализации информационных связей. // Кибернетика и системный анализ. – 2009. – №6. – С. 50 – 54.

Работа представлена заведующим кафедрой информационных технологий и систем Национальной металлургической Академии Украины, д-р техн. наук, профессором А.И. Михалёв.

Дата представления работы: 15.04.2011

РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЗАКАЛКИ СТАЛИ

Ю.А. Самойлович

*Научно-исследовательский институт металлургической
теплотехники ОАО «ВНИИМТ»*

*Россия, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, д. 16
platan09@yandex.ru*

В работе рассматривается теория для описания термоциклирования при закалке стали. Приводятся результаты вычислительного эксперимента по исследованию тепловых полей в стальном теле цилиндрической формы.

DEVELOPMENT OF THEORY SUPERFICIAL OF STEEL

U.A. Samoylovich

In work the theory for the description of fluctuation of temperatures is considered at steel training. Results of computing experiment on research of thermal fields in a steel body of the cylindrical form are resulted.

Актуальность работы

Стремление к повышению прочности стальных конструкций является стимулом непрерывно расширяющихся исследований по термической обработке стали. Предметом исследований являются, в частности, способы упрочнения металла за счет выбора оптимальных режимов термообработки и соответствующих охлаждающих сред при закалке стальных изделий.

При построении теоретической модели процесса закалки необходимо учитывать следующие физические явления:

- нестационарное поле температур в закаливаемом изделии, зависящее от выделения тепла при фазовых превращениях;
- протекание фазовых превращений аустенита, зависящих от поля температур, скоростей охлаждения, а в общем случае - и от возникающих в изделии напряжений;
- возникновение в изделии деформаций и напряжений, зависящих от неравномерности поля температур (термических) и изменений удельного объема металла в различном фазовом состоянии (структурных).

Сложность задачи определяется взаимозависимостью трех указанных явлений – фазовых превращений, тепловых явлений, деформаций и напряжений. За последние 70 – 80 лет исследованию процессов термической обработки стали посвящено огромное число исследований, однако в связи с использованием новых сплавов и материалов проблема поиска наиболее рациональных режимов термообработки стальных изделий остается достаточно актуальной.

Динамические аспекты процесса деформаций и напряжений закалки стали

В настоящей статье основное внимание уделяется динамическим аспектам процесса возникновения деформаций и напряжений при поверхностной закалке стальных изделий с учетом фазовых превращений, протекающих в процессе остывания закаливаемых изделий.

При поверхностной закалке в наружном слое стальных изделий фиксируются чрезвычайно высокие скорости охлаждения, что способствует протеканию мартенситного превращения при распаде аустенита, сопровождаемого весьма существенным изменением удельного объема при фазовом переходе. Это обстоятельство является

предпосылкой вероятного трещинообразования закаливаемых изделий вследствие высоких показателей поля структурных напряжений и деформаций.

Традиционный подход к определению поля температур в закаливаемом изделии состоит в использовании уравнения теплопроводности параболического типа

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + Q(x, y, z, t) \quad (1)$$

где T – температура, $^{\circ}\text{C}$; t – время, с; λ , ρ , C – коэффициенты теплопроводности, массовой плотности и удельной теплоемкости металла; Q – объемная плотность источника тепла, сопровождающего протекание фазовых превращений.

В работах [1, 2] отмечается, что использование уравнения (1) для описания процессов, протекающих с высокой скоростью, сопровождается возникновением парадоксальных ситуаций, происхождение которых обусловлено базовой гипотезой о бесконечно большой скорости распространения тепла в твердых телах. Более общий подход к описанию процесса теплопроводности состоит в использовании уравнения гиперболического типа

$$\rho C \left(\tau \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{\partial T}{\partial t} \right) = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + Q(x, y, z, t) \quad (2)$$

где параметр τ – время релаксации), определяется физическими свойствами материала изделия [2]. Предлагаемая физико-математическая модель процесса закалки основана на использовании уравнения (2) при описании явлений нестационарной теплопроводности.

При определении поля деформаций и напряжений используется уравнение динамики возникающих в закаливаемом изделии перемещений

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial t^2} - \nabla(C_m \nabla \vec{U}) = \vec{K} \quad (3)$$

где $\vec{U}$ – вектор перемещений; $\vec{K}$ – вектор внешних сил, приложенных к изделию; C_m – вектор упругих свойств материала, матричная форма которого имеет вид:

$$C_m = \left\{ \begin{bmatrix} 2G + \mu & 0 \\ 0 & G \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0 & \mu \\ G & 0 \end{bmatrix} \right\} \left\{ \begin{bmatrix} 0 & G \\ \mu & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} G & 0 \\ 2G + \mu & \end{bmatrix} \right\},$$

где коэффициент μ связан с модулем упругости материала (E) и числом Пуассона (ν) соотношением

$$\mu = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}.$$

В общем случае определение деформаций и напряжений при закалке стальных изделий нуждается в учете термовязкоупругости и пластических деформаций металла с учетом объемных изменений вследствие фазовых переходов. Применение компьютерной техники позволяет осуществить численное решение возникающих при таком общем подходе систем дифференциальных уравнений [3 – 8].

Пример учета объемных изменений при закалке стали

Следует обратить внимание на специфику поля температур и напряжений в поверхностном слое закаливаемых изделий с учетом протекания мартенситного превращения.

Проиллюстрируем способ учета объемных изменений при закалке стали для простейшей задачи нелинейной термоупругости в изделии цилиндрической формы радиусом R_0 при допущении об осевой симметрии поля температур. В том случае, если усадка сплава учитывается коэффициентом линейного расширения (α), основные компоненты тензора напряжений (σ_r , σ_θ , σ_z) определяются соотношениями теории упругости [9]:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{1}{(1-\nu)R_0^2} \left(\int_0^{R_0} \alpha E T r dr - \int_0^r \alpha E T r dr \right); \\ \sigma_\theta &= \frac{1}{(1-\nu)R_0^2} \left(\int_0^{R_0} \alpha E T r dr + \int_0^r \alpha T r dr - \alpha E T r^2 \right); \\ \sigma_z &= \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) - \alpha E T. \end{aligned}$$

Простейший способ учета объемных изменений металла при протекании фазовых превращений основан на использовании следующих предположений:

- коэффициент усадки α заменяется некоторым эффективным коэффициентом линейного расширения β ;
- расчет коэффициента β осуществляется при допущении об аддитивности воздействия различных фазовых превращений при распаде аустенита, когда в качестве продуктов распада возможно образование перлита, бейнита и мартенсита;
- отдельные составляющие эффективного коэффициента β определяются с учетом зависимости удельных объемов каждой фазы от температуры и концентрации углерода по формуле

$$\beta_i = \frac{(V_i/V_0)^{1/3} - 1}{T - T_0} \quad (4)$$

где V_i – удельный объем продукта распада ($i=1, 2, 3$ – определяет наименование фазы – перлита, бейнита, мартенсита соответственно); V_0 – удельный объем аустенита; T – текущее значение температуры металла; T_0 – комнатная температура.

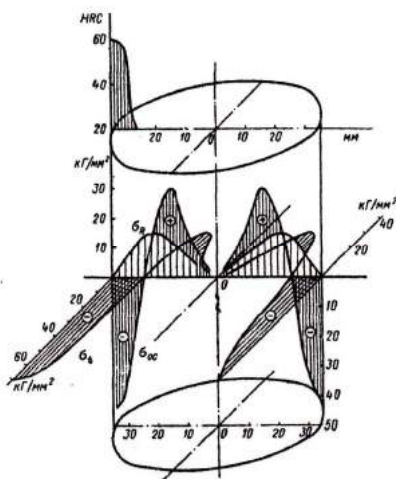


Рис. 1. Распределение основных компонент тензора остаточных напряжений по сечению стального образца цилиндрической формы

напряжений в закаливаемых стальных изделиях подтвердили наличие сжимающих напряжений в поверхностном слое изделий. На рис.1 представлена картина распределения основных компонент тензора

Характер распределения напряжений по сечению закаливаемых изделий существенно зависит от локальных скоростей охлаждения стали на различных участках сечения. При интенсивном охлаждении закаливаемых изделий быстротекущим потоком воды следует ожидать возникновения сжимающих напряжений на поверхности изделий, поскольку именно в поверхностном слое в первую очередь металл расширяется вследствие превращения «аустенит → мартенсит». Эксперименты по исследованию остаточных

остаточных напряжений по сечению стального образца цилиндрической формы диаметром 65 мм [10].

Видно, что на поверхности цилиндра наблюдаются сжимающие остаточные напряжения ($\sigma_z = -420$, $\sigma_\theta = -650$ МПа), в то время в центральной части поперечного сечения образца все компоненты тензора напряжений являются знакоположительными (растяжение). Ниже представлены результаты математического моделирования термомеханических явлений в стальном образце цилиндрической формы при использовании динамических уравнений (2), (3) для расчета температур, скоростей охлаждения и перемещений.

При допущении о симметрии двумерного поля температур относительно оси образца уравнение нестационарной теплопроводности (2) принимает вид

$$\rho C \left(\tau \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{\partial T}{\partial t} \right) = \frac{1}{r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \rho \left(L_1 \frac{\partial \psi_1}{\partial t} + L_2 \frac{\partial \psi_2}{\partial t} \right), \quad (6)$$

где введены обозначения: ψ_1 и ψ_2 – объемные доли перлита и мартенсита; L_1 и L_2 – значения теплоты фазовых переходов перлита и мартенсита соответственно. Численное решение уравнения (6) выполнено при задании следующих краевых условий

$$\text{при } r = R_0: \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_s (T_s - T) \quad , \quad \text{при } r = 0: \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \quad (7)$$

$$\text{при } t = 0: T = T_0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (8)$$

где R_0 – радиус цилиндра; α_s и T_s – коэффициент теплоотдачи на его поверхности и температура охлаждающей среды.

Для определения скоростей распада аустенита

$$\frac{\partial \psi_1}{\partial t} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial \psi_2}{\partial t} = 0$$

использованы уравнения Джонсона-Мейла-Аврами [11 – 14], основанные на предположении о том, что объемная доля образующейся при распаде аустенита фазы может быть выражена соотношением

$$\psi_j = 1 - \exp \left[1 - K_j (t - t_j^0)^n \right], \quad (9)$$

где t_j^0 – моменты начала возникновения продуктов распада (перлита, мартенсита, $j=1, 2$); K и n – эмпирические коэффициенты.

Определение деформаций и напряжений в остывающей стальной заготовке цилиндрической формы осуществляется совместно с решением задачи нестационарной теплопроводности. Для случая, когда возникновение напряжений обусловлено термической усадкой металла, в книге Боли-Уэйнера [9] приводится решение задачи об упругопластическом равновесии цилиндрической заготовки в неравномерном поле температур с использованием условия пластичности Мизеса. Для определения деформаций и напряжений в цилиндрической стальной заготовке с учетом объемных изменений, вызванных фазовыми превращениями, решение Боли-Уэйнера обобщается следующим образом:

- вместо коэффициента линейного расширения α , учитывающего термическую усадку металла, вводится эффективный коэффициент линейного расширения $\beta = \beta_A + \beta_P + \beta_B + \beta_M$, составленный алгебраической суммой коэффициентов линейного расширения отдельных фаз изучаемого сплава (аустенита, перлита, бейнита, мартенсита);
- нестационарное поле температур в стальной заготовке определяется путем численного решения системы уравнений (6) – (8);
- решение задачи определения деформаций и напряжений в заготовке осуществляется с учетом зависимости модуля упругости (E) и предела текучести сплава (σ_s) от температуры.

Ниже приводятся результаты решения поставленной таким образом задачи для двух групп исходных данных.

К первой группе относится решение задачи определения поля температур, скоростей охлаждения и температур для стальной заготовки диаметром 65 мм. Цель расчетов состоит в оценке качественного и количественного сопоставления полученных расчетом напряжений с результатами экспериментального определения остаточных напряжений, приведенными в книге Г.Ф. Головина [10]. Попутно отмечаются некоторые особенности поля скоростей охлаждения металла в поверхностном слое заготовки, выявленные при решении обобщенной задачи нестационарной теплопроводности (6) – (8).

Ко второй группе относятся результаты решения задачи для стальной заготовки диаметром 200 мм, и отмечается возможность

расчетного определения границы прокаливаемости поверхностного слоя заготовки.

При этом использованы следующие значения теплофизических свойств стали и параметров режима охлаждения: $T_0=1123$ К, $T_S=300$ К, $\rho=7500$ кг/м³, $C=628$ Дж/(кг×град), $\lambda=35$ Вт/(м×град), $L_1 = 20,93$ кДж/кг, $L_2= 75,36$ кДж/кг, $\alpha_S=20000$ Вт/(м²×град).

На рис. 2 – 4 приведены результаты расчетов для первой группы исходных данных, при учете превращений аустенита в перлит и мартенсит (обсуждение особенностей бейнитного превращения выходит за пределы настоящей публикации).

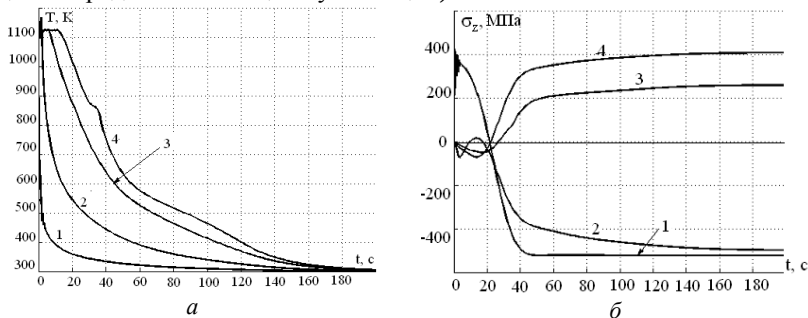


Рис. 2. Изменение во времени температур и продольных напряжений в четырех характерных точках вдоль радиуса цилиндрической заготовки диаметром 65 мм

При этом использовали следующие характеристики превращений $A \rightarrow P$ и $A \rightarrow M$:

а) границы интервалов распада аустенита в перлит и мартенсит:

$$T_1^P = 853K, T_2^P = 793K, T_1^M = 488K;$$

б) параметры кинетических уравнений (9) для перлита и мартенсита:

$$K_P=0,001; K_M=4; n_P=3; n_M=2;$$

в) значения коэффициентов линейного расширения фаз приняты равными:

$$\beta_A=2,08 \times 10^{-5} \text{ 1/град}, \beta_P = -1,52 \times 10^{-5} \text{ 1/град}, \beta_A = -4,5 \times 10^{-5} \text{ 1/град}.$$

Из рассмотрения графиков на рис. 2,а следует, что в течение 200 с остывание образца для принятых режимных параметров практически завершается. Значения всех компонент тензора напряжений к моменту $t = 200$ с стабилизируются, что дает основания расценивать полученные к указанному моменту времени напряжения как остаточные. Из рассмотрения графиков на рис. 2,б следует, что в начальный

период времени (до 15 – 20 с) в поверхностном слое образца преобладают растягивающие термические напряжения, максимальные значения которых не превышают 400 – 410 МПа. С момента $t = 20$ с происходит изменение знака напряжений вблизи от поверхности, и уже при $t = 50 – 60$ с на поверхности образца устанавливаются сжимающие напряжения, максимальные значения которых достигают 500 – 520 МПа.

На рис. 3 представлено изменение продольных напряжений вдоль радиуса цилиндра для нескольких моментов времени.

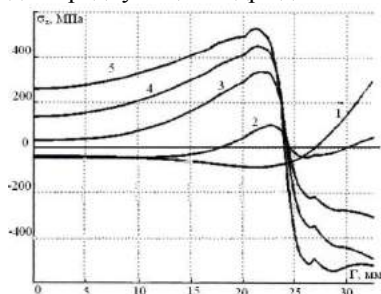


Рис. 3. Изменение продольных напряжений вдоль радиуса цилиндра для нескольких моментов времени

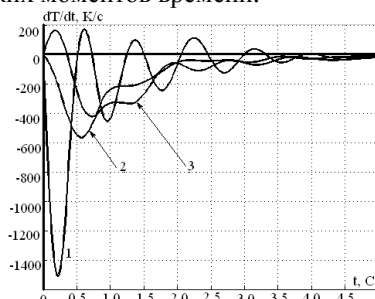


Рис. 4. Колебания скорости охлаждения поверхностного слоя образца в начальной стадии процесса

Графики рис. 3 наглядно свидетельствуют о преобладании сжимающих напряжений в поверхностном слое металла толщиной 7 – 7,5 мм (глубина прокаливаемости) для финишной стадии охлаждения образца. Распределение вдоль радиуса образца полученных расчетом продольных остаточных напряжений качественно согласуется с экспериментальными данными Г.Ф. Головина [10], представленными на рис. 1, хотя по абсолютной величине расчетные значения $\sigma_z^{Max} = 520$ МПа на поверхности образца превышают данные работы [10]. Практически точное совпадение с экспериментальными данными получено для расчетной глубины прокаливаемости в поверхностном слое образца. Достигнуть большего согласия расчетных и экспериментальных данных представляется затруднительным, поскольку при изложении условий проведения экспериментов в работе [10] отсутствует описание условий охлаждения, а также теплофизических и механических свойств стального образца.

Весьма характерной особенностью режима остывания является возникновения колебаний скорости охлаждения поверхностного слоя образца в начальной стадии процесса (3 – 5 с), как показано на рис. 4.

Одновременно наблюдаются весьма существенные колебания основных компонентов тензора напряжений. Таким образом, тепловой удар на поверхности образца сопровождается своеобразным термоциклированием закаливаемого изделия в начальной стадии процесса охлаждения. Это наблюдение является результатом обобщения математической формулировки задачи теплопроводности, связанного с введением второй производной температуры по времени.

Можно предположить, что подмеченный факт существования циклических тепловых волн в поверхностном слое закаливаемых изделий должен нарушать монотонный процесс выделения мартенсита в результате превращения $A \rightarrow M$. Вместе с тем, кратковременность отмеченного эффекта и его локализация в тонком поверхностном слое ограничивают возможности проявления эффекта закаленными изделиями весьма малых размеров (стальная фольга, тонкая проволока или катанка). Действительно, в работе Садовского-Фокиной [15] отмечается обнаруженный в эксперименте факт неравномерного выделения мартенсита на проволоке диаметром 1,5 мкм. По-видимому, для достаточно массивных стальных изделий (характерным размером 100 – 200 мм и более) эффект термоциклирования при тепловом ударе не представляет практического интереса.

На рис. 5 – 7 представлены результаты расчетного анализа показателей термонапряженного состояния стальной заготовки диаметром 200 мм при ее закалке от исходной температуры 1123 К. Задание всех теплофизических свойств стали и кинетических параметров фазовых превращений приняли такими же, как для заготовки диаметром 65 мм. Единственное отличие от предшествующей серии расчетов состоит в задании коэффициента теплоотдачи на охлаждаемой поверхности заготовки равным $3000 \text{ Вт/(м}^2\text{град)}$, что соответствует условиям закалки в масле.

Графики изменения температур на рис. 5 указывают на то, что к моменту времени $t = 2000 \text{ с}$ процесс охлаждения заготовки практически завершается. Одновременно фиксируется стабилизация продольных напряжений в характерных точках сечения заготовки, что дает основания рассматривать полученные к моменту времени $t = 2000 \text{ с}$ напряжения как остаточные.

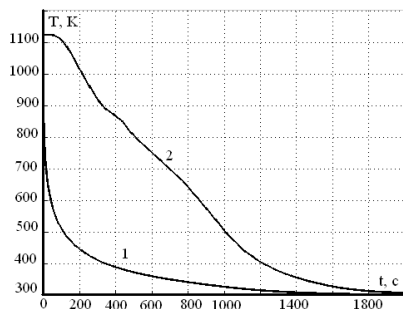


Рис. 5. Графики изменения температур заготовки

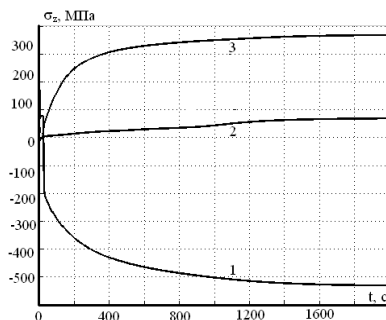


Рис. 6. Графики изменения термонапряжения в заготовке

Распределение продольных напряжений вдоль радиуса заготовки для нескольких моментов времени представлено на рис. 7.

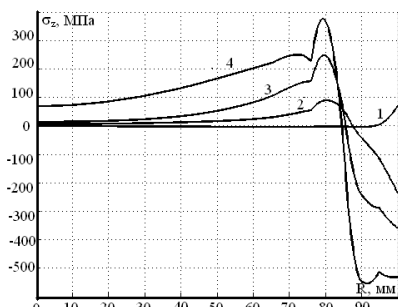


Рис. 7. Распределение продольных напряжений вдоль радиуса заготовки

Заслуживает быть отмеченным тот факт, что максимальное значение растягивающих (т.е. наиболее опасных) напряжений зафиксировано не на охлаждаемой поверхности заготовки, а на определенном расстоянии от поверхности (20 – 21 мм).

По-видимому, именно на внутренней границе закаленного слоя, толщина которого составляет 20 мм, в процессе деформирования при

закалке возникают критические условия для сохранения сплошности металла. Следует отметить, что возникновение трещин на определенном расстоянии от охлаждаемой поверхности зафиксировано при экспериментальном изучении условий трещинообразования при закалке железнодорожных рельсов [16]. Одновременно зафиксировано заметное снижение твердости металла именно на внутренней границе закаленного слоя при поверхностной закалке рельсов [17].

Закключение

1. Представленная в статье математическая модель термомеханических процессов в стальных изделиях при поверхностной закалке позволяет учитывать динамику поля скоростей охлаждения, деформаций и напряжений в закаливаемых изделиях. Результаты расчетов позволили выявить колебательный режим основных термомехани-

ческих показателей стального изделия при «тепловом ударе» - интенсивном охлаждении с поверхности изделия в начальной стадии процесса охлаждения. Из расчетов следует, что в тонком поверхностном слое стального изделия в первые 3 – 5 с развиваются колебания скоростей охлаждения и главных компонент тензора напряжений значительной амплитуды. Это явление может привести к изменению условий мартенситного превращения и определенным изменениям структуры металла при закалке стальных изделий небольшой толщины (проволоки, тонкого листа).

2. Математическая модель позволяет прогнозировать динамику возникновения напряжений в поверхностном мартенситном слое. Расчеты показали, что максимальные растягивающие напряжения, в наибольшей степени определяющие вероятность возникновения трещин, возникают на внутренней стороне поверхностного мартенситного слоя. Это наблюдение подтверждается результатами экспериментов по исследованию трещинообразования в закаленных головках железнодорожных рельсов.

Список литературы

1. Бубнов В.А. О тепловых волнах // Теплофизика высоких температур. – 1982. – Т. 20. – № 5. – С. 912 – 915.
2. Волновые явления теплопроводности / А.Г. Шашков, В.А. Бубнов, С.Ю. Яновский. – М. : Изд-во «УРПС», 2004. – 296 с.
3. An Elastic-Plastic Stress analysis of Quenching when considering a Transformation / T. Inoue, K. Tanaka // Int. Journal of Mech.Sci.,1975. – Vol. 17. – P. 361 – 367.
4. Моргалюк В.С. Методика расчета теплового и напряженно-деформированного состояния стальных изделий сложной формы при закалке // Проблемы прочности. – 1982. – № 6. – С. 80 – 85.
5. Лошкарев В.Е. Математическое моделирование процесса закалки с учетом влияния напряжений на структурные превращения в стали // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1986. – № 1. – С. 2 – 6.
6. Моделирование на ЭВМ превращений аустенита при охлаждении стали / А.Н. Воронов, Т. Квачкай, В.Т. Жадан, М. Павлуш // Металлы. – 1991. – № 2. – С. 81 – 89.
7. Расчет закалочных напряжений в стальных деталях с учетом упруговязкопластических свойств и изменения фазового состава / В.Г. Лешковцев, А.М. Покровский // Механика твердого тела. – 1999. – № 2. – С. 101 – 107.

8. Моделирование температурно-структурного и напряженного состояний при закалке композитных прокатных валков / А.М. Покровский [и др.] // Сталь. – 2006. – № 2. – С. 63 – 65.

9. Теория температурных напряжений / Б. Боли, Дж. Уэйнер. – М. : Мир, 1964. – 517 с.

10. Головин Г.Ф. Остаточные напряжения, прочность и деформации при поверхностной закалке токами высокой частоты. – Л. : Машиностроение, 1973. – 150 с.

11. Кристиан Дж. Теория превращений в металлах и сплавах. – М. : Мир, 1978. – Ч. 1. – 806 с.

12. Mathematical Model of Heat Flow and Austenite-Perlit Transformation in Eutectoid Carbon Steel Rods for Wire / K.A. Pracash, J.K. Brimacombe. // Metall. Trans., 1981. – V. 12. – P. 121 – 133.

13. Analysis of Temperature, Structure and Stress during Quenching of Steel with Consideration for Stress Dependence of Transformation Kinetics / Z. Wang, T. Inoue // Journal of Society Mater. Sci., Japan, 1983. – № 360. – P. 993 – 996.

14. Kwon, O. A. Technology for the Prediction and Control of Microstructural Changes and Mechanical Properties in Steels (Review) // ISIJ International, 1992. – V. 32. – № 3. – P. 350 – 358.

15. Остаточный аустенит в закаленной стали /В.Д. Садовский, Е.А. Фокина. – М. : Наука, 1986. – 114 с.

16. Выбор оптимальной структуры закаленных рельсов / Шур Е.А., Раузин Я.Р. // Производство, качество и стойкость железнодорожных рельсов. – М.: Металлургия, 1966. – 202 с.

17. Промышленное применение токов высокой частоты / под ред. Г.Ф. Головина. – М. : Машиностроение, 1964. – 110 с.

Работа представлена д.т.н., действительным членом Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, профессором кафедры вычислительной техники и прикладной математики Логуновой О.С.

Дата представления работы: 11.03.2011

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ЗДАНИЯ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова

*ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»,
Россия, 454048, г. Челябинск, пр. Ленина, 76
tgsiv@susu.ac.ru*

Рассматривается задача оптимального управления тепловым режимом отапливаемых зданий. Получены необходимые условия оптимальности, сформулированные в форме принципа максимума. Проанализированы вычислительные аспекты и указан способ приближенной реализации оптимального управления.

INCREASE OF ENERGY EFFICIENCY OF THERMAL MANAGEMENT OF THE BUILDING BASED ON NUMERICAL SIMULATION

V.I. Panferov, E.Y. Anisimova

The problem of optimal control over thermal conditions of the heated buildings is concerned. The necessary conditions of optimality formulated in the maximum principle are obtained. The computational aspects are analyzed and the way of approximate implementation of optimal control is stated.

Актуальность работы

Одной из приоритетных задач государственной энергетической политики на период до 2020 года является разработка эффективных систем управления теплоснабжением, обеспечивающих на объектах промышленного и гражданского назначения требуемое качество теплового режима и экономию энергетических ресурсов. Однако, строго говоря, заметных успехов в этой области пока не достигнуто, несмотря на достаточное количество программ энергосбережения, принятых за последние годы. В частности, до сих пор не разработаны эффективные способы экономии тепловой энергии, затрачиваемой на отопление зданий в нерабочее время. К сожалению, известные в литературе модели и алгоритмы управления тепловыми режимами зданий получены, зачастую, путем использования ряда серьезных упрощений. Вследствие этого они недостаточно точны и имеют ограниченную область применения, или же, напротив, модели имеют настолько сложную структуру, что становятся практически неприемлемыми для целей регулирования.

Цели и задачи работы

В связи с вышеперечисленным, цель работы заключается в создании оптимального управления тепловым режимом здания в нерабочий период. Для реализации поставленной цели необходимо располагать адекватной математической моделью, описывающей тепловой режим здания, а также разработать оптимальный алгоритм управления микроклиматом здания в нерабочий период, который обеспечит требуемые температуры внутреннего воздуха при минимальном расходе тепловой энергии.

Согласно СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция, кондиционирование» в жилых, общественных, административно-бытовых и производственных зданиях в нерабочее время температуру воздуха можно поддерживать на более низком уровне, чем в остальные промежутки времени. Это дает возможность снизить расход энергии на отопление. Однако для получения максимального эффекта от реализации такого, так называемого, режима прерывистого отопления необходимо решить задачу об оптимальном управлении этим режимом.

Проведенный анализ литературы показал, что математическое описание теплового режима здания может быть удовлетворительно представлено следующим образом:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}, 0 < x < L, \tau > 0; \quad (1)$$

$$t(x, 0) = t^0(x), 0 \leq x \leq L; \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = \alpha_B [t_B(\tau) - t(0, \tau)], \tau > 0; \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial t(L, \tau)}{\partial x} = \alpha_H [t(L, \tau) - t_H(\tau)], \tau > 0; \quad (4)$$

$$c_B m_B \frac{dt_B(\tau)}{d\tau} = u(\tau) - \alpha_B F_{CT} [t_B(\tau) - t(0, \tau)] - k_{OK} F_{OK} [t_B(\tau) - t_H(\tau)], \tau > 0; \quad (5)$$

$$t_B(0) = t_B^0, \quad (6)$$

где $t(x, \tau)$, $t(0, \tau)$, $t(L, \tau)$ – температура соответственно в точке с координатой x по толщине наружной стены, на внутренней поверхности и на наружной поверхности наружной стены здания в момент времени τ ; λ – коэффициент теплопроводности материала наружной стены; α_B , α_H – коэффициент теплоотдачи соответственно для внутренней и наружной поверхностей стены; $t_B(0)$, $t_B(\tau)$ – температура внутреннего воздуха в начальный момент времени и момент времени τ соответ-

ственно; $t_H(\tau)$ – температура наружного воздуха в момент времени τ ; $u(\tau)$ – управление, мощность системы отопления в момент времени τ ; c_B, m_B – удельная теплоемкость и масса внутреннего воздуха в здании соответственно; a – коэффициент температуропроводности; F_{CT}, F_{OK} – соответственно площадь наружных стен здания и окон; k_{OK} – коэффициент теплопередачи окна.

На множестве допустимых решений был определен функционал I , первая составляющая которого определяет близость начальной и конечной температуры внутреннего воздуха, а вторая – расход тепловой энергии.

$$I = [t_B(\tau_k) - t_B^0]^2 + \beta \int_0^{\tau_k} G[u(\tau)] d\tau, \quad (7)$$

где τ_k – заданный промежуток времени; G – функция, оценивающая текущий расход теплоты зданием на отопление; β – некоторый весовой коэффициент.

В теории оптимального управления системами с распределенными параметрами, согласно проведенному анализу литературы, нет достаточно общей формулировки принципа максимума, позволяющей решать все возможные постановки задач. Поэтому в работе отыскивались условия оптимальности управления для поставленной задачи. Условия оптимальности представлены следующими соотношениями: для формулировки условий оптимальности вводится функция

$$H = \psi_0(\tau)u(\tau) - \beta G[u(\tau)], \quad (8)$$

где $\psi_0(\tau)$ удовлетворяет следующей системе уравнений:

$$-c_B m_B \frac{d\psi_0(\tau)}{d\tau} + (\alpha_B F_{CT} + k_{OK} F_{OK}) \psi_0(\tau) - \frac{a\alpha_B}{\lambda\psi(0, \tau)} = 0; \quad (9)$$

$$\frac{\partial \psi(x, \tau)}{\partial \tau} + a \frac{\partial^2 \psi(x, \tau)}{\partial x^2} = 0; \quad (10)$$

с начальными условиями

$$c_B m_B \psi_0(\tau_k) = -2[t_B(\tau_k) - t_B^0]; \quad (11)$$

$$\psi(x, \tau_k) = 0. \quad (12)$$

Граничные условия для функции $\psi(x, \tau)$ задавались в виде:

$$a \times \frac{\alpha_B}{\lambda} \psi(0, \tau) - a \times \frac{\partial \psi(0, \tau)}{\partial x} - \alpha_B F_{CT} \times \psi_0(\tau) = 0; \quad (13)$$

$$-\lambda \frac{\partial \psi(L, \tau)}{\partial x} = \alpha_H \psi(L, \tau). \quad (14)$$

Доказано утверждение, что если допустимое управление $u(\tau)$ доставляет минимум критерию (7), то оно должно максимизировать функцию H , определенную соотношениями (8) – (14), т.е.

$$u^*(\tau) = \arg \left\{ \sup H \mid W_0^{\min} \leq u(\tau) \leq W_0^{\max} \right\}.$$

Аналитически решить данную задачу ввиду ее сложности не представлялось возможным. Вместе с тем, большим достоинством доказанного утверждения является то, что оно позволяет во многих случаях оценить структуру оптимального управления, его общий вид, не решая самой оптимальной задачи. Например, в линейных оптимальных задачах, т.е. в задачах, уравнения которых содержат управление в первой степени, оптимальное управление представляется кусочно-постоянной функцией, принимающей поочередно значения $W_0^{\min}$ и $W_0^{\max}$, т.е. она будет представлять такую функцию

$$u^*(\tau) = \frac{W_0^{\min} + W_0^{\max}}{2} + \frac{W_0^{\max} - W_0^{\min}}{2} \times \text{sign}[\psi_0(\tau) - \beta], \quad (15)$$

где $W_0^{\min}$, $W_0^{\max}$ – соответственно минимально возможная и установленная (максимально возможная) мощность системы отопления здания.

Дальше, учитывая полученные результаты и практические соображения, полагали, что приближенно-оптимальное управление имеет два интервала постоянства. В связи с этим оценивалась эффективность следующих алгоритмов управления:

I режим: в течение первого периода времени мощность системы отопления равна максимальному (установленному) значению, а во второй период – минимальному, причем длительность периодов отыскивалась моделированием процесса;

II режим: в течение первого периода времени мощность системы отопления равнялась минимальному значению, а во второй период – максимальному, длительность периодов отыскивалась также моделированием процесса, при этом условия задачи таковы, что ограничение по температуре внутреннего воздуха не нарушается, то есть внутреннего температура не опускается ниже 12 °С.

Для решения этой задачи была проведена конечно-разностная аппроксимация математической модели и разработано программное обеспечение в среде MatLab [1]. В результате расчетов было получено, что расход теплоты во втором режиме прерывистого отопления существенно ниже, что подтверждает ранее полученный вывод об опти-

мальности режима прерывистого отопления для инженерной модели [2, 3].

Разработанная программа [1] позволяет для конкретного здания рассчитать различные режимы управления мощностью системы отопления в нерабочий период для целей проведения качественного и количественного сравнения их. Таким образом, для здания были запрограммированы еще 3 различных тепловых режима. Анализ этих режимов на основе вычислительного эксперимента был необходим для отыскания оптимального управления тепловой мощностью системы отопления, по возможностям обеспечения требуемой температуры внутреннего воздуха помещения и по количеству энергозатрат при этом.

III режим аналогичен II режиму, только дополнительно внутреннего температура выходит на свою границу 12°C . Вообще, вопрос о том, выйдет ли система на ограничение по внутренней температуре, зависит от длительности режима прерывистого отопления, а также от установленной мощности системы отопления.

IV режим осуществляется путем поддержания внутренней температуры на заданном значении с помощью стабилизирующего регулятора, и им же определяется мощность системы отопления.

V режим, когда здание подключено к тепловым сетям и производится центральное регулирование отпуска теплоты на источнике, т.е. мощность, необходимая для разогрева здания, является функцией температуры наружного воздуха. Этот режим является наиболее распространенным в настоящее время.

В результате расчетов и сравнения было установлено, что экономичным является режим, когда интенсивный разогрев здания осуществляется только на конечном участке нерабочего времени (режимы II и III). Неэкономичным, оказался наиболее распространенный в настоящее время режим, когда здание подключено к центральным тепловым сетям и осуществляется регулирование отпуска теплоты только на источнике. Расход тепловой энергии и величина экономии для рассмотренных режимов приведены в таблице.

Заключение

Таким образом, можно утверждать, что, во-первых, для модели объекта с распределенными параметрами определены условия оптимальности, сформулированные в форме принципа максимума, установлен общий вид оптимального управления; во-вторых, разработано программное обеспечение, позволяющее для любого объекта и различных условий смоделировать разные режимы управления мощностью системы отопления в нерабочий период с целью их качественно-

го и количественного анализа; в-третьих, подтверждена эффективность управления, найденного ранее на основе инженерной модели, установлено, что интенсивный натоп здания на конечном участке нерабочего времени экономит до 30-55% теплоты; в-четвертых, доказана неэкономичность распространенного в настоящее время режима, когда здание подключено к центральным тепловым сетям; в-пятых, установлено, что целесообразно применение режима прерывистого отопления в зданиях с автономным источником теплоты и нерационально при подключении их к центральным тепловым сетям.

Таблица

Расход и экономия тепловой энергии при различных режимах управления тепловой мощностью системы отопления

<i>Название режима</i>	<i>Оптимальный режим прерывистого отопления с выходом на ограничение по t_b</i>	<i>Оптимальный режим прерывистого отопления</i>	<i>Со стабилизирующим регулятором по t_b</i>	<i>При подключении здания к центральным тепловым сетям</i>
<i>Расход тепловой энергии, Вт·ч</i>	20289,6	31159,2	43597,1	45060
<i>Экономия, %</i>	55	30,8	3,2	0

Список литературы

1. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки, зарегистрированное в Отраслевом фонде алгоритмов и программ (ОФАП). Программа для расчета оптимальных режимов прерывистого отопления зданий / Е.Ю. Анисимова. – № 50200800068 от 18.01.2008 г.

2. Об оптимальном управлении тепловым режимом зданий / В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова, А.Н. Нагорная // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2007. – Вып. 8. – №20 (92). – С. 3–9.

3. Энергоэффективное управление тепловым режимом зданий / В.И. Панферов, Е.Ю. Анисимова // Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов: Тр. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов 13-15 ноября. – Тольятти: ТГУ, 2007. – С. 102–103.

Работа представлена д.ф.-м.н., профессором, зав. кафедрой «Экономико-математические методы и статистика» ЮУрГУ Панюковым А.В.

Дата представления работы:
24.03.2011.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАРДИАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ ПРИ ИШЕМИЧЕСКОЙ БОЛЕЗНИ СЕРДЦА

Е. В. Петрунина, Н.А. Волкова

*ГОУ ВПО «Пензенский государственный университет»,
Россия, 440026, Пензенская обл., г. Пенза, ул. Красная, д. 40
witchys@inbox.ru*

На основании данных проспективного наблюдения за 200 пациентами с ишемической болезнью сердца (ИБС) выделены три группы риска (низкий, средний и высокий). На основе данных за период наблюдения 7 лет с использованием компьютерного прогнозирования с учетом выделения факторов неблагоприятного прогноза рассчитаны длины векторов трех вариантов возможного течения коронарной болезни сердца: коронарной смерти, повторного инфаркта миокарда, стабильного течения.

MATHEMATICAL PREDICTION OF CARDIAL ISCHEMIA EVENTS

E. B. Petrunina, N. Volkova

Based on data from a prospective monitoring of 200 patients with coronary heart disease (CHD) identified three groups of risk (low, medium and high). Based on monitoring data for the period 7 years with use of computer projections, taking into account the allocation factors unfavourable prognosis calculated length vectors three options for a possible flow of coronary heart disease: coronary death, myocardial infarction, stable flow.

Актуальность работы

Своевременное выявление пациентов с повышенным и высоким риском возникновения осложнений при ишемической болезни сердца (ИБС) с целью проведения профилактических мероприятий является основным направлением в улучшении общей ситуации по заболеваемости в целом. Медицинское прогнозирование является основой развития и совершенствования профилактики, которой принадлежит будущее медицины [1]. Развитие компьютерных средств и современных методов цифровой обработки данных, а также возникающие клинические задачи обусловили качественное усовершенствование этапов сбора и обработки информации: переход от формализованной логики врача к статистическим правилам анализа и классификации.

Постановка задачи и решение

Прогнозирование кардиальных событий при ишемической болезни сердца относится к классу сложных задач, связанных с поиском решений в условиях неопределенности, недостоверности, неполноты, противоречивости и многозначности исходной информации [2].

В предлагаемой работе процесс прогнозирования включает:

- исходные диагностические данные (ИДД) для конкретного пациента получают, регистрируя тщательно собранный анамнез жизни и анамнез болезни, а также показатели электрофизических методов обследования в различные моменты времени t_i периода наблюдения T_n ;
- дополнительные диагностические данные (ДДИ) получают из личных медицинских карточек других пациентов. Кроме исходных и дополнительных данных используется априорная информация (АИ), отражающая накопленный опыт клинического наблюдения больных ИБС.

Для сбора исходной информации проводится поэтапное обследование с использованием таких электрофизических методов диагностики, как электрокардиография покоя, холтеровское мониторирование ЭКГ, эхокардиография, нагрузочный тест, вариабельность ритма сердца, сигнал-усредненная ЭКГ [2].

При анализе результатов поэтапного обследования (ИДД) применяются геометрические аналогии отображения структуры данных, использующие термины многомерных пространств (или функциональных графов) и придающие определенную наглядность задачам прогнозирования возможных кардиальных событий [2].

В задачах прогноза кардиальных событий множество осей (компонент) n -мерного метрического пространства R_n может быть представлено множеством $\Omega\{x_{i,j}\}$, элементы которого $x_{i,j} \in \Omega$ интерпретируют клинко-инструментальные показатели, где $i = \overline{1, r}$, $j = \overline{1, s_i}$, r – число методов обследования, s_i – число регистрируемых факторов в каждом методе. Рассматриваемые показатели в силу своей природы всегда содержат случайные составляющие, интерпретируемые множеством $\tilde{\Omega}\{\varepsilon(x_{i,j})\}$.

Множество $\Omega\{x_{i,j}\}$ образует пространство варьируемых параметров $R_\Omega \subset R_{\Omega, \tilde{\Omega}}$ или метрическое пространство состояний с размерностью, равной числу показателей $n = \sum_{i=1}^r s_i$ (в рассматриваемом поэтапном процессе обследования, $n \geq 50$, $r = 9$, а число анализируемых взаимных связей между показателями – более 110).

Все компоненты пространства можно считать независимыми, поэтому оси пространства образуют ортогональный базис. Структура

рассматриваемой ИДД неоднородна по пространству R_Ω . Использование экспертных оценок с последующей нормировкой пространства позволяет обобщить все компоненты единой мерой и распределить на каждом шаге поиска пропорции между компонентами и тем самым обеспечить направленный поиск в многомерном пространстве.

На промежутке прогнозирования Δt множество показателей разделяется на три подмножества $\Omega_q \subset \Omega$, где $q = \overline{1,3}$:

- Ω_1 – постоянные показатели, для которых на Δt справедливо высказывание, «если сегодня есть, то завтра обязательно есть», например, показатель – «отягощенная наследственность»;
- Ω_2 – условно постоянные показатели, для которых на Δt справедливо высказывание, «если сегодня нет, то завтра может быть» или «если сегодня есть, то завтра может не будет», например, показатель – «курение»;
- Ω_3 – переменные показатели, для которых на интервале наблюдения T_n с помощью аппроксимации может быть определен эмпирический закон изменения во времени.

Показателям $x_{i,j,k} \in \Omega_1$ на промежутке прогнозирования Δt присваиваются постоянные значения из интервала $[0,1]$, а показатели $x_{i,j,k} \in \Omega_2$ интерпретируются случайными величинами из интервала $[0,1]$, подчиняющимися нормальному закону распределения (практически задаются с помощью датчика случайных чисел).

Все пространство R_Ω разбивается на подпространства $R_{\Omega_k} \subset R_\Omega$, соответствующие возможным кардинальным событиям (где k – число событий, включающих коронарную смерть (КС), повторный инфаркт (ПИ), непрерывно-рецидивирующее течение (НРТ) и стабильное течение (СТ)). Конкретное состояние пациента в момент времени t_l периода наблюдения $T_n = \{t_l\}$, где $l = \overline{1,p}$, p – число обследований, интерпретируется вектором состояния $\bar{\Psi}_l = \{x_{i,j}(t_l)\}$, длина которого $L(\Psi_l)$ может быть выбрана в качестве прогнозирующей функции (ПФ) в моделях прогноза. В процессе прогноза могут рассматриваться отдельные компоненты $\bar{\Psi}_{i,l} = \{x_{i,j}(t_l)\}$ вектора состояния $\bar{\Psi}_l$. Эти компоненты $\bar{\Psi}_{i,l} \subset \bar{\Psi}_l (\bar{\Psi}_{\text{ж}}, \bar{\Psi}_{\text{оф}}, \bar{\Psi}_{\text{экг}}, \bar{\Psi}_{\text{хм}}, \bar{\Psi}_{\text{эк}}, \bar{\Psi}_{\text{нт}}, \bar{\Psi}_{\text{суэк}}, \bar{\Psi}_{\text{врс}})$ и их длины $L(\bar{\Psi}_{i,l}) = \{A_{\text{ж}}, A_{\text{оф}}, A_{\text{экг}}, A_{\text{хм}}, A_{\text{эк}}, A_{\text{нт}}, A_{\text{суэк}}, A_{\text{врс}}\}$ могут быть использованы для оценки прогностических возможностей различных функциональных методов диагностики.

Применяются вероятностно-статистические методы для анализа исходных данных и экспертных оценок. При таком подходе используются достаточно хорошо разработанные в настоящее время экстра-

поляционные методы прогнозирования. В экстраполяционных моделях выполняется предварительная обработка ИДД, полученных на интервале времени $T_n = \{t_1, t_2, \dots, t_l, \dots, t_N\}$, обеспечивающая:

- снижение влияния случайной составляющей $\tilde{\Omega}(\bar{x})$ в исходном числовом ряду $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, т. е. приближение к тренду;
- представление исходного числового ряда в виде, удобном для последующего аналитического анализа.

Множество векторов $M(T_n) = \{\Psi_l(t_l, \bar{x})\}$, можно рассматривать как реализацию случайного процесса, являющуюся, с одной стороны элементом выборочного вероятностного пространства, а с другой стороны, – это детерминированная, как правило, многоэкстремальная функция вполне определенного класса, заданная на промежутке наблюдения T_n . Для аппроксимации такой реализации используется метод приближения многоэкстремальных функций интерполяционными полиномами Эрмита.

Воспользуемся понятиями теории комплектов и введем в рассмотрение комплект основных функций

$$K = \{\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n\}, \quad \psi_i \in \Psi, \quad i = 1, 2, \dots, n,$$

в который включается заданное число экземпляров основной функции ψ_i .

Поставим в соответствие такому комплекту характеристическую функцию

$$\chi(K, \psi_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } \psi_i \in K \\ 0, & \text{если } \psi_i \notin K \end{cases}$$

и матрицу параметров

$$A(K, \psi_i) = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k1} & a_{k1} & \dots & a_{kn} \end{vmatrix}.$$

Характеристическая функция $\chi(K, \psi_i)$ и матрица параметров $A(K, \psi_i)$ определяют функцию комплекта

$$\phi(K, \psi_i) = \sum_{i=1}^n \chi(K, \psi_i) a_{1i} \psi_i(x - a_{ki}),$$

где k – число параметров основной функции.

Функция комплекта $\phi(K, \psi_i)$ представляет собой линейную суперпозицию (композицию) основных функций $\psi_i \in \Psi$, представленными в виде:

$$\varphi(\bar{x}) = \sum_{j=1}^d \alpha_j \delta(\beta_j, (\bar{x} - \bar{x}_j)),$$

где α_j, β_j , – параметры модели, подлежащие определению; $\bar{x}_j$ – экстремальные значения исходного числового ряда $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$; d – число экстремумов $\bar{x}_{max}$ и $\bar{x}_{min}$ в анализируемой реализации случайного процесса; $\delta(x)$ – основная сферически симметричная функция, вы-

бираемая из класса экспоненциальных или дробно рациональных функций, например,

$$\delta(\bar{x}) = \exp\left\{-\frac{1}{2}|\bar{x}|^2\right\} \text{ или } \delta(\bar{x}) = \frac{1}{1+|\bar{x}|^2}.$$

Если в качестве прогнозирующей функции выбрана длина вектора состояния $\Lambda(\Psi(t, \bar{x})) \equiv \Lambda(t)$, то аналогами этих функций будут функции одной переменной:

$$\varphi(t) = \sum_{j=1}^d \alpha_j \delta\left(\beta_j, (t - t_j)\right), \text{ где } \delta(t) = \exp\left\{-\frac{1}{2}t^2\right\} \text{ или } \delta(t) = \frac{1}{1+t^2}.$$

В задачах индивидуального прогнозирования функция $\varphi(\bar{\alpha}, \bar{\beta}, t)$ носит название тренда $\bar{\alpha} = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_d\}$, $\bar{\beta} = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i, \dots, \beta_d\}$, вид основных функций определяется на основе анализа АИ и ДДИ. Прогнозное значение $\varphi(T_n + \Delta t_\tau)$ вычисляется на основе экстраполяции $\varphi(t)$ на будущие моменты времени Δt_τ . В качестве моментных характеристик прогнозируемых кардиальных событий используются условное математическое ожидание $\mu_{\bar{x}}(t, \bar{x})$ и условную дисперсию $\sigma_{\bar{x}}(t, \bar{x})$.

Структура МП кардиальных событий в общем случае представляется двумя составляющими, отражающими процесс изменения состояния пациента и случайные факторы, соответственно.

В качестве одной из возможных практических реализаций можно рекомендовать модель авторегрессии с обучением, использующую процедуры перехода от инвариантности параметров ПФ по времени к их инвариантности по группе пациентов. Инвариантность параметров α_j, β_j по времени позволяет брать для обучения числовые ряды, начинающиеся с любого момента времени, а сам числовой ряд $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ может также начинаться с произвольного момента времени $t_l \in T_n$.

Подробные результаты исследования рассматриваемой технологии и практические рекомендации изложены в монографии [2].

Результаты

На основании данных проспективного наблюдения у пациентов с ИБС рассчитаны длины векторов следующих вариантов возможного течения коронарной болезни сердца: коронарной смерти – $\Lambda_{КС}$, повторного инфаркта миокарда – $\Lambda_{ПИ}$, стабильного течения – $\Lambda_{СТ}$. Математическое ожидание длины вектора стабильного течения ИБС составляет $\mu_{\Delta_{СТ}} = 0,35$, при дисперсии $\sigma_{\Delta_{СТ}} = 0,01$. В случае прогнозирования повторного инфаркта миокарда математическое ожидания дли-

ны данного вектора состояния приближается к значению $\mu_{\Delta_{\text{пи}}} = 0,49$ при дисперсии $\sigma_{\Delta_{\text{ст}}} = 0,02$. Риск коронарной смерти будет высок в случае получения во время компьютерного прогнозирования значения математического ожидания $\mu_{\Delta_{\text{кс}}} = 0,72$, дисперсии $\sigma_{\Delta_{\text{кс}}} = 0,02$.

Заключение

Длительное наблюдение за пациентами с ИБС при изучении результатов доказывает необходимость комбинации методов в целях совершенствования кардиологической диагностики. Именно в этом случае возрастает положительная прогностическая точность при высоком значении чувствительности.

Полученные результаты исследования будут использованы, во-первых, как ДДИ при последующей коррекции вероятностно-статистических моделей и, во-вторых, при построении моделей, основанных на методах теории нечетких множеств и теории искусственных нейронных сетей.

Список литературы

1. Чазов Е.И. Инфаркт миокарда – прошлое, настоящее и некоторые проблемы будущего // Сердце.– 2002. –№ 1. – С. 6-8.
2. Компьютерная система прогнозирования кардиальных событий при ишемической болезни сердца: монография. Ч.1 / Татарченко И.П., Позднякова Н.В, Шевырев В.А., Соловьева Е.В.– Пенза, 2006. – 112 с.

Работа представлена д.ф.-м.н., профессором, заведующим кафедрой «Физика» Кривичком В.Д.

Дата представления работы: 14.04.2011.

ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРАВИЛ В АКТИВНЫХ БАЗАХ ДАННЫХ

С.В. Шибанов, А.Б. Зудов

*ГОУ ВПО «Пензенский государственный университет»,
Россия, 440026, Пензенская обл., г. Пенза, ул. Красная, 40
cnit@pnzgu.ru*

Реализация правил обработки данных в активных базах данных (АБД) может быть затруднена из-за возможных коллизий в процессе выполнения правил. В статье рассматриваются типичные проблемы построения правил в АБД, обусловленные коллизиями в процессе их выполнения, предлагаются решения указанных проблем и способы корректного выполнения правил.

PROBLEMS OF RULE PROGRAMMING IN ACTIVE DATABASE SYSTEMS

S.V. Shibarov, A.B. Zudov

Rules in active database systems can be difficult to program due to possible collisions of rule processing. In this paper we consider problems, caused by collisions in rule processing, and describe methods of solving such problems and correct organization of rule processing.

Актуальность и проблематика работы

Активные базы данных (АБД) обладают функциональностью традиционных баз данных (БД), но кроме этого способны автоматически реагировать на изменения состояния БД без вмешательства извне. Это возможно благодаря использованию активных правил (event-condition-action, ECA) – правил, обычно имеющих форму «при событии, если выполняется условие, выполнить действие» [3].

Активные правила являются достаточно эффективным и удобным средством реализации самой разной функциональности, однако построение корректного набора взаимодействующих правил усложняется отсутствием методов и средств выявления взаимосвязей между правилами в процессе их выполнения. В настоящее время существует ряд проблем, связанных с взаимодействием правил и не имеющих общепризнанного решения. То, каким образом эти проблемы решаются в конкретной реализации, кардинально влияет на возможности АБД и информационных систем в целом.

Одной из самых важных проблем, принципиально влияющей на работоспособность АБД, является возможное *зацикливание правил* (*non-determination*). Если одно из правил активирует другое правило при выполнении своего действия, второе правило может активировать третье и так далее. Если этот процесс не заканчивается, например, если третье правило снова вызвало первое, происходит зацикливание. В этом случае АБД должна быть способна предупреждать такие ситуации, иначе она может стать непригодной для использования.

Иногда в ответ на некоторое событие должны быть вызваны несколько правил, а не одно. Теоретически, они могут быть вызваны в любом порядке, и это, как правило, не должно влиять на результат. Данное свойство АБД называют *конфлюентностью* (*confluence*). Если АБД не обеспечивает корректное выполнение группы порожденных правил, возникает проблема *неконфлюентности* (*non-confluence*). В таком случае поведение АБД становится непредсказуемым [8].

Одно событие может породить большую и более сложную цепочку действий, в которой могут оказаться операции, затрагивающие,

например, один и тот же информационный объект или кортеж, и только последняя из них действительно окажет эффект на базу данных. Поэтому в АБД для увеличения производительности желательно реализовать принцип *результатирующего эффекта* (*net-effect policy*), чтобы реально выполнялась только последняя из подобных операций.

В отличие от принципа результирующего эффекта, другие задачи, связанные с корректным и эффективным функционированием АБД, обычно решаются комплексно на основе общей стратегии планирования, которая включает в себя решение следующих вопросов:

- *выбор режима связывания*, который определяет, когда должно обрабатываться условие правила относительно события и действие относительно условия – сразу в той же транзакции, в конце той же транзакции или в отдельной транзакции;
- *использование системы приоритетов*, определяющей порядок обработки одновременно вызванных правил;
- *возможность параллельной обработки правил*, события которых совпадают;
- *поддержка группировки событий* в виде объединения однотипных событий в одно, чтобы для них можно было вызвать только один экземпляр правила [9].

Несколько событий могут группироваться в одно не только для повышения производительности, но и для возможности описания событий на более высоком уровне абстракции, не как стандартную операцию над БД, а как некоторое событие в предметной области. Это достигается за счёт сложных событий – простейших событий над БД, объединённых вместе с помощью логических и иных операторов. Средства описания сложных событий образуют алгебру событий, которая во многом определяет возможности языка правил [6].

Методы и средства анализа наличия коллизий в АБД

Методы решения рассмотренных выше проблем (коллизий) в АБД можно разделить на две группы: *статические* и *динамические*. *Статические методы анализа* применяются на этапе создания правил, а *динамические методы анализа* – при непосредственном реагировании АБД на возникающие события.

Самым простым статическим методом может стать *система ограничений на язык правил*. Если правила будут достаточно простыми, то их можно легко анализировать, заранее строя цепочки правил и оценивая их структуру. Например, событие, условие и действие должны состоять только из одной операции. Основной недостаток этого подхода – ограниченность возможностей языка активных правил –

можно обойти, если разделить внутреннее и внешнее представление правил. То есть сложному с точки зрения пользователя правилу ставится в соответствие система простых правил, удовлетворяющих необходимым для анализа ограничениям [8].

На метод обнаружения связей между правилами серьезно влияет модель представления правил. Самая известная модель правил – *граф срабатываний (triggering graph)* – ориентированный граф, узлами в котором являются правила, а ориентированная дуга от одного правила к другому означает, что действие первого правила вызывает событие второго [2]. Изначально в графе срабатываний не учитывается контекст событий. Поэтому в нём могут быть лишние связи или циклы, которые на самом деле предотвращаются параметрами условия некоторого правила.

Граф срабатываний можно расширить, снабдив дуги информацией о пределах возможных значений параметров и продублировав те узлы, правилам которых соответствуют события с различными пересекающимися параметрами. Тогда связи между правилами определяются более точно, и появляется информация об «опасных» значениях параметров событий, однако процесс их обнаружения может стать слишком длительным [4].

Приемлемых результатов можно добиться с помощью *проверки моделей (model checking)* – метода, позаимствованного из технологии проверки плат и иных устройств. Он заключается в построении и проверке конечного автомата, соответствующего системе активных правил. Его начальными состояниями служит конечное множество событий, которые теоретически могут произойти. Главным отличием от предыдущего подхода является то, что проверяются не интервалы значений, а конкретные значения параметров, выбранные по некоторому принципу в зависимости от типа данных [5].

Существуют модели, основанные на расширении реляционной алгебры математическим описанием правил и их составляющих, которое позволит применять синтаксический анализ при построении цепочек правил и определять допустимый контекст событий [6].

Описанные модели правил могут применяться и при динамическом анализе. Динамический анализ проще в том смысле, что обрабатываются не множества возможных значений контекста исходного события, а только одно, однако есть серьёзные ограничения на время выполнения алгоритмов.

Самый простой, и в то же время самый распространенный, способ решения проблемы заикливания заключается в ограничении глубины каскадно вызванных правил. Недостатки такого способа динами-

ческого анализа очевидны – с одной стороны, могут выполняться ошибочные действия над БД, а с другой стороны, есть строгое ограничение на сложность системы взаимодействующих правил, если она построена корректно. Улучшением описанного подхода является метод, при котором глубина каскадно вызванных правил определяется динамически для каждого события на основе дополнительного анализа [3].

Наиболее затратной по времени решения проблемой динамического анализа является обнаружение сложных событий. В этом случае требуется хранение большого количества информации о тех сложных событиях, которые произошли не полностью. Могут использоваться три подхода:

- *ведение истории событий*, которая представляет собой обычный лог простых событий;
- *построение специального графа* для каждого экземпляра сложного события, в котором произошло хотя бы одно начальное простое событие и который может быть дополнен, если сложное событие произойдёт полностью;
- *кэш (или очередь) событий*, в котором хранятся недавние сложные события, как произошедшие, так и происходящие.

Также применяется подход, позволяющий решать все проблемы организации взаимодействия правил в рамках одной транзакции. Динамические методы, описанные ранее, применялись после срабатывания всей цепочки правил. Если о правилах хранится достаточно информации, необходимые действия можно осуществить, изменяя транзакцию, в которой должно произойти первое правило, до запуска самой транзакции. Для этого хорошо подходят методы статистического анализа, если транзакция представляется как последовательность элементарных операций обработки данных, которые могут быть заменены более крупной операцией [6]. Для обнаружения сложных событий в этом случае удобно применять *немарковскую теорию действий*. Цепочка каскадно вызываемых правил может быть рассмотрена как немарковский процесс – процесс, следующее состояние которого зависит от всех предыдущих состояний. Но это налагает на расширенную реляционную алгебру дополнительные ограничения – события должны обрабатываться как *флюенты (предикаты ситуационного исчисления)*, то есть быть связаны с *ситуациями* – описаниями предыдущих событий.

Для обнаружения сложных событий, компоненты которых происходят в разных транзакциях, наиболее эффективным является *асинхронное параллельное обнаружение событий*. Каждое сложное собы-

тие представляется в виде дерева, листья которого являются простыми событиями, а остальные узлы – сложными событиями, причём корень – тем событием, которое необходимо обнаружить. При этом существует три основных стратегии:

- параллельным процессам соответствуют деревья;
- параллельным процессам соответствуют узлы;
- параллельным процессам соответствуют рёбра.

Эти стратегии также могут комбинироваться для более точного соответствия архитектуре АБД [1]. Однако в целом данный метод динамического анализа сложно сочетать с ранее рассмотренными методами.

Заключение

В ходе работы были выделены основные проблемы построения правил в АБД и методы их решения, которые подразделяются на *статические* и *динамические*. Для каждой рассмотренной проблемы предлагается как минимум один метод её решения. Предполагается, что рассмотренные в статье методы решения проблем корректности и эффективности правил могут быть использованы при построении общего решения. Однако это требует серьезных дополнительных исследований.

Список литературы

Parrallel Event Detection in Active Database Systems: TheHeart of the Matter / U. Jaeger, J. K. Obermaier // The ACM Digital Library, ARTDB '97 Proceedings of the Second International Workshop on Active, Real-Time, and Temporal Database Systems – London: Springer-Verlag, 1998. – P. 266 - 279.

Detecting Termination of Active Database Rules Using Symbolic Model Checking / I. Ray, I. Ray // The ACM Digital Library, ADBIS '01 Proceedings of the 5th East European Conference on Advances in Databases and Information Systems Systems – London: Springer-Verlag, 2001. – P. 159 - 175.

A Dynamic Approach to Termination Analysis for Active Database / J. Bailey, A. Poulouvasilis, P. Newson // The ACM Digital Library, CL '00 Proceedings of the First International Conference on Computational Logic. – London: Springer-Verlag, 2000. – P. 1106 - 1120.

Constraint-Based Termination Analysis for Cylic Active Database Rules / S. Debray, T. Hikey // The ACM Digital Library, CL '00 Proceedings of the First International Conference on Computational Logic. – London: Springer-Verlag, 2000. – P. 1121 – 1136.

Abstract Interpretation for Termination Analysis in Functional Active Databases / J. Bailey, A. Poulovassilis // The ACM Digital Library, Journal of Intelligent Information Systems - Special issue on functional approach to intelligent information systems. Volume 12 Issue 2-3. – Kluwer: Kluwer Academic Publishers Hingham, 1999. – P. 243 – 273.

An algebraic approach to static analysis of active database rules / E. Baralis, J. Widom // The ACM Digital Library, ACM Transactions on Database Systems (TODS), Volume 25 Issue 3. – New York: NY, 2000. – P. 269 – 332.

Couchot A. Termination analysis of active rules modular sets // The ACM Digital Library, CIKM '01 Proceedings of the tenth international conference on Information and knowledge management. – New York: NY, 2001. – P. 326 – 333.

On the decidability of the termination problem of active database systems / J. Bailey, G. Dong, K. Ramamohanarao // The ACM Digital Library, Theoretical Computer Science. Volume 311 Issue 1-3. – Essex: Elsevier Science Publishers Ltd., 2004. – P. 389 – 437.

Effective Scheduling of Detached Rules in Active Databases / S. Ceri, C. Gennaro, S. Parabosch, G. Serazzi // The ACM Digital Library, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. Volume 15 Issue 1. – Piscataway: IEEE Educational Activities Department, 2003. – P. 2 – 13.

Работа представлена д.т.н., профессором, заведующим кафедрой «Математическое обеспечение и применение ЭВМ» Пензенского государственного университета Макарычевым П.П.

Дата представления работы: 14.04.2011.

ИНТЕГРИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ АКТИВНЫХ ПРАВИЛ

С.В. Шибанов, А.А. Скоробогатько, Э.В. Лысенко

*ГОУ ВПО «Пензенский государственный университет»,
Россия, 440026, Пензенская обл., г. Пенза, ул. Красная, 40
cnit@pnzgu.ru*

В активных базах данных для представления активных правил в настоящее время используются базовая ECA-модель (Event-Condition-Action) и расширенная SECA-модель (State-Event-Condition-Action). В различных случаях удобнее применять ту или иную модель активных правил. В статье предлагается интегрированная модель активных правил, объединяющая ECA и SECA модели, и рекомендации по ее реали-

зации для реляционных и объектно-ориентированных систем управления активными базами данных.

INTEGRATED MODEL OF ACTIVE RULES

S.V. Shibanov, A.A. Skorobogato, E.V. Lysenko

Currently basic ECA-model (Event-Condition-Action) and enhanced SECA-model (State-Event-Condition-Action) are used for presentation of active rules in active databases. In different cases it is easier to use one or another model. In this article we propose an integrated model of active rules, which involves both ECA and SECA models, and recommendations on its implementation for relational and object-oriented active database management systems.

Актуальность работы и основные проблемы

Назовем базу данных активной (АБД), если система управления базой данных (СУБД) по отношению к ней выполняет не только явно указанные пользователем действия, но и дополнительные действия в соответствии с правилами, заложенными в саму БД. При этом система управления активной базой данных (СУАБД) постоянно отслеживает наступление определенных событий, реагируя на активность системы и пользователя, и отвечает на события путем вызова процедур, затрагивающих как саму базу данных, так и ее окружение.

Реакция СУАБД задается с помощью активных правил. Активные правила описывают события, наступление которых отслеживает СУАБД, и действия, выполняемые при наступлении этих событий. Существуют различные способы представления активных правил, или модели активных правил: ECA-модель и SECA-модель. От используемой модели активных правил во многом зависят возможности активной базы данных.

В статье рассматриваются основные виды моделей активных правил, предлагается интегрированная модель, объединяющая в себе активные правила разных типов и даются рекомендации по ее реализации для различных систем управления активными базами данных.

Цель работы

Целью работы является разработка интегрированной модели активных правил, позволяющей хранить и выполнять активные правила разных типов в одной АБД. При этом модель должна быть достаточно общей, чтобы допускать реализацию в различных целевых СУБД, поддерживающих реляционную и объектно-ориентированную модели данных.

Модели активных правил

Функционирование активной базы данных описывается множеством активных правил [1]. Активные правила определяют реакцию на события в базе данных. Существует две основных модели активных правил: ЕСА-модель и SECA-модель.

ЕСА-модель (Event-Condition-Action) – это базовая модель активных правил. Активные правила ЕСА-модели (ЕСА-правила) состоят из трех компонентов: события (event), произошедшего в базе данных; проверяемого условия (condition) и выполняемого действия (action). При возникновении события происходит проверка условия и, если условие истинно, выполняется действие.

SECA-модель (State-Event-Condition-Action) является расширением ЕСА-модели. Активные правила SECA-модели (SECA-правила) состоят из шести компонентов: события (event), активирующего правило; информационного объекта, с которым связано правило; начального и конечного состояний наблюдаемого информационного объекта (state); условия (condition), проверяемого при активации правила; действия (action), выполняемое при активации правила. При возникновении события, заданного в активном правиле проверяется состояние наблюдаемого информационного объекта. Если состояние наблюдаемого объекта не совпадает с начальным состоянием в правиле, то никаких действий не производится. В противном случае производится проверка условия и, в случае его истинности, выполнение действия. Затем наблюдаемый объект переводится в конечное состояние.

Интегрированная модель активных правил

Предлагаемая интегрированная модель объединяет в себе ЕСА и SECA модели активных правил и представляется в виде объектной модели. На рисунке изображена интегрированная модель активных правил в виде диаграммы классов UML.

Класс Object описывает информационные объекты активной базы данных. Каждый информационный объект характеризуется именем, уникальным в пределах АБД. В объектно-ориентированных базах данных (ООБД) информационные объекты реализуются в виде экземпляров классов, в реляционных базах данных (РБД) – в виде кортежей отношений (записей таблиц). Примеры информационных объектов: «Пользователь», «Заказ», «Платеж».

Класс State содержит информацию о возможных состояниях информационных объектов активной базы данных. Каждый информационный объект может находиться в одном из нескольких состояний. В каждый момент времени объект может находиться только в одном из своих возможных состояний. Имена состояний уникальны для каждого из информационных объектов. Для определения текущего со-

стояния служит метод `getCurrentState`. Примеры состояний: «Пользователь в сети», «Пользователь не в сети», «Пользователь заблокирован»

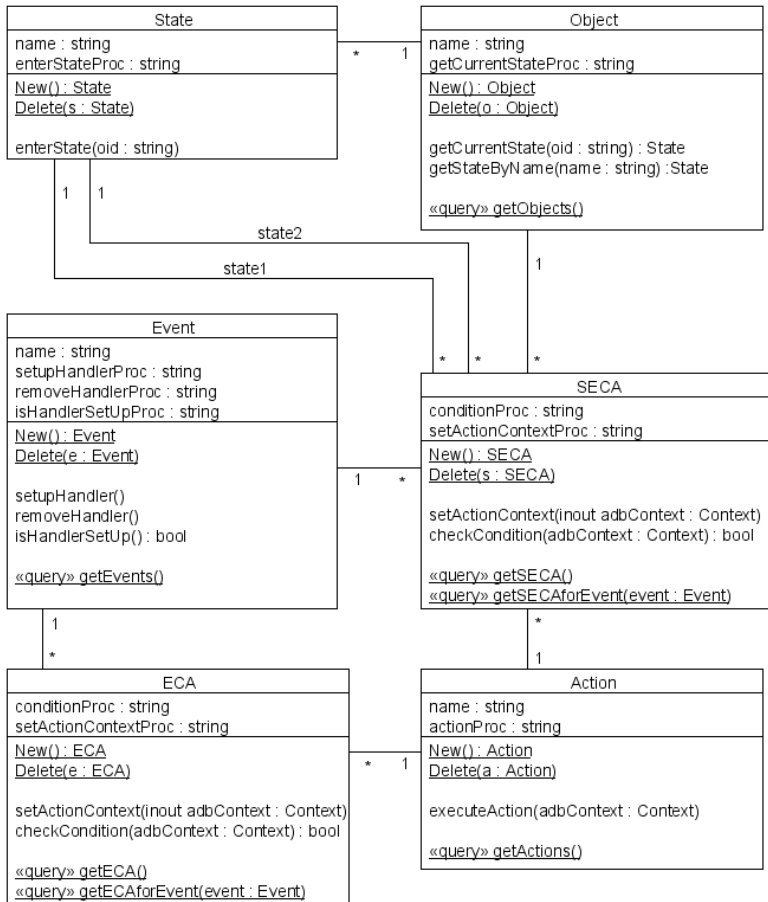


Рис. 1. Интегрированная модель активных правил

Класс `Event` используется для представления событий активной базы данных. Процедура обработки события инициируется обработчиком события. Обработчик события – это программный код, выполняемый СУБД при возникновении события. Вызов обработчика может выполняться из триггера, хранимой процедуры, клиентского приложения и т.п. Обработчик события формирует контекст события, обеспечивает поиск и выполнение активных правил, соответствующих собы-

тию. Контекст события – это информация о возникшем событии. Состав этой информации зависит от конкретного события. Контекст события может использоваться при проверке условия и выполнении действия. Класс Event содержит методы для установки и удаления обработчика события. Эти методы выполняют всю необходимую работу: создание/удаление триггера, добавление обертки к хранимой процедуре и т.п. Примеры событий: «Добавлен новый пользователь», «Оформлен заказ», «Проведен платеж».

Класс Action описывает действия активной базы данных, которые могут выполняться при возникновении экземпляров событий класса Event, и представляются в виде последовательности операций над информационными объектами АБД. При выполнении действия доступна информация, содержащаяся в базе данных, а также данные из контекста события. Последовательность операций, соответствующая тому или иному действию, в РБД реализуется в виде хранимой процедуры, а в ООБД – в виде метода класса. Имя хранимой процедуры или метода содержится в атрибуте actionProc. Вызовов осуществляется выполнением метода executeAction. Примеры действий: «Добавить нового пользователя», «Оформить заказ», «Провести платеж».

Объекты классов ECA и SECA содержат информацию об активных ECA или SECA правилах АБД.

Интегрированная модель активных правил объединяет ECA и SECA модели и может быть использована для построения реляционных и объектно-ориентированных систем управления активными базами данных.

Рекомендации по реализации интегрированной модели активных правил

По мере реализации интегрированной модели активных правил в процессе разработки СУАБД для целевых реляционных и объектно-ориентированных СУБД были разработаны следующие рекомендации.

Рекомендация 1. Реализация ссылок на информационные объекты. В предлагаемой модели используется передача в качестве параметра ссылки на объект (например, в методе Delete (o : Object)). В реляционных базах данных в качестве ссылки на объект выступает значение первичного ключа соответствующей строки в таблице. Если первичный ключ является составным, то части первичного ключа разделяются специальным символом. В качестве символа-разделителя может быть использован «||», по аналогии с СУБД Cache (например, «6||8» – первичный ключ, состоящий из значений «6» и «8»). В объектно-ориентированных базах данных в качестве ссылки на объект могут выступать ссылка на объект в оперативной памяти (OREF – Object

Reference) и идентификатор объекта на диске (OID – Object Identifier). В зависимости от ситуации бывает удобно использовать тот или иной вид идентификатора, поэтому стоит реализовать два варианта методов – с передачей аргументов по OREF и по OID.

Рекомендация 2. Реализация методов классов. В объектно-ориентированных базах данных методы классов интегрированной модели активных правил отображаются в методы классов ООБД. В реляционных базах данных методы классов интегрированной модели реализуются в виде хранимых процедур. Имена и параметры методов преобразуются в хранимую процедуру следующим образом: `Class::Method (param1, ..., paramN) → Class_Method (obj:Class,param1, ..., paramN)`. Например, `State::enterState (oid:string) → State_enterState (state:State, oid:string)`.

В качестве первого параметра хранимая процедура принимает ссылку на объект, метод которого вызывается. Далее следуют собственно параметры метода. Методы класса и запросы реализуются без преобразования.

Рекомендация 3. Реализация ассоциаций между информационными объектами. Существует несколько способов реализации ассоциаций между информационными объектами: в виде атрибута-ссылки на связанный объект, в виде атрибута-массива ссылок на связанные объекты и в виде отдельного класса-ассоциации (для связей «многие-ко-многим»). Для реляционных баз данных предпочтительным вариантом является реализация ассоциаций в виде внешнего ключа для ассоциаций «многие-к-одному» и в виде отдельной таблицы для ассоциаций «многие-ко-многим». Для объектно-ориентированных баз данных возможны варианты. Если ассоциация наиболее часто прослеживается в направлении от «многих» к «одному», то предпочтительно использование ссылки на связанный объект. Если ассоциация наиболее часто прослеживается в направлении от «одного» ко «многим» – массива ссылок на связанные объекты. Если ассоциация достаточно часто прослеживается в обоих направлениях, то ее следует реализовать в виде ссылки на связанный объект на одном полюсе ассоциации и массива ссылок на другом. Отношения «многие-ко-многим» реализуются с помощью отдельного класса-ассоциации.

Представленные рекомендации позволяют упорядочить разработку АБД и СУАБД на базе целевых реляционных и объектно-ориентированных СУБД.

Заключение

Интегрированная модель активных правил, а также рекомендации по ее реализации были использованы в ходе разработки СУАБД на

базе РСУБД Oracle 11g, MS SQL Server 2008 [2], ООСУБД Cache 2010.1 [3], а также постреляционной СУБД PostgreSQL 8.4.

Список литературы

1. Реализация абстрактной модели активных баз данных средствами современных СУБД / С.В. Шибанов, А.Б. Зудов, Э.В. Лысенко, П.В. Вишняков, А.А. Скоробогатко // Надежность и качество: труды международ. симпозиума, Т. I. – Пенза, Информ.-изд. центр Пенз. гос. ун-та, 2010. – С. 306-314.

2. Реализация технологий активных баз данных в среде Microsoft SQL Server 2008 / С.В. Шибанов, Э.В. Лысенко, П.В. Вишняков // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: материалы конференции / под ред. проф. В.П. Гергеля. – Н.Новгород: Изд-во Нижегородского гос.ун-та, 2010. – С. 55-57.

3. Анализ возможности построения активных баз данных на базе Cache / С.В. Шибанов, Э.В. Лысенко, А.А. Скоробогатко // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: материалы конференции / под ред. проф. В.П. Гергеля. – Н.Новгород: Изд-во Нижегородского гос.ун-та, 2010. – С. 267-269.

Работа представлена д.т.н., профессором, заведующим кафедрой «Математическое обеспечение и применение ЭВМ» Пензенского государственного университета Макарычевым П.П.

Дата представления работы: 18.03.2011.

АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМИ БАЗАМИ ДАННЫХ

С.В. Шибанов, А.А. Скоробогатко, Э.В. Лысенко

*ГОУ ВПО «Пензенский государственный университет»,
Россия, 440026, Пензенская обл., г. Пенза, ул. Красная, 40
cnit@pnzgu.ru*

Статья посвящена разработке обобщенной архитектуры программных средств управления активными базами данных и ее основных компонентов, таких как сервер активных баз данных, активный сервер приложений, активное клиентское приложение и служебные приложения.

ACTIVE DATABASES CONTROL SOFTWARE ARCHITECTURE

S.V. Shibanov, A.A. Skorobogatko, E.V. Lysenko

Article describes the development of active database control software architecture and its main components, such as active database server, active application server, active client application and service applications.

Актуальность работы и основные проблемы

Существует несколько типов архитектур систем управления активными базами данных (СУАБД): монолитная архитектура; архитектура в виде надстройки над целевой СУБД; архитектура на основе выделенных сервисов.

При использовании монолитной архитектуры активные механизмы встраиваются в ядро СУБД наряду с механизмами для хранения и обработки данных и являются неотъемлемой ее частью. Такой подход дает возможность наиболее полной и эффективной реализации механизмов активных баз данных (АБД), однако является сложным для применения из-за необходимости реализации «с нуля» всех не только активных, но и пассивных механизмов управления данными.

Архитектура СУАБД в виде надстройки предполагает использование «пассивной» СУБД в качестве основы, поверх которой реализуются механизмы активной базы данных. Для реализации функциональности АБД используются механизмы целевой СУБД: триггеры, хранимые процедуры и т.п. Преимуществом данной архитектуры является относительная простота реализации и возможность применения технологии АБД к уже существующим «пассивным» системам, построенным на базе используемой «пассивной» СУБД. Недостатком подхода является ограниченность функционала АБД возможностями целевой СУБД.

В архитектуре на основе выделенных сервисов активная функциональность выделяется в отдельное самостоятельное программное решение, выполняемое в виде совокупности сервисов (служб операционной системы). Данный подход позволяет использовать активную функциональность в системах, построенных без применения баз данных. Недостатком является меньшая по сравнению с предыдущими подходами эффективность, обусловленная необходимостью взаимодействия с целевой СУБД извне.

Для разработки архитектуры программных средств управления АБД была выбрана архитектура в виде надстройки над целевой СУБД, совмещающая в себе простоту реализации и эффективность. Ограниченность функционала АБД возможностями нижележащей СУБД не является серьезным недостатком вследствие того, что современные СУБД содержат достаточный для реализации АБД набор возможностей [1-3].

Цель работы

Целью работы является разработка архитектуры программных средств управления активными базами данных, которая должна поддерживать наиболее популярные современные типы архитектур информационных систем: двухуровневый и трехуровневый клиент-сервер. В связи с этим в предлагаемой архитектуре выделяются: сервер активных баз данных, активный сервер приложений и активное клиентское приложение.

Архитектура сервера активных баз данных

Центральным элементом программных средств управления АБД является сервер активных баз данных. Его архитектура изображена на рис. 1 в виде UML-диаграммы компонент.

Основными элементами архитектуры сервера АБД являются: СУБД, база шаблонов, база активных метаданных, активная база данных, пассивная база данных, сервис событий и среда исполнения активного пакета.

Сервер АБД строится на базе существующей системы управления базами данных. СУБД осуществляет управление активными и пассивными базами данных, а также активными метаданными и шаблонами. Для реализации активного поведения в АБД используются механизмы, предоставляемые СУБД (например, триггеры и хранимые процедуры в реляционных СУБД, методы и функции обратного вызова в объектно-ориентированных СУБД), а сама активная компонента выполняется в виде надстройки над существующей пассивной базой данных. СУБД является центральной частью сервера АБД, от ее возможностей во многом зависят возможности всего сервера АБД.

База шаблонов — база данных, содержащая шаблоны для автоматизации построения активных баз данных. В реляционных СУБД это шаблоны триггеров и хранимых процедур, в объектно-ориентированных — шаблоны методов и функций обратного вызова.

База активных метаданных содержит служебную информацию сервера АБД: настройки сервера, список активных баз данных на сервере, список подключений активных клиентов и т.п. В зависимости от конфигурации сервера, база активных метаданных может также являться централизованным хранилищем активных правил сервера.

Активная база данных — это база данных, содержащая помимо собственно данных предметной области список активных правил. Активные правила описывают ситуации, возникающие в базе данных, и требуемую реакцию СУБД на эти ситуации. Функционирование активных правил обеспечивается механизмами СУБД.

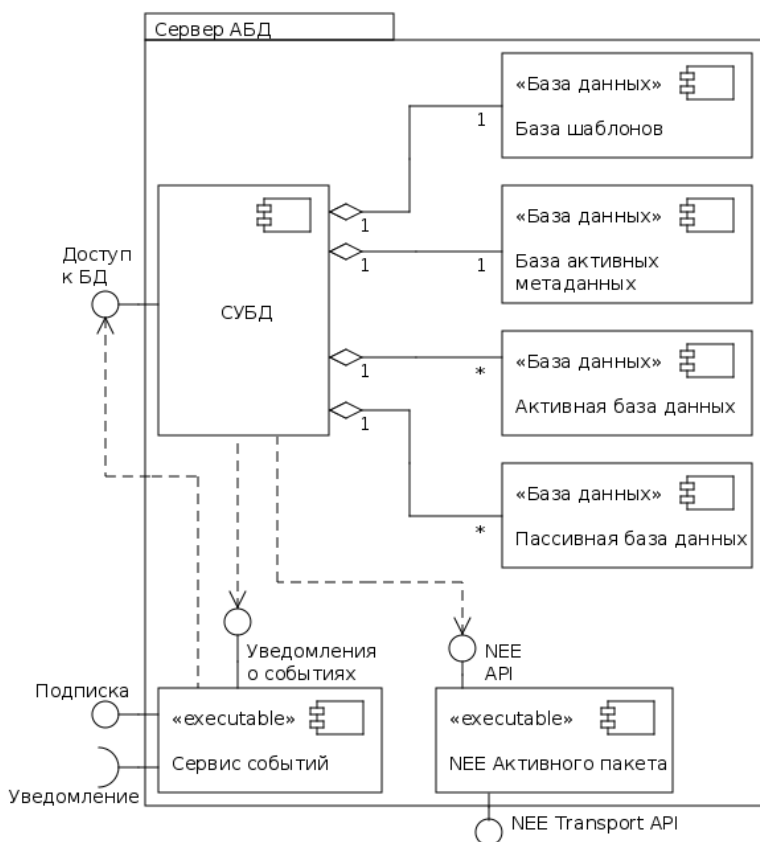


Рис. 1. Архитектура сервера активных баз данных

Пассивная база данных – обычная база данных, к которой выполняются запросы на выборку и модификацию данных.

Сервис событий – специализированная служба для доставки клиентским приложениям активной системы информации о возникающих событиях. Сервис предоставляет возможность подписки на события АБД и рассылает клиентам уведомления о возникших событиях. Среда исполнения активного пакета (Node Execution Environment, NEE) отвечает за распространение активного пакета по сети передачи данных и за выполнение инструкций активного пакета. Активный пакет является дополнительным средством распространения активности в системе. С его помощью можно передать клиентскому

приложению не только информацию о возникшем событии, но и набор инструкций, которые нужно выполнить при возникновении события.

Сервер АБД предоставляет интерфейсы для доступа к данным, подписки на события и получения уведомлений, а также имеет возможность принимать и обрабатывать активные пакеты.

Архитектура активного сервера приложений

Программные средства управления АБД могут разворачиваться как в двухуровневой архитектуре клиент-сервер, так и в трехуровневой архитектуре клиент-сервер с использованием сервера приложений.

Если в информационной системе используется сервер приложений, то на нем может быть развернут дополнительный набор компонентов для взаимодействия с сервером АБД (рис. 2). Назовем такой сервер приложений «активным сервером приложений». Основными компонентами активного сервера приложений являются: библиотека конфигурации АБД, библиотека анализа АБД, интерфейс прикладного программирования (API) клиента АБД, система драйверов АБД для взаимодействия с целевыми СУБД (Oracle, SQL Server, PostgreSQL, Cache'), среда исполнения активного пакета.

Библиотека конфигурации АБД – библиотека, реализующая API для конфигурации и настройки сервера АБД, в том числе создания активных баз данных, активных правил и т.п. Библиотека анализа АБД предоставляет приложениям необходимую статистическую информацию о работе отдельных АБД и всей системы в целом.

API клиента АБД – библиотека активного клиента, реализующая подписку на события и получение уведомлений от сервера АБД, а также взаимодействие с НЭЕ активного пакета. Система драйверов включает драйвер для взаимодействия с сервером АБД, предоставляющий базовые операции для работы с сервером АБД, и драйверы для различных целевых СУБД. Среда исполнения активного пакета позволяет активному пакету выполнять размещенные на сервере процедуры. Кроме того, возможна отправка активных пакетов на другие узлы системы.

Клиентские приложения

Если система построена в двухуровневой архитектуре клиент-сервер и в ней не используется сервер приложений, то перечисленные выше библиотеки реализуются на стороне клиентского приложения.

Активный клиент взаимодействует с активным сервером приложений (в трехуровневой архитектуре) или с сервером АБД (в двухуровневой архитектуре). Он может получать уведомления о происхо-

[illegible]

Приложение конфигурирования активных баз данных (ADB Master) предназначено для управления активными базами данных на сервере АБД, просмотра, создания и редактирования активных правил.

Приложение для сбора статистики и анализа работы АБД (ADB Analyzer) получает от сервера АБД статистические данные о выполнении активных правил, анализирует их и предлагает рекомендации по оптимизации работы анализируемой АБД.

В ходе работы была разработана архитектура программных средств управления активными базами данных. Данная архитектура была использована при разработке программных средств управления АБД на базе РСУБД Oracle 11g, MS SQL Server 2008, ООСУБД Cache 2010.1, постреляционной СУБД PostgreSQL 8.4, а также клиентских приложений разработки, конфигурации и анализа АБД.

Список литературы

1. Применение методологии активных баз данных в Oracle Database 11g / С.В. Шибанов, А.Б. Зудов, Э.В. Лысенко // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: материалы конференции / под ред. проф. В.П. Гergеля. – Н.Новгород: Изд-во Нижегородского гос.ун-та, 2010. – С. 270-272.

2. Анализ возможности построения активных баз данных на базе Cache / С.В. Шибанов, Э.В. Лысенко, А.А. Скоробогатько // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: материалы конференции / под ред. проф. В.П. Гergеля. – Н.Новгород: Изд-во Нижегородского гос.ун-та, 2010. – С. 267-269.

3. Реализация технологий активных баз данных в среде Microsoft SQL Server 2008 / С.В. Шибанов, Э.В. Лысенко, П.В. Вишняков // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: материалы конференции / под ред. проф. В.П. Гergеля. – Н.Новгород: Изд-во Нижегородского гос.ун-та, 2010. – С. 55-57.

Работа представлена д.т.н., профессором, заведующим кафедрой «Математическое обеспечение и применение ЭВМ» Пензенского государственного университета Макарычевым П.П.

Дата представления работы: 1.04.2011.

ТЕСТИРОВАНИЕ СЕРВЕРНЫХ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМИ БАЗАМИ ДАННЫХ

С. В. Шибанов, П.В. Вишняков

*ГОУ ВПО «Пензенский государственный университет»,
Россия, 440026, Пензенская обл. г. Пенза, ул. Красная, 40
cnit@pnzgu.ru*

Разработка программных средств – сложный и многоэтапный процесс, требующий тщательного и многогранного тестирования. Для программных средств управления активными базами данных, реализованных в виде надстройки над универсальными СУБД, процесс тестирования особенно важен в связи с архитектурной сложностью, многоплатформенностью и многокомпонентностью программных средств. В статье рассматриваются различные подходы к тестированию, предлагается методика тестирования для контроля промежуточных результатов разработки и оценки производительности серверных программных средств управления активными базами данных.

SERVER ACTIVE DATABASE MANAGEMENT SOFTWARE TESTING

S. V. Shibanov, P. V. Vishnyakov

Software development is as complex and multistage process, requiring thorough and many-sided testing. Due to architectural complexity and being multiplatform and multicomponent, testing is of great importance to the active database software snapping in to universal DBMS. The article deals with different testing approaches; suggests testing methods for controlling intermediate development results and evaluating performance of the server active database management software.

Актуальность работы и основные проблемы

База данных является активной (АБД), если система управления базой данных (СУБД) по отношению к ней выполняет не только явно указанные пользователем действия, но и дополнительные действия в соответствии с правилами, заложенными в саму базу данных (БД). Кроме того, система управления активными базами данных (СУАБД) отслеживает возникновение событий, описанных в АБД, и осуществляет их обработку посредством запуска процедур, затрагивающих как саму АБД, так и ее окружение.

Реализация АБД возможна различными способами. В разрабатываемом проекте средства управления АБД представляют собой модульную надстройку над традиционными, пассивными СУБД. В настоящее время реализованы серверные программные средства управления АБД для СУБД Microsoft SQL Server, Oracle, Cache и PostgreSQL. Выбранное архитектурное решение, с одной стороны, позволяет добиться значительной гибкости и совместимости с наибольшим числом СУБД, а с другой стороны – требует разработки особой методики тестирования.

Цель работы

Цель данной работы – разработка методики тестирования серверных программных средств управления активными базами данных, которая позволит не только контролировать промежуточные результаты разработки, но и оценивать производительность. Полученные оценки в дальнейшем могут быть использованы в средствах мониторинга программных средств управления АБД.

Задачи тестирования серверных программных средств управления активными базами данных

С помощью тестирования могут быть решены следующие задачи:

- проверка корректности ведения активных правил и их элементов – событий, условий, действий, объектов и их состояний;
- проверка корректности функционирования активных правил – т.е. проверка функциональности разрабатываемого программного обеспечения;
- оценка производительности в процессе выполнения активных правил.
- оценка производительности позволит не только выявить потенциально узкие места в подсистеме активных правил, но и сравнить производительность базы данных с установленными активными правилами с производительностью «пассивной» базы данных.

Выбор стратегии тестирования

Стратегия тестирования определяет типы тестов, которые нужно выполнять для данного функционала системы, а также включает описание подходов, необходимых с точки зрения целей тестирования, и требования к инструментам и инфраструктуре.

Модульное тестирование, или юнит-тестирование, – основной компонент такой методологии разработки программных средств через тестирование (Test-Driven Development, TDD). Данный подход предполагает приоритет тестов над кодом самого проекта, т.к. тесты пишутся до появления кода, который должен их проходить. Соответственно любой добавляемый код должен проходить все тесты, предназначенные для него.

Подобная методология позволяет достичь нескольких целей:

- Экономия времени при окончательной сборке программных средств, если все компоненты предварительно прошли модульные тесты.
- Упрощение кода приложений, т.к. тесты четко определяют, какие ситуации обрабатываются, а какие – нет.
- Увеличение гибкости, модульности и расширяемости кода приложений, что объясняется рассмотрением приложения как совокупности модулей, для каждого из которых существует определенный набор тестов.

Применение модульного тестирования в процессе разработки программных средств управления АБД позволяет системе «расти постепенно», т.к. для поддержки новой СУБД необходимо разработать и протестировать только серверные программные средства управления АБД в рамках этой СУБД. Аналогично осуществляется расширение функциональности существующих серверных программных средств –

при добавлении новых модулей необходимо тестирование только этих модулей.

Несмотря на то, что модульное тестирование обычно используется при разработке приложений, как один из вариантов функционального тестирования, его можно применить для тестирования бизнес-логики, реализованной в виде активных правил в АБД. В этом случае необходимо учесть один важный момент – в базе данных в момент тестирования может содержаться какая-либо информация, поэтому проводимые тесты не должны влиять на нее. Для решения данной проблемы можно воспользоваться механизмом управления транзакциями: перед каждым тестом транзакция явно начинается, а в конце каждого теста – явно откатывается. Однако у этого способа есть существенный недостаток – невозможность протоколирования результатов средствами базовой СУБД, т.к. результаты протоколирования будут потеряны при откате транзакций. В этом случае протоколирование должно быть возложено на тестовую среду, например, на инструмент DatabaseTest-Service в среде Visual Studio.

Для каждого теста в режиме модульного тестирования программных средств управления активными базами данных должны быть реализованы следующие действия:

- инициализация среды: каждый класс тестов загружает данные и устанавливает параметры, необходимые для выполнения;
- инициализация теста: дополнительная настройка перед каждым тестом в классе;
- выполнение теста: собственно выполнение теста и его протоколирование;
- очистка: восстановление базы данных до состояния на момент «до начала текущего теста»;
- восстановление среды: восстановление базы данных до состояния на момент «до запуска текущего класса тестов».

Применение модульного тестирования в процессе разработки программных средств управления АБД обусловлено особенностями реализации программных средств. Серверная часть программных средств управления АБД реализуется в двух вариантов – типовая реализация для выбранной модели данных и «оптимизированная» с учетом особенностей каждой конкретной СУБД. Модульное тестирование позволяет проводить тестирование этих компонентов независимо друг от друга, снижая тем самым количество ошибок.

Нагрузочное тестирование или тестирование производительности, – это автоматизированное тестирование, имитирующее работу определенного количества бизнес-пользователей. В качестве примера

можно привести работу современного банка, в котором все сотрудники работают с одними и теми же программными приложениями, установленными на соответствующих серверах, либо использование приложения интернет-магазина, когда пользователи интернета нагружают сервера данных.

Выразив интенсивность выполнения операции через интервал времени между итерациями, увидим, что рост интенсивности, т.е. частоты выполнения операций в единицу времени, соответствует сокращению интервала времени. Рост нагрузки пропорционален росту интенсивности. Естественно также, что при увеличении интенсивности растет производительность. При этом увеличивается степень использования (загруженности) ресурсов. С какого-то момента рост производительности прекращается, в свою очередь, нагрузка на систему может продолжать расти. В этот момент может произойти насыщение и затем деградация системы. В дополнение можно заметить, что при нагрузочном тестировании изменение интенсивности операций может подчиняться какому-либо закону, например Пуассона, либо быть равномерным в течение всего теста.

Разработка модели нагрузочного тестирования

Разрабатываемая модель включает три основных компонента: список тестируемых операций – профиль нагрузки; интенсивность их выполнения; зависимость изменения интенсивности выполнения операций от времени.

Если в профиле нагрузки – наборе операций с заданными интенсивностями, полученном на основе сбора статистических данных, либо определенном путем анализа требований к тестовой системе, присутствует несколько видов операций, то должно быть определено несколько групп пользователей. Желательно моделировать каждую операцию отдельной группой виртуальных пользователей. В реальности часто бывает наоборот, один бизнес пользователь может отвечать за выполнение нескольких операций. Тем не менее, если назначить одному виртуальному пользователю выполнение одной операции, то в процессе тестирования будет легче выдержать определенную интенсивность и соответственно производительность для этой операции, чем в случае, когда виртуальному пользователю назначается последовательная цепочка операций. Зная интенсивность выполнения операции, нужно определить количество виртуальных пользователей в группе, выполняющих эту операцию.

Для тестирования программных средств управления АБД была выбрана предметная область «Склад», для которой выделены следующие приложения:

- основная функция приложения клиентов – работа с заказами, т.е. создание, изменение и удаление заказов;
- основная функция приложения менеджера по работе с клиентами – добавление новых клиентов, изменение существующих и удаление неактуальных;
- на приложение менеджера артикулов возложено добавление, изменение и удаление артикулов, а также добавление, изменение или удаление складов.

Определим нагрузочные показатели для каждого из типов приложений. Для приложения клиентов возьмем за основу следующие параметры: число пользователей – 20, число операций – 200 за 4 часа. Таким образом, каждый пользователь данного приложения выполняет 10 операций за 4 часа или 2,5 операции в час, что эквивалентно 1 операции в 24 минуты – это интенсивность выполнения. Для уменьшения времени выполнения теста, необходимо увеличив интенсивность и уменьшить число пользователей в соответственное число раз. Например, при уменьшении времени до получаса (в 8 раз), интенсивность также увеличится в 8 раз и составит 3 минуты на операцию, а число пользователей уменьшится.

Вычислим нагрузочные показатели приложения менеджера по работе с клиентами. Промоделируем работу данной категории пользователей следующими показателями: число пользователей – 5, число операций – 10 за 4 часа. Таким образом, каждый пользователь приложения менеджера по работе с клиентами выполняет 2 операции за 4 часа или 0,5 операции в час, что эквивалентно 1 операции в 120 минуты – это интенсивность. Для уменьшения времени выполнения теста, необходимо увеличить интенсивность и уменьшить число пользователей в соответственное число раз. Например, при уменьшении времени до получаса (в 8 раз), интенсивность также увеличится в 8 раз и составит 15 минут на операцию, а число пользователей уменьшится.

Для приложения менеджера артикулов зададим следующие показатели: число пользователей – 1, число операций – 5 за 4 часа. Таким образом, каждый пользователь приложения менеджера артикулов выполняет 5 операций за 4 часа или 1,25 операции в час, что эквивалентно 1 операции в 48 минуты – это интенсивность. Для уменьшения времени выполнения теста, необходимо увеличить интенсивность и уменьшить число пользователей в соответственное число раз. Например, при уменьшении времени до получаса (в 8 раз), интенсивность также увеличится в 8 раз и составит 6 минуты на операцию, а число пользователей уменьшится. Представим соотношение числа пользова-

телей в группах (и их начальное количество) в виде пропорции: 20:5:1. Эти значения станут базовыми для нагрузочного тестирования.

Сочетание нагрузочного и модульного тестирования

Технически ничто не препятствует сочетанию нагрузочного и модульного тестирования. Так, во время выполнения каждого теста можно дополнительно собирать показатели производительности базы данных и СУБД, как с помощью средств ядра СУБД, так и с помощью внешних средств. Кроме того, можно собирать обобщенные показатели производительности, характеризующие выполнение классов тестов. Однако на деле данный подход неприменим, т.к. разработка на основе тестирования предполагает, что первоначально написанный код должен проходить тест наименее эффективным способом, что будет заметно при оценке производительности. Поэтому тестирование удобнее выполнять в несколько этапов. Сначала будет выполняться модульное тестирование, позволяющее убедиться в том, что система функционирует верно, а затем – нагрузочное тестирование, позволяющее оценить эффективность решения. При этом для нагрузочного тестирования также следует применять подход с явными транзакциями, описанный выше.

Сбор статистики выполнения правил

Сбор статистики служит нескольким целям: он позволяет осуществить тестирование не только на предмет корректности работы правил, но и на предмет их производительности; собранная статистика в дальнейшем может быть использована при тестировании реализации правил на основе механизмов, являющихся специфичным для каждой СУБД, а также при дальнейшей оптимизации существующей реализации. Сбор статистики может быть осуществлен несколькими способами:

- информацию о производительности можно собирать средствами самой СУБД – методом «белого ящика», что позволит получить максимально подробную информацию о выполнении единиц тестирования – запросов, входящих в состав активных компонентов;
- данные о производительности можно собирать с помощью разрабатываемой системы – методом «черного ящика», в отличие от предыдущего подхода, данный подход не позволяет отслеживать каждый запрос, т.к. подход является более абстрактным, и в качестве единицы тестирования выступает правило.

Наилучшего результата можно достичь, сочетая подходы к сбору статистики следующим образом. Статистика, собранная в результате тестирования средствами разрабатываемой системы, в сравнении со

статистикой, собранной на такой же базе данных, но без активных правил, позволяет сравнить производительность активной и пассивной систем. При этом ожидается, что различие в производительности будет незначительным, т.к. единственный компонент, присутствующий в АБД и отсутствующий в пассивной БД и влияющий на производительность, – собственно выборка правил. Таким образом, от эффективности данной операции во многом будет зависеть производительность АБД. Эффективность непосредственно бизнес-логики как пассивной, так и активной БД может быть оценена с помощью показателей, полученных непосредственно от ядра СУБД. Эта информация позволит выявить наиболее ресурсоемкие операции для их последующей оптимизации.

Заключение

В статье были рассмотрены различные подходы к тестированию серверного программного обеспечения управления активными базами данных, реализованных в виде надстройки над универсальными СУБД. В силу архитектурной сложности, многоплатформенности и многокомпонентности процесс тестирования особенно важен для указанных программных средств. Авторами предлагается методика тестирования для контроля промежуточных результатов разработки и оценки производительности серверных программных средств управления активными базами данных.

Список литературы

1. Реализация технологий активных баз данных в среде Microsoft SQL Server 2008 / С.В. Шибанов, Э.В. Лысенко, П.В. Вишняков // Технологии Microsoft в теории и практике программирования: материалы конференции / под ред. проф. В.П. Гергеля. – Н.Новгород: Изд-во Нижегородского гос.ун-та, 2010. – С. 55-57.

2. Лафлин Д. Модульное тестирование: применение разработки через тестирование к проектам баз данных / MSDN Magazine, Visual Studio 2008 Launch Issue, 2008 (<http://msdn.microsoft.com/ru-ru/magazine/cc184840.aspx>).

Работа представлена д.т.н., профессором, заведующим кафедрой «Математическое обеспечение и применение ЭВМ» Пензенского государственного университета Макарычевым П.П.

Дата представления работы: 1.04.2011.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАГИНОВ В АКТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

А.С. Илюшкин, А.А. Мезенков, С.В. Шибанов, А.С. Павлов

ГОУ ВПО «Пензенский государственный университет»

*Россия, 440026, Пензенская обл., г. Пенза, ул. Красная, д. 40,
cnit@pnzgu.ru*

В распределённых информационных системах (РИС) возникает проблема тиражирования, синхронизации и динамического перераспределения не только данных, но и бизнес-логики приложений. В статье предлагается использовать технологию плагинов для построения гибкой архитектуры РИС в виде активной системы.

APPLICATION OF TECHNOLOGY OF PLUG-IN IN ACTIVE INFORMATION SYSTEMS

A.S. Ilushkin, A.A.Mezenkov, S.V.. Shibanov, A.S. Pavlov

In distributed information systems (DIS) is appeared a problem of replication, synchronization and dynamic redistribution not only for data but also for the business logic of applications. In the paper is proposed to use a plugin technology to construct a flexible architecture of DIS in the form of an active system.

Актуальность работы и основные проблемы

Активной распределенной информационной системой (АРИС) будем называть систему, построенную на принципах активного взаимодействия. Под активным взаимодействием подразумевается возможность подсистем, компонент и отдельных элементов РИС генерировать и получать события от других частей системы. Стоит отметить, что использование событийного управления в технических и информационных системах не ново и в своё время получило достаточно широкое распространение в области активных баз данных (АБД). Основным достоинством АБД является возможность в автоматическом режиме выполнять действия, явно не указанные конечным пользователем. В современных СУБД наиболее ярким примером подобного функционала являются триггеры.

Среди существующих решений в области интеграции крупных распределённых информационных систем отсутствуют комплексные подходы, совмещающие в себе достоинства как активного, так и традиционного пассивного (запросного) видов взаимодействия. Предлагается выполнить расширение зоны активности с уровня АБД на остальные уровни распределённой информационной системы.

Предлагаемый авторами способ построения РИС позволяет унифицировать средства обеспечения активного взаимодействия, доступные со стороны клиентских приложений, промежуточных серверов и серверов баз данных. Для предоставления возможности быстрого перемещения реагирующих на события компонентов сложной распределённой системы между узлами, в качестве её основы планируется использовать единую концепцию взаимозаменяемых элементов. Для этого все части системы, будь то конечные или промежуточные серверы, GUI-клиенты и службы, используют в качестве своей базы программный каркас (платформу) как ядро и расширяемый набор плагинов как оболочку. Использование единообразного интерфейса позволяет перемещать их между компонентами системы, в том числе и во время работы.

Применение модульной архитектуры при конструировании приложений нашло достаточно широкое применение, но, тем не менее, вариантов реализации систем, использующих плагины для автоматического распространения компонентов между узлами не так уж много. Наиболее известными являются модули автоматического получения обновлений, применяемые в популярных браузерах, например в Mozilla Firefox, или в программах быстрого обмена сообщениями, например в Miranda IM. Так же сюда можно отнести используемые в linux-дистрибутивах системы управления пакетами, такие как APT [4], RPM, или средства, аналогичные *setuptools* для языка Python. Однако хотя существующие решения и позволяют разворачивать обновления компонентов на конечных узлах, они не предоставляют возможность двустороннего взаимодействия с источником обновлений средствами одних и тех же технологических приёмов. Поэтому основной задачей является выделение преимуществ имеющихся подходов к модульной организации программных узлов и совмещение их с активной компонентой для решения проблем, связанных с тиражированием и синхронизацией контента, поддержкой версииности, а также передачей сообщений пользовательского интерфейса. Помимо этого, существует ряд задач по обеспечению взаимозаменяемости узлов, упрощению написания модулей расширения и автоматических тестов.

Программная платформа (каркас приложений) и расширяемый набор программных модулей (плагинов)

Программная платформа (каркас приложений) является самостоятельным программным компонентом и, в самом простом случае, может запускаться при полном отсутствии внешних модулей, но при этом, вполне вероятно, не будет содержать никакой функциональной нагрузки, полезной для конечного пользователя. Его отличительной

чертой является наличие средств регистрации, инициализации и динамической загрузки плагинов в форме API. По умолчанию каркас приложений не имеет пользовательского интерфейса и работает в фоновом режиме. Все изменения поведения каркаса приложения выполняются при помощи подключаемых модулей (плагинов), позволяющих переводить его, например, в режим службы, веб- или оконного приложения. Для указания списка загружаемых плагинов используется глобальный xml-файл конфигурации. При этом имя исполняемого файла каркаса приложений и имя его файла конфигурации может быть произвольным.

Стоит особо подчеркнуть, что каркас приложения разрабатывается таким образом, чтобы минимизировать возможность возникновения потребности в его обновлении на конечных точках системы после выполнения процедуры развёртывания. Распространение новой функциональности и исправление ошибок и неточностей в существующих алгоритмах должно производиться исключительно при помощи обмена подключаемыми модулями. В связи с этим нет необходимости внедрять поддержку версионности непосредственно в код каркаса приложений на этапе прототипирования.

Каждый плагин обязан содержать не более одного класса, унаследованного от базового абстрактного класса *Plugin*, реализующего основную функциональность для всех плагинов. Стандартный набор средств, предоставляемых базовым классом, включает в себя поддержку версионности, методы для инициализации и регистрации плагина в каркасе, а также API для опосредованного взаимодействия с другими плагинами через отправку сообщений. Кроме того, допускается наследование одними классами плагинов от других для обеспечения возможности расширения функциональности и использования всех преимуществ ООП. При инициализации подключаемых модулей предлагается использовать персональные xml-файлы конфигурации.

Построение активной распределенной информационной системы

В рамках проводимых исследований по созданию распределенной информационной системы, построенной на принципах активного взаимодействия, предлагается использовать данный подход для генерации, обработки и передачи соответствующих событий в различных компонентах РИС. Для этого разработаны правила унификации именования плагинов и файлов конфигурации в рамках всей системы.

Для прототипирования системы выбрана платформа Microsoft .NET, поэтому на плагины и файлы конфигурации накладываются дополнительные ограничения:

1) каждый плагин представляет собой библиотеку динамической компоновки (сборку), которая содержит в себе соответствующий IL-код и имеет расширение *.dll;

2) файлы конфигурации представляют собой текстовые xml-файлы в кодировке UTF-8, имеют расширение *.xml;

3) основу имени каждого плагина и файла конфигурации составляет глобально-уникальный идентификатор (GUID), в общем случае имя имеет следующий формат:

XXXXXXXX-XXXX-XXXX-XXXX-XXXXXXXXXXXXX.{ dll | xml }.

Каждый символ «X» в данном шаблоне имени представляет собой некое число в шестнадцатеричной системе счисления. Каждая новая версия одного и того же плагина снабжается уникальным GUID, поэтому в создаваемом прототипе системы не предполагается наличие привычных числовых номеров версий в формате четырёх десятичных чисел, разделённых точкой. Может показаться, что подобная система именования не очень удобна. Однако основным её преимуществом является возможность обеспечения уникальности имён плагинов, особенно это актуально при автоматическом формировании плагинов, когда информационная система достигает крупных масштабов. Кроме того, появляется возможность избавиться от хранения полного пути к файлам плагинов в файле конфигурации каркаса.

Использование дерева каталогов для хранения плагинов позволяет находить каждый плагин только по его имени. Путь при этом формируется через компоновку имён каталогов. Например, имя plugin.dll будет разложено в следующий путь: ./p/l/u/g/i/n.dll. Тем самым система отображения имён плагинов на репозиторий сможет определить путь к файлу исключительно по его имени.

Файл конфигурации каждого плагина содержит информацию о событиях, которые данный модуль может обрабатывать. Такой подход необходим из-за того, что идентификаторы событий в рамках системы могут меняться без изменения логики их обработки и поэтому не должны быть жёстко запрограммированы в код подключаемых модулей. При этом выделим два класса событий: *зависимые* и *независимые*.

При запуске каркаса приложений им выполняется чтение собственного файла конфигурации для получения списка GUID подключаемых модулей первого уровня. Затем производится последовательная загрузка плагинов в порядке следования их в файле конфигурации. Стоит отметить, что плагины, использующие для своей работы другие плагины в качестве основы при наследовании, загружают их автоматически через *зависимости (references)* средствами .NET Framework, путём стандартного алгоритма разрешения ссылок на сборки. Если

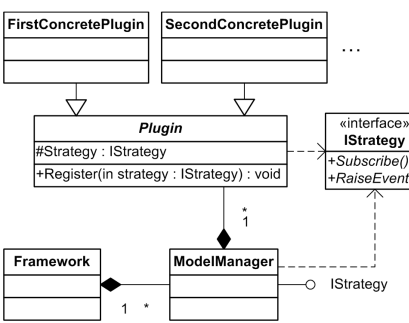
зависимый плагин расположен в древовидном хранилище, а не в каталоге с текущей загружаемой сборкой или глобальном кеше сборок, то работу по его поиску берёт на себя каркас приложения.

Так как все классы, реализующие плагины, унаследованы от одного предка, то анализируя, является ли класс внутри текущей библиотеки наследником *Plugin*, каркас определяет принадлежность сборки к множеству плагинов. Если библиотека содержит несколько классов-наследников базового для всех плагинов класса, то выбирается первый из списка имён классов, отсортированного в лексикографическом порядке. Желательно, чтобы имя класса-плагина имело постфикс *Plugin*, например:

```
public class AutomatedUpdatesPlugin : Plugin { ... }.
```

Прямое взаимодействие между плагинами не допускается, хотя и возможно благодаря архитектуре .NET. Поэтому возникает необходимость создания средств, запрещающих разработчикам выполнять вызовы методов плагина при отсутствии экземпляра класса, присущего только каркасу приложений. Для этого в метод регистрации передаётся

экземпляр класса, содержащий в себе набор методов API каркаса приложений. Интерфейс *IStrategy*, реализуемый классом *ModelManager* (см. рисунок), назовём его стратегией взаимодействия с каркасом приложений. Этот класс является общедоступным для всех плагинов и используется для регистрации плагина,



UML-диаграмма классов реализации плагинов

подписки на события, отправки событий, благодаря которым и осуществляется взаимодействие плагина с внешним миром. Таким образом, вызов методов одного плагина из другого становится нецелесообразным, так как работоспособность плагина гарантируется только в случае наличия у него экземпляра стратегии для взаимодействия с каркасом приложений. Каркас приложений, используя методы общего для всех плагинов родительского класса, приводит полученный из модуля объект к базовому типу *Plugin* и выполняет обязательный вызов метода регистрации плагина. Каркас приложений должен обеспечивать принцип, позволяющий передавать плагинам только те события, которые им действительно нужны. Это возможно благодаря проведению

событийных связей через всю систему, показывающих, какие действия присущи конкретному её элементу. Так как при вызове метода регистрации плагина каркас передаёт экземпляр стратегии в качестве параметра метода, именно его плагин вначале и использует для подписки на зависимые события. Зависимые события — это класс событий, без реакции на которые функционал плагина не получит соответствующих управляющих воздействий и не будет активирован. Подписывание же на независимые события происходит по мере надобности. При вызове метода подписки на событие каркас приложений осуществляет регистрацию, выполняя логическое связывание идентификатора плагина с идентификатором события во внутренней таблице связей. Задачей каркаса приложений в дальнейшем остаётся маршрутизация проходящих извне активных сообщений соответствующим подключаемым модулям.

Заключение

Применение модульной архитектуры при разработке активных распределённых информационных систем позволяет значительно повысить гибкость создаваемых программных продуктов, одновременно разделить на уровне архитектуры реализации отдельных алгоритмов бизнес-логики. Это дополнительно структурирует процесс разработки, упрощает создание автоматических тестов, позволяет перемещать бизнес-логику приложения между компонентами РИС во время работы. Предлагаемый подход особенно важен применительно к классу активных систем, в которых динамическое изменение реакций на события позволяет строить различные схемы обработки информации, в том числе с возможностью автоматического развёртывания обновлений, применения алгоритмов обучения, коррекции ошибок и балансировки нагрузки.

Список литературы

1. Kshemkalyani A.D., Singhal M. Distributed Computing: Principles, Algorithms and Systems // Cambridge University Press. 2008.
2. Управление обменом информацией в распределённых информационных системах с использованием активного пакета / Шибанов С.В., Илюшкин А.С., Шевченко О.А., Макарычев П.П. // Надежность и качество: труды междунар. Симпозиума. Пенза: Изд-во ПГУ, 2010.
3. Илюшкин А.С., Шибанов С.В., Шевченко О.А. Концепция активного пакета для распространения данных в распределённых системах // Технологии Microsoft в теории и практике программирования:

материалы конференции / под ред. проф. В.П. Гергеля. – Н.Новгород: Изд-во Нижегородского гос.ун-та, 2010. – С. 57-59.

4. Ajmani S. Automatic Software Upgrades for Distributed Systems. Ph.D., MIT, Sept. 2004. Also as Technical Report MIT-LCS-TR-1012.

Работа представлена д.т.н., профессором, заведующим кафедрой «Математическое обеспечение и применение ЭВМ» Пензенского государственного университета Макарычевым П.П.

Дата представления работы: 14.04.2011.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ В ПРОМЫШЛЕННОЙ СФЕРЕ: ЦВЕТНАЯ И ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ, ТРАНСПОРТ, ПРОМЫШЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ И НАВИГАЦИИ, ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, НЕФТЕГАЗОХИМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

*Мало знать, надо и применять. Мало
хотеть, надо и делать.
И. Гете*

*Математика – самая надежная
форма пророчества
В. Швобель*

КОМПЛЕКСНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Р.А. Сытдыков

Ташкентский государственный технический университет.

Узбекистан, 100095, Ташкент, ул. Университетская 2,

tstu_energy@mail.ru

В статье описана комплексная математическая модель оптимизации режимов электроэнергетических систем (ЭЭС), учитывающая различные виды режимов, множество критериев, связей, ограничений, адекватно отражающая различные условия эксплуатации ЭЭС.

COMPLEXLY MULTI CRITERION MODEL OF ELECTRICAL POWER SYSTEMS MODES OPTIMIZATION

R.A. Sitdikov

In the clause complexly multi criterion model of electrical power systems modes optimization is described.

Актуальность работы

Потребность реальных гарантий эффективности и оптимальности при различных режимах электроэнергетических систем (ЭЭС), в которых они и их элементы функционируют, переход к конкурентным отношениям приводят к необходимости разработки новых методов, моделей и технологий в области оптимизации режимов ЭЭС. Такие задачи определяют необходимость глубокой, детальной и многоцелевой проработки режимов ЭЭС с позиций единства, взаимосвязанности и специфичности задач выработки, передачи, распределения и потребления электрической энергии, что определяет их многокритериальную направленность [1,2].

Основные проблемы

Традиционные методы скалярной оптимизации режимов энергосистем, основанные на декомпозиции задачи и определении экстремума каждой из целевых функций в отдельности [3-5], не всегда обеспечивают эффективное решение задач управления сложными ЭЭС, так как оптимум может достигаться при таких значениях параметров, когда функционирование моделируемой системы в том или ином смысле становится неоптимальным (неустойчивым) и даже невозможным из-за противоречий, упрощений, неучета и перевода многих критериев в ограничения.

В связи с этим необходимо применение многокритериальной модели, расширяющей область оптимальных решений и обеспечивающей комплексность, согласованность и эффективность управления процессами в ЭЭС и их элементах.

Задачу многокритериальной оптимизации (МКО) можно описать в следующем виде: имеются частные локальные критерии:

$$Z_i = \varphi_i(x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_n) \longrightarrow \min(\max); x \in X, \quad (1)$$

входящие в состав векторного критерия. Общая целевая функция формулируется на основе этих критериев в виде

$$\Phi = G(Z_1, Z_2, \dots, Z_i, \dots, Z_s) \rightarrow \text{opt}(\min); \quad (2)$$

где Z_i - значения соответствующих критериев на векторе решения $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$; $i = \overline{(1, s)}$; s - количество критериев оптимальности; X - ограниченное множество допустимых решений; G - глобальная (общая) функция ценности.

Задаются ограничения типа равенств и неравенств:

$$\varphi_r(x_1, x_2, \dots, x_p) = 0; r = \overline{(1, p)}; \quad (3)$$

$$\psi_q(x_1, x_2, \dots, x_m) \geq 0; q = \overline{(1, m)}; \quad (4a)$$

$$x_j \geq 0; j = \overline{(1, n)}; n \leq p + m.$$

(4b)

Требуется найти значения переменных x_j , которые в определенном смысле оптимизируют (минимизируют) все критерии Z_i .

При решении практических задач МКО наряду с формализацией возникают следующие основные проблемы: скаляризация, нормализация и ранжирование критериев. При этом вводится вектор коэффициентов важности критериев $\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s\}$ с помощью которого корректируется принцип оптимальности и проводится дифференциация масштабов изменения критериев.

От преодоления этих проблем во многом зависит эффективность решения. Часто трудности носят не вычислительный, а концептуальный характер, поэтому в процессе оптимизации должен участвовать орган или лицо, принимающее решение (ЛПР). В общем случае моделью ЛПР может быть любое устройство управления (диспетчер, экспертная система и др.).

Решение должно принадлежать области оптимальных решений (область Парето, область компромиссов), обладающей тем свойством, что принадлежащие ей решения не могут быть улучшены одновременно по всем локальным критериям. В зависимости от конкретной практической МКО задачи перечисленные проблемы преодолеваются раз-

личными способами, разработанными на основе известных теоретических рекомендаций [6-7].

Описание модели

Математическая модель охватывает основные уровни оперативно-диспетчерского управления, включает и объединяет основные возможные виды режимов, соответствующие критерии (целевые функции), уравнения связи и ограничения. Нижний уровень составляют задачи режимов отдельных элементов ЭЭС и регулируемых потребителей; здесь производится оптимизация по соответствующим критериям этих элементов - Z_i . На верхнем уровне находятся системные критерии оптимизации - S_j , некоторые из которых составляются на основе объединения критериев нижнего уровня.

Критерии (целевые функции) нижнего уровня:

- расходы топлива на отдельных ТЭС:

$$Z_{1i} = B_i = \sum_i^T B_i(P_i) \rightarrow \min(\max). \quad (5)$$

Символ *max* может иметь место при избытке какого-либо топлива, которое необходимо интенсивно использовать по сравнению с другими, дефицитными.

Использование разных видов топлива выявляет необходимость их нормализации, появляются коэффициенты β_i , которые приводят все виды топлива к единому условному. Формула (5) приобретает вид

$$Z_{1i} = B_i = \sum_i^T \beta_i B_i(P_i) \rightarrow \min(\max). \quad (5a)$$

Нормализацию различных видов топлив можно осуществить путем введения топливных цен c_i в выражение (5):

$$Z_{1i} = B_i = \sum_i^T c_i B_i(P_i) \rightarrow \min(\max); \quad (5b)$$

- ущербы (затраты) от ограничения мощности конкретных потребителей при веерных отключениях и регулировании их нагрузки при управлении спросом:

$$Z_{2q} = Y_{Rq} = \sum_q^T \beta_q Y_{Rq}(R_q) \rightarrow \min; \quad (6)$$

- расходы воды на отдельных ГЭС:

$$Z_{3j} = W_j = \sum_j^T \beta_j W_j(P_j) \rightarrow \min(\max); \quad (7)$$

- величина отклонения напряжения от номинального или заданного значения в отдельных узлах потребления:

$$Z_{4q} = \Delta U_q = \sum^T \beta_{Uq} |U_q^{ном} - U_{qt}| \rightarrow \min ; \quad (8)$$

- выравнивание графиков нагрузок отдельных ТЭС:

$$Z_{5q} = \Delta P_i = \sum^T \beta_{Pi} (P_i^{\max} - P_i^{\min}) \rightarrow \min; \quad (9)$$

- потери мощности в отдельных ЛЭП:

$$Z_{6r} = \pi_r = \sum^T \beta_r \pi_r (L_r) \rightarrow \min . \quad (10)$$

Общесистемные критерии оптимизации (целевые функции) верхнего уровня:

- суммарная стоимость расходуемого топлива на всех ТЭС:

$$S_1 = B_{\Sigma} = \sum^T \sum^m c_i B_i(P_i) \rightarrow \min; \quad (11)$$

- суммарный ущерб потребителям от ограничений мощностей узлов Rq при управлении спросом и проведении регулировочных мероприятий (отключений):

$$S_2 = Y_{\Sigma} = \sum^T \sum^K \beta_q Y_q(R_q) \rightarrow \min; \quad (12)$$

- выработка электроэнергии на всех ГЭС:

$$S_3 = \mathcal{E}_{ГЭС} = \sum^T \sum^n \beta_j \mathcal{E}_j(P_j) \rightarrow \max;$$

(13)

- интегрированный показатель отклонения напряжений в основных, опорных узлах ЭЭС:

$$S_4 = \Delta U_{\Sigma} = \sum^T \sum^K \beta_i |U_i^{расч} - U_{it}| \rightarrow \min \quad (14)$$

- показатель равномерности суммарного графика нагрузки ЭЭС:

$$S_5 = \Delta \Pi_{\Sigma} = \sum^T \beta_t (\Pi_{\Sigma}^{\max} - \Pi_{\Sigma}^{\min})^2 \rightarrow \min; \quad (15)$$

- суммарные потери мощности в электрической сети:

$$S_6 = \pi_{\Sigma} = \sum^T \sum^l \beta_r \pi_r (L_r) \rightarrow \min, \quad (16)$$

где B_i - расход топлива на i -й станции при мощности P_i ; Y_{Rq} - ущерб от ограничения мощности q -го потребителя на величину R ; $\Pi^{\max}$, $\Pi^{\min}$ - максимальная и минимальная величины потребляемой мощности; L_r - переток по r -й ЛЭП; U_q - величина напряжения в узле q ($U_q^{ном}$, $U_q^{расч}$ -

номинальные и расчетные напряжения); W_j - расход воды на j -й ГЭС; T - период оптимизации; m, n, l, k - количество ТЭС, ГЭС, узлов потребления и ЛЭП; β - коэффициенты нормализации отдельных критериев нижнего уровня в течение периода оптимизации.

Критерии (8) и (14) отличаются тем, что Z_{dq} выражают отклонения напряжений отдельных потребителей и регулируются в соответствующих узлах нагрузки. А критерий S_4 отражает уровень изменения напряжений в опорных узлах и связанные с этим системные задачи: распределение реактивной мощности, устойчивость работы ЭЭС, потери в сетях и т.д. Кроме целевых функций в математической модели задаются соответствующие уравнения связи в виде различных эксплуатационных характеристик отдельных элементов и самой ЭЭС. Также в модели присутствуют соответствующие функциональные и интегральные ограничения равенства и неравенства.

Вышеперечисленные целевые функции режимов ЭЭС и её элементов можно представить в виде общей функции затрат на производство, передачу, распределение и регулирование потребления в виде:

$$G = \alpha_1 \sum_{i=1}^m \beta_i B_i(P_i) + \alpha_2 \sum_{q=1}^k \beta_q Y_{Rq}(R_q) + \quad (17)$$

$$+ \alpha_3 \sum_{f=1}^{k1} \beta_f Y_{fp}(\Delta f) + \alpha_4 \sum_{r=1}^{k2} \beta_r Y_{Ur}(\Delta U_r) \rightarrow \min,$$

где α_s - коэффициенты ранжирования критериев; $B_i(P_i)$ - расходные характеристики; $Y_{Rq}(R)$ - уравнения затрат потребителей на компенсацию ущерба от ограничения их мощности; $Y_f(\Delta f)$ - уравнения ущерба (затрат) потребителей из-за отклонения частоты от номинальной величины; $Y_U(\Delta U)$ - уравнения ущерба (затрат) потребителей из-за изменения напряжения.

Укрупним (17) и представим в виде

$$G = \alpha_1 B \sum + \alpha_2 Y_R \sum + \alpha_3 Y_f \sum + \alpha_4 Y_U \sum \quad (18)$$

считая, что сумма значений коэффициентов

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = \sum_{s=1}^4 \alpha_s = 1 = const. \quad (19)$$

Ранжирование коэффициентов α_s осуществляет ЛПР, задавая коэффициентам различные значения от 0 до 1, в зависимости от вида режима. Эти значения для различных ситуаций могут храниться в базах данных оперативного информационного комплекса (ОИК) АСДУ или используемых для управления ЭЭС и её элементов экспертных

систем. В таблице показаны возможные изменения величин α_s в зависимости от вида режима и степени необходимости задействовать в данной ситуации те или иные составляющие общего критерия (18). Если $\alpha_1 = 1$, мы имеем нормальный установившийся режим, при оптимизации которого учитывается только первая составляющая критерия (18). В таблице показаны крайние значения коэффициентов α_s (минимальные и максимальные). Рекомендации по выбору промежуточных значений коэффициентов между 0 и 1 заключаются в том, что для различных режимов, в зависимости от режимной ситуации, заранее определяются пороговые значения α_s , значительно сужающие интервалы их изменений. При выборе качественного и количественного состава критериев необходимо руководствоваться принципом повышения эффективности, т.е. при формировании используемого множества критериев, должна учитываться их эффективность для текущего режима и ситуации. Другими словами, число критериев для оптимизации данного режима считается полным и достаточным, если прибавление нового критерия не изменяет результата решения, и, наоборот, отбрасывание критерия этот результат меняет.

Таблица

Возможные значения коэффициентов α_s

№ n/n	Вид режима ЭЭС	Возможные величины и диапазоны изменения коэффициентов α				
		α_1	α_2	α_3	α_4	$\sum \alpha_s$
1	Нормальный	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00
2	Дефицитный	0,0÷1,0	0,0÷1,0	0,00	0,00	1,00
3	Утяжелённый, предаварийный	0,0÷1,0	0,0÷1,0	0,0÷1,0	0,0÷1,0	1,00
4	Аварийный	0,0÷1,0	0,0÷1,0	0,0÷1,0	0,0÷1,0	1,00
5	Послеаварийный	0,00	0,00	0,0÷1,0	0,0÷1,0	1,00

Заключение

Таким образом, многокритериальная модель оптимизации режимов ЭЭС позволяет повысить эффективность оптимизации за счет учета дополнительных критериев, позволяющих расширить область оптимальных решений. ЛПР может принимать решения по оперативной коррекции, не прибегая к новому громоздкому расчету, а подбирая из баз данных соответствующие значения коэффициентов α целевой функции (18), а так же и коэффициенты β , μ , η и других отдельных критериев (5-6). Априорное определение конкретных значений коэффициентов невозможно, т.к. их величины зависят от текущего режима. Ранжирование критериев, выбор главного и свертка критериев осуще-

ствляется при участии ЛПР на основе имеющейся и поступающей информации. Наиболее подходящей моделью ЛПР для реализации модели может быть устройство управления, организованное в виде экспертной системы [8].

Список литературы

1. Оптимизация и оптимальное управление. / Э.К. Аракелян, Г.А. Пикина. – М. : МЭИ, 2003. – 356 с.
2. Сытдыков Р.А. О многокритериальности целевой функции оптимизации режимов ЭЭС // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. – Т. : [Б.и.], 2006. № 3. – С. 54 – 61.
3. Комплексная программа оптимизации суточных режимов энергосистем для целей АСДУ / Х.Ф. Фазылов, Р.А. Сытдыков и др. // Оптимизация суточных режимов работы энергосистем: тез. докл. на Всесоюз. семинаре. – М. : [Б.и.], 1979. – С. 44 – 46.
4. Оптимизация режимов энергетических систем / под ред. В.М. Синькова. – Киев : Вища шк., 1976. – 308 с.
5. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем / В.А. Веников, В.Г. Журавлев, Т.А. Филиппова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 351 с.
6. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – М.: Наука, 1982. – 256 с.
7. Многокритериальные методы принятия решений. / С.В. Емельянов, О.И. Ларичев. – М.: Знание, 1985. – 320 с.
8. Разработка экспертной системы для управления режимами электроэнергетических систем / Т.Х. Насиров, Р.А. Сытдыков, О.В. Радионова // Проблемы информатики и энергетики. – Т.: [Б.и.], 2002. – № 3. – С. 21 – 26.

Работа представлена д.т.н., профессором, академиком Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности, заместителем директора Узбекского государственного института «Узнефтегазхимпроект» Каландаровым П.И.

Дата представления работы: 11.04.2011.

РЕГРЕССИОННЫЕ УРАВНЕНИЯ КАК СРЕДСТВО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЕЙ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ КАТАНКИ

А.Б. Сычков, М.А. Жигарев, А.В. Перегудов, А.В.Перчаткин

*Восточно-Европейского дивизион ОАО «Мечел», Laminorul SA Braila
Romani mun. Targoviste, STR. Poet Alexandrescu, bl. E 5, et. 5, nr. 14
absychkov@mail.ru*

В работе представлены результаты экспериментальных исследований показателей, которые характеризуют прочностные свойства катанки. Эксперименты были проведены и проанализированы для условий Молдавского металлургического завода. В качестве основных методов исследования выбраны методы статистического обследования и прогнозирования.

**THE REGRESS EQUATION AS MEANS OF FORECASTING OF
PROPERTIES AND MANAGEMENT OF THE PRODUCTION
TECHNOLOGY OF A WIRE WITH THE HIGH MAINTENANCE
OF CARBON**

A.B. Sychkov, M.A. Zhigarev, A.V. Peregudov, A.V. Perchatkin

In work results of experimental researches of indicators which characterize properties of durability for a wire are presented. Experiments have been spent and analysed for conditions of the Moldavian metal works. As the basic methods of research methods of statistical inspection and forecasting are chosen.

***Регрессионные уравнения прогнозирования свойств катанки в
зависимости от содержания углерода, бора и меди***

Для управления технологией в режиме «советчика», а в последствии и в режиме реального времени, с целью обеспечения заданного комплекса свойств высокоуглеродистой катанке были рассчитаны статистические зависимости линейного типа, параметры которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

*Коэффициенты регрессионных уравнений для прогнозирования свойств
высокоуглеродной катанки*

<i>Механические характеристики</i>	<i>Коэффициенты при факторах (числитель), доля их влияния (знаменатель, %) и статистические критерии адекватности реальному процессу</i>									
	σ_0	$\sigma_1(C_s)$	B_2 ($t_{6/2}$)	$\sigma_3(n_{06})$	$\sigma_4(d)$	R^2	R	$S_{ост.}$	F	n
σ_B , Н/мм ²	52	$\frac{983,2}{72,3}$	$\frac{0,187}{14,3}$	$\frac{0,054}{6,7}$	$\frac{-12,3}{6,7}$	0,89	0,94	21,9	1255	651
δ_{10} , %	29	$\frac{-16,3}{75,7}$	$\frac{-0,003}{13,5}$	$\frac{-0,0008}{4,2}$	$\frac{-0,12}{6,6}$	0,26	0,51	1,81	55,4	645
Ψ , %	83	$\frac{-52,8}{49,7}$	$\frac{0,022}{21,2}$	$\frac{-0,006}{9,7}$	$\frac{-2,8}{19,4}$	0,58	0,76	3,74	226, 1	649

Примечание. C, = C + Mn/5

Представленные уравнения адекватны реальным процессам. На механические свойства катанки наибольшее влияние оказывает химический состав стали и температура виткообразования, хотя и остальные параметры статистически значимы. Кроме вышеуказанных регрессионных уравнений проведены статистические исследования и разработаны следующие математические зависимости. Зависимость механических свойств высокоуглеродистой катанки от химического состава в двух вариантах. Первый из них – аргументы C, B, (Cr+Ni+Cu), второй – C, B, Cu. Полученные уравнения приведены ниже (75 плавок):

$$\sigma_B = 584,1 + 490,8C - 1665,6B + 134,3(Cr+Ni+Cu), \text{ Н/мм}^2;$$

$$R = 0,67; R^2 = 0,45; F = 9,1 (F_{\text{табл}} = 2);$$

вклад факторов: 87,9 % (C) - 0,5 % (B) - 11,6 % (Cr+Ni+Cu).

$$\delta_{10} = 22,6 - 22,7C - 511,8B + 16,1(Cr+Ni+Cu), \text{ %};$$

$$R = 0,54; R^2 = 0,29; F = 5,5;$$

вклад факторов: 72,4 % (C) - 2,6 % (B) - 25,0 % (Cr+Ni+Cu).

$$\Psi = 53,5 - 37,2C + 561,1B - 14,82(Cr+Ni+Cu), \text{ %};$$

$$R = 0,55; R^2 = 0,30; F = 5,7;$$

вклад факторов: 81,4 % (C) - 2,3 % (B) - 16,3 % (Cr+Ni+Cu).

Доля влияния содержания элементов на общую дисперсию приведен в табл. 2.

Таблица 2

Доля влияния каждого фактора в общей дисперсии

<i>Механические свойства</i>	<i>Доля влияния элементов, %</i>			
	<i>C</i>	<i>Cr+Ni+Cu</i>	<i>B</i>	<i>Σ</i>
σ_B	38	6,8	1,24	46,04
δ_{10}	14,6	10,5	3,7	28,8
Ψ	26,1	1,3	2,6	30,0

Статистический анализ показывает, что увеличение массовой доли бора приводит к незначительному уменьшению предела прочности и относительного удлинения и увеличению значений относительного сужения. При этом повышение содержания бора высокоуглеродистой стали до 0,003 % способствует улучшению пластичности, а при большем его содержании – ее снижению. Последнее связано с эффектом «передозировки» этого элемента, обладающего высокой склонностью к образованию на границах зерен сегрегаций пленочных и объемных выделений некогерентных фаз (боронитридов, карбонитридов), а в объеме зерна – к появлению большого количества мелкодисперсных частиц, это вызывает торможение дислокаций, возникновение пор и даже разрушение металла при приложении нагрузки. Вследствие этого на границах зерен и в их объеме эвтектоидное превращение происходит при меньшей степени переохлаждения аустенита. В результате в катанке из стали 70, содержащей более 0,003 % бора, количество перлита 1 балла уменьшается.

Второй вариант – аргументы C, B, Cu; полученные уравнения приводятся ниже:

$$\sigma_B = 586 + 494,5C - 3458,5B + 262Cu, \text{ Н/мм}^2;$$

$$R = 0,69; R^2 = 0,48; F = 9,4;$$

вклад факторов: 88 % (C) - 1 % (B) - 11 % (Cu).

$$\delta_{10} = 23,9 - 22,6C - 750,8B + 26,6Cu, \text{ \%};$$

$$R = 0,54; R^2 = 0,29; F = 5,7;$$

вклад факторов: 74,9 % (C) - 4 % (B) - 21,1 % (Cu).

$$\Psi = 55,5 - 36,4C + 295,1B - 13,2Cu, \text{ \%};$$

$$R = 0,52; R^2 = 0,27; F = 5,1;$$

вклад факторов: 91 % (C) - 1,5 % (B) - 6,7 % (Cu).

Доля влияния содержания элементов на общую дисперсию приведена в табл. 3.

Таблица 3

Доля влияния каждого фактора в общей дисперсии

Механические свойства	Доля влияния элементов, %			
	C	Cu	B	Σ
σ_b	38,2	6,6	2,6	47,4
δ_{10}	14,5	9,2	5,5	29,2
ψ	25,5	0,3	1,4	27,2

Анализ показывает, что вклад в функцию отклика σ_b и δ_{10} отдельно Cu и суммы Cr, Ni и Cu практически одинаков, а на ψ большее влияние оказывает сумма примесей цветных элементов, чем одна медь. Этот вывод подтверждает и метод многокритериальной оптимизации, что иллюстрируется трехмерным срезом поверхности отклика в гиперпространстве параметров оптимизации (см. рис.).

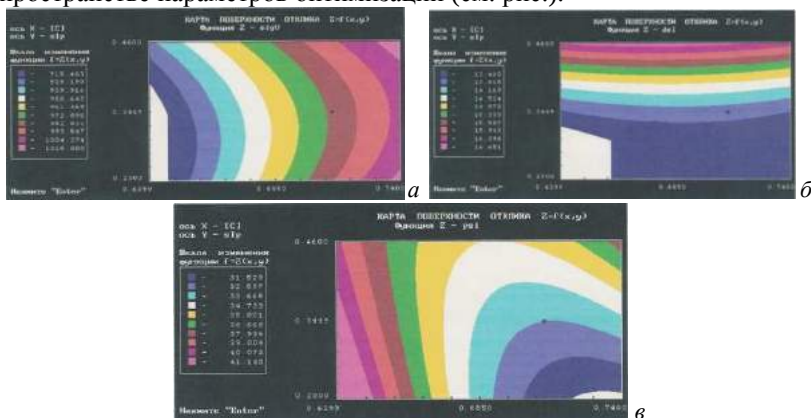


Рис. Влияние массовых долей углерода и Cr, Ni, Cu (в сумме: а – на предел прочности; б – относительное удлинение; в – относительное сужение)

Регрессионные уравнения прогнозирования свойств катанки в зависимости от содержания бора и азота

Интересны результаты исследования влияния бора и азота на механические свойства высокоуглеродистых сталей. Получены следующие нелинейные математические зависимости:

$$\sigma_b = -162 + 987C_3 - 2,4(1/(B/N)) - 0,03(1/(B/N))^2, \text{ Н/мм}^2;$$

$$R = 0,75; R^2 = 0,56; F = 8,0;$$

вклад факторов: 97,5 % (C_3) - 2,2 % ($1/(B/N)$) - 0,3 % ($1/(B/N)^2$).

$$\sigma_m = 713 + 317C_3 + 0,99(1/(B/N)) - 0,0048(1/(B/N))^2, \text{ Н/мм}^2;$$

$$R = 0,83; R^2 = 0,69; F = 11,8;$$

вклад факторов: 97,3 % (C_s) - 2,5 % ($1/(B/N)$) - 0,2 % ($1/(B/N))^2$.

$$\delta_{10} = 18,8 - 11,1C_s - 0,08(1/(B/N)) + 0,0009(1/(B/N))^2, \%;$$

$$R = 0,74; R^2 = 0,55; F = 7,3;$$

вклад факторов: 93 % (C_s) - 6,4 % ($1/(B/N)$) - 0,6 % ($1/(B/N))^2$.

$$\Psi = 54,7 - 29,2C_s + 0,0956(1/(B/N)) - 0,00093(1/(B/N))^2, \%;$$

$$R = 0,55; R^2 = 0,30; F = 3,6;$$

вклад факторов: 96,7 % (C_s) - 3 % ($1/(B/N)$) - 0,3 % ($1/(B/N))^2$.

Как видно из вышеприведенных математических зависимостей, основное и определяющее влияние на механические свойства высокоуглеродистой катанки оказывает химический состав стали через углеродный эквивалент, рассчитываемый по следующей формуле:

$$C_s = C + Mn/5 + Si/7 + (Cr+Ni+Cu)/10.$$

Влияние Са на формирование механических свойств ничтожно.

Регрессионные уравнения прогнозирования количества перлита первого балла

Для условий Молдавского металлургического завода были получены следующие регрессионные зависимости количества перлита первого балла (Π , %) от химического состава стали ($C_s = C + Mn/5$), температуры виткообразования ($t_{в/у}$, °C), скорости вращения двигателей БСО (n , мин⁻¹), диаметра катанки (d , мм):

$$\Pi = -117 + 151,1 C_s + 0,047 t_{в/у} + 0,0128 n - 3,84d,$$

объем выборки $N = 823$.

Параметры исходного расчетного массива и точность математической модели приведены в табл. 4.

Следует привести еще одно статистически значимое нелинейное уравнение зависимости дисперсности перлита от температуры виткообразования:

$$\Pi = -2 \cdot 10^{-8} \cdot t_{в/у}^3 + 7 \cdot 10^{-5} \cdot t_{в/у}^2 - 0,03 t_{в/у} + 53,75; R^2 = 0,081; R = 0,28; F = 113,2.$$

Таблица 4

Параметры расчетного массива и точности математической модели

Параметр	Функция отклика $Y = P, \%$ (ω_0)	Независимые переменные, X_i			
		Углеродный эквивалент $C, \%$; (X_1)	Температура виткообразования $t_{вг}, ^\circ C$, (X_2)	Скорость БСО $n, \text{мин}^{-1}$, (X_3)	Диаметр катанки $d, \text{мм}$, (X_4)
$X_{\min}$	5	0,68	640	900	5,5
$X_{\max}$	90	1,103	1020	1480	13
$X_{\text{ср.}}$	55	0,898	898,3	1422	6,04
$R = X_{\max} - X_{\min}$	85	0,423	380	580	7,5
$R/X_{\text{ср.}} \cdot 100, \%$	155	47,16	42,3	40,79	124,3
Коэффициенты уравнения – ω_0, ω_i	- 117	151,1	0,047	0,0128	- 3,84
Стандартное отклонение коэффициентов, S_{ω_i}	8,223	4,762	0,007	0,005	3,63
Коэффициент детерминаций R^2 /множественный коэффициент корреляции, R	0,606/0,78	-	-	-	-
Стандартное отклонение функции отклика, S_y	8,713	-	-	-	-
Критерий Фишера F (табличное значение – $F_{\text{табл.}} = 2,616$)	315,6	-	-	-	-
Критерий Стьюдента t_i (табличное значение $t = 1,963$)	-	31,72	7,14	2,537	- 10,6
Коэффициент эластичности	-	0,793	0,244	0,098	0,135
Вклад факторов, %	-	62,4	19,2	7,7	10,6

Интересны также результаты расчета эмпирической зависимости дисперсности перлита за длительный период времени (примерно 3 года, 90 тыс. т катанки диаметром 5,5-8,0 мм, около 900 плавок) на широком марочном сорimente высокоуглеродистой стали (марки стали типа 45-90).

Получена эмпирическая зависимость количества мелкодисперсного сорбитообразного перлита 1 балла от углеродного эквивалента

$$C_s = C + Mn/5 + Si/7 + (Cr + Ni + Cu)/12$$

и бора

$$П = - 72,92 + 131,05C_s + 7059B; R = 0,70; R^2 = 0,49; F = 152;$$

вклад факторов: 92,8 % (C_s) и 7,2 % (B).

У высокоуглеродистой катанки для производства проволоки и высокопрочных стабилизированных арматурных канатов (ВСАК) имеется ряд особенностей в прогнозировании свойств катанки, проволоки и, собственно, ВСАК. Этот металл характеризуется применением легирования или микролегирования стали марганцем, хромом, ванадием, ванадием и хромом, в ряде случаев – дополнительно к вышеуказанным элементам и алюминием (в нашем случае алюминий не применялся и поэтому не рассматривается в настоящей статье).

Для прогнозирования механических свойств и управления технологическим процессом производства катанки из высокоуглеродистой стали марок C78D-C82D разработаны регрессионные зависимости (табл. 5). Представленные уравнения, полученные с использованием метода наименьших квадратов, достаточно точные и имеют высокие статистические показатели адекватности реальному.

Поэтому для разработки расчетных зависимостей использовали массив повторных данных по механическим испытаниям, полученных после вылеживания катанки в течение суток (для катанки диаметром 9,0-12,0 мм). При расчете микролегированной V и Cr добавляется влияние содержания соответствующих элементов. При проведении статистической обработки массива данных для катанки, микролегированной одновременно V и Cr, в качестве факторов использовалось как индивидуальное содержание указанных элементов, так и их возможное совместное влияние ($Cr \times V$). Как оказалось, именно этот фактор стал значимым (метод t-статистики), тогда как индивидуальное влияние Cr и V, а также влияние диаметра катанки оказалось незначимыми, а потому они исключены из регрессионного уравнения. Для остальных массивов данных диаметр катанки снижает величину предела прочности, причем для катанки, микролегированной V, этот вклад минимальный.

Таблица 5

*Коэффициенты линейных регрессионных зависимостей для расчета
механических свойств высокоуглеродистой катанки (без Cr и V, с V, Cr, Cr и V)*

Характеристика	Коэффициенты уравнений/вклад*, %					R**	S _{ост}	F**	N
Без Cr и V	<i>Bo</i>	<i>B₁</i> (Cэ)	<i>B₂</i> (t _{гн})	<i>B₃</i> (n _{ВБСО})	<i>B₄</i> (d)	0,15		2,39	
σ_b , МПа	133,5	980,9	0,112	0,056	-12,2	0,89	21,9	1255	651
		72	14	7	7				
δ_0 , %	28,94	-16,3	-0,003	-0,0008	-0,12	0,25 6	1,81 1	55,4	645
		76	13	4	7				
ψ , %	82,54	-52,8	-0,022	-0,006	-2,8	0,58 2	3,74	226, 1	649
		50	21	10	19				
с V	<i>Bo</i>	<i>B₁</i> (Cэ)	<i>B₂</i> (t _{гн})	<i>B₃</i> (V)	<i>B₄</i> (d)	0,15		2,38	
σ_b , МПа	95,6	852,7	0,3	976,0	-2,8	0,69	20,7	406	174 3
		70	22	6	2				
δ , %	36,4	-14,3	-0,01	-30,9	-0,1	0,39	1,2	70	157 6
		55	30	9	6				
ψ , %	70,4	-38,2	-0,03	298,0	0,2	0,33	5,0	49	161 0
		40	35	23	2				
с Cr	<i>Bo</i>	<i>B₁</i> (Cэ)	<i>B₂</i> (t _{гн})	<i>B₃</i> (Cr)	<i>B₄</i> (d)	0,19		2,39	
σ_b , МПа	50,6	952,3	0,2	631,0	-9,2	0,64	27,3	57,9	336
		67	14	13	6				
		33	60	7	-				
δ , %	36,5	-14,9	-0,01	-	-	0,25	1,0	9,7	299
		54	46	-	-				
ψ , %	79,5	-68,1	-0,03	138,2	-0,5	0,43	3,3	16,4	297
		48	20	28	4				
с Cr и V	<i>Bo</i>	<i>B₁</i> (Cэ)	<i>B₂</i> (t _{гн})	<i>B₃</i> (Cr×V)	-	0,27		2,69	
σ_b , МПа	245,5	653,2	0,31	5870,4	-	0,65	14,7	24,4	102
		61	31	9	-				
δ , %	59,3	-26,8	-0,02	-213,7	-	0,42	1,2	6,9	98
		51	42	6	-				
ψ , %	173,5	-54,5	-0,09	-767,1	-	0,67	2,4	24,3	88
		33	60	7	-				

Результаты исследования показателей обезуглероживания поверхности катанки

Одним из качественных показателей высокоуглеродистой катанки является и степень обезуглероживания поверхности катанки и проволоки, играющая в ряде случаев отрицательную роль (усталостная выносливость пружинной проволоки и, собственно, пружин различного назначения), а в других случаях положительно влияющая на потребительские свойства продукции (повышение коррозионной стойкости, улучшение деформируемости катанки и проволоки даже при наличии поверхностных дефектов не критического размера, лучшая адгезия технологической смазки, исключения появления на поверхности высокоуглеродистой катанки мартенсита истирания и т. п.). Поэтому определение глубины обезуглероживания и распределения этого слоя по периметру поперечного сечения катанки актуально. В максимальной степени обезуглероживание в катанке, наследуемое затем и проволокой, определяется режимом нагрева исходной заготовки в нагревательной печи перед станом. В результате статистического анализа обезуглероживания НЛЗ в ПШП СЗАО ММЗ получено следующее уравнение:

$$h_{\text{ОБС}} = 14,8 - 24,7C + 0,015\tau - 0,009T - 0,013C \cdot \tau + 0,017C \cdot T;$$
$$n = 165; R = 0,52; F = 42,1;$$

Вклад факторов: 37 (С) – 4,7 (τ) – 22,8 (Т) – 3,1 (С·τ) – 32,4 (С·Т) %, где С – массовая доля углерода, %; τ – время нагрева НЛЗ в ПШП, ч; Т – максимальная температура ПШП – во 2-й зоне, °С.

Влияние окисленности атмосферы ПШП на $h_{\text{ОБС}}$ по критерию Стьюдента оказалось незначимым. С увеличением содержания углерода в стали и температуры виткообразования $h_{\text{ОБС}}$ уменьшается.

Заключение

Приведенные в статье сведения по прогнозированию свойств высокоуглеродистой катанки позволили установить закономерности формирования качественных характеристик этого проката, установить области регулирования и управлять свойствами в зависимости от химического состава стали и технологических параметров технологии.

Работа представлена д.т.н., членом корреспондентом Академии инженерных наук м. А.М. Прохорова, профессором кафедры вычислительной техники и прикладной математики Ячиковым И.М.

Дата представления работы: 11.04.2011.

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗАКАЛЕННОЙ СТАЛИ ПОД ВЛИЯНИЕМ НИЗКОГО ОТПУСКА

Ю.А. Самойлович

*Научно-исследовательский институт металлургической
теплотехники ОАО «ВНИИМТ»*

*Россия, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, д. 16
platan09@yandex.ru*

В работе рассматривается математическая модель и ее численная реализация для тела цилиндрической формы в процессе закалки с низким отпуском. Показаны графические зависимости для изменения температуры и термических напряжений. Выполнен анализ результатов.

DECREASE IN LEVEL OF PRESSURE IN THE TEMPERED STEEL UNDER THE INFLUENCE OF LOW HOLDING

U.A. Samoylovich

In work the mathematical model and its numerical realization for a body of the cylindrical form in the course of cooling with low holding is considered. Graphic dependences for change of temperature and thermal pressure are shown. The analysis of results is made.

Введение

При отпуске закаленной углеродистой стали при 300 – 400 °С происходит так называемое «третье превращение», которое сопровождается весьма существенным изменением удельного объема металла. Физическая природа данного явления раскрыта исследованиями Г.В. Курдюмова и его школы [1 – 3]. В нашей работе обсуждается взаимосвязь усадки стали при третьем превращении с термонапряженным состоянием предварительно закаленного стального изделия цилиндрической формы.

Математическая формулировка задачи о напряжениях и деформациях в закаленном стальном изделии зависит от структурного состояния металла. В случае сквозной закалки изделия на мартенсит при расчете деформаций и напряжений в закаленных изделиях представляется возможным использование основных уравнений термоупругости, поскольку мартенситная структура стали отличается высокой твердостью и повышенным сопротивлением пластической деформации. В более общем случае возникновения смешанной структуры при закалке, когда, помимо мартенсита, структура закаленного

изделия включает перлит и бейнит, при исследовании напряжений и деформаций необходимо использовать уравнения обобщенной термомеханики, позволяющие учитывать эффекты вязкоупругости и пластической деформации, существенно усложняющие постановку задачи.

***Математическая модель пластической деформации
в закаливаемом стальном цилиндре***

Авторами в работе используется упрощенный способ учета пластической деформации в закаливаемом стальном цилиндре, основанный на обобщении соответствующей задачи термупругости.

В том случае, если усадка сплава учитывается коэффициентом линейного расширения (α), решение задачи термупругости в сплошном круговом цилиндре при осевой симметрии поля температур определяется соотношениями [4]:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{1}{(1-\nu)R_0^2} \left(\int_0^{R_0} \alpha E T r dr - \int_0^r \alpha E T r dr \right); \\ \sigma_\theta &= \frac{1}{(1-\nu)R_0^2} \left(\int_0^{R_0} \alpha E T r dr + \int_0^r \alpha T r dr - \alpha E T r^2 \right); \\ \sigma_z &= \nu(\sigma_r + \sigma_\theta) - \alpha E T,\end{aligned}\tag{1}$$

где основные компоненты тензора напряжений σ_r , σ_θ , σ_z однозначно связаны с распределением температуры (T) и упругими свойствами металла – модулем упругости E , коэффициентом линейного расширения α и числом Пуассона ν .

Простейший способ учета объемных изменений металла при протекании фазовых превращений основан на использовании следующих предположений:

- коэффициент усадки α заменяется некоторым эффективным коэффициентом линейного расширения β ;
- расчет коэффициента β осуществляется при допущении об аддитивности воздействия различных фазовых превращений при распаде аустенита, когда в качестве продуктов распада возможно образование перлита, бейнита и мартенсита;
- отдельные составляющие эффективного коэффициента β определяются с учетом зависимости удельных объемов каждой фазы от температуры и концентрации углерода по формуле

$$\beta_i = \frac{(V_i/V_0)^{1/3} - 1}{T - T_0} \quad (2)$$

где V_i – удельный объем продукта распада ($i=1, 2, 3$ – определяет наименование фазы – перлита, бейнита, мартенсита соответственно); V_0 – удельный объем аустенита; T – текущее значение температуры металла, T_0 – комнатная температура.

Для аустенита и перлита значения коэффициентов β_j определяются на основании эмпирических данных относительно удельных объемов указанных продуктов превращения [5 – 8]:

$$\beta_1 = \beta(A) = 2,08 \times 10^{-5} \text{ 1/K}, \quad \beta_2 = \beta(P) = -1,52 \times 10^{-5} \text{ 1/K}.$$

Значение эффективного коэффициента линейного расширения (сжатия) для перлита принято отрицательным, поскольку превращение $A \rightarrow P$ сопровождается увеличением удельного объема. Оценка коэффициента $\beta_3 = \beta(M)$ для мартенсита, осуществляемая по данным С.Ф.Юрева [5], приводит к существенно большим значениям: для углеродистой стали (при $C = 0,5 - 0,9 \%$) в интервале температур от 300 до 700 К величина рассчитанного по формуле (2) эффективного коэффициента расширения изменяется в пределах от $-6,3 \times 10^{-5}$ до $-3,6 \times 10^{-5}$ 1/К. В расчетах, результаты которых приводятся ниже, для мартенсита используется усредненное значение $\beta_3 = -4,5 \times 10^{-5}$ 1/К.

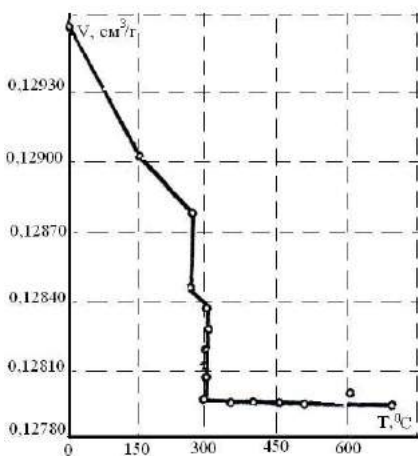


Рис.1. Зависимость удельного объема стали (при 0,89% C) от температуры, по данным [9]

Специфическая особенность «третьего превращения» при низком отпуске состоит в том, что в интервале температур от 250 до 350°C происходит распад аустенита, сопровождающийся уменьшением удельного объема, в связи с чем для отпущенного мартенсита необходимо скорректировать

величину коэффициента $\beta(M)$.

Значения удельных объемов закаленной и отпущенной стали, содержащей от 0,07 до 1,24 %С, в интервале температур от 20 до 600°С приведены в работе [9]. На рис. 1 приведен, по данным работы [9], график изменения удельного объема закаленной стали, содержащей 0,89% С.

Подсчеты по формуле (2) значений эффективного коэффициента линейной усадки стали, содержащей от 0,42 до 1,24% С, с использованием данных работы [9] приводят к значениям

$$\Delta\beta_3 = 0,34 \div 1,45 \times 10^{-5} \text{ 1/K.}$$

В расчетах, результаты которых приведены ниже, используются следующие значения коэффициента $\beta_3 = \beta(M)$:

$$\beta_3 = \begin{cases} -4,5 \times 10^{-5}, & \text{где } T \geq 573 \text{ K,} \\ -3,3 \times 10^{-5}, & \text{где } T < 573 \text{ K.} \end{cases}$$

В процессе нагрева при низком отпуске изменение температуры металла сопровождается пересечением границ «третьего превращения». В соответствии с изложенными выше допущениями корректирование абсолютной величины эффективного коэффициента линейного расширения β_3 сводится к его увеличению на $1,2 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$ при значениях температуры металла $T \geq 573 \text{ K}$, что соответствует данным работы [9] для стали, содержащей 0,89%С.

При расчетном определении поля деформаций и напряжений в стальной заготовке, претерпевающей технологические операции закалки и отпуска, необходимо задание соотношений, характеризующих кинетику фазовых превращений. В нашей работе с этой целью привлекаются известные соотношения Джонсона-Мейла-Аврами [10], основанные на предположении о том, что объемная доля образующейся при распаде аустенита фазы может быть выражена формулой

$$\psi_j = 1 - \exp \left[1 - K_j (t - t_j^0)^n \right] \quad (3)$$

где t_j^0 – моменты начала возникновения продуктов распада (перлита, мартенсита, $j=1, 2$); K и n – эмпирические коэффициенты.

По оценке М.Е. Блантера [11, с. 81] для перлитного превращения можно использовать следующие значения кинетических коэффициентов: $K_1 = 0,00376 \text{ с}^{-3}$ и $n_1 = 3$.

Мартенситное превращение носит «атермический» характер и принципиально отличается от перлитного. Исследования указывают на чрезвычайно высокую скорость выпадения мартенситной фазы при

закалке: по данным [12, 13] время образования кристаллов мартенсита зависит от их размеров и равно примерно 10^{-7} с. Достоверное аналитическое описание кинетики мартенситного превращения нами не обнаружено, в связи с чем в конкретных расчетах использовано соотношение (3) при завышенных значениях кинетического коэффициента $K_2 = K(M) = 5+10 \text{ (с}^{-2}\text{)}$ и $n_2=2$.

Подчеркнем лишний раз, что подобный способ задания кинетики мартенситного превращения носит чисто формальный характер и нуждается в уточнении.

Определение деформаций и напряжений в остывающей стальной заготовке цилиндрической формы осуществляется путем решения системы уравнений термомеханики совместно с решением задачи нестационарной теплопроводности. Для заготовки цилиндрической формы при допущении осевой симметрии поля температур, при наличии экзотермических источников выделения энергии фазовых переходов использовано следующее уравнение теплопроводности [14]:

$$\begin{aligned} \rho C \frac{\partial T}{\partial t} = & \frac{1}{r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \\ & + \rho \left(L_1 \frac{\partial \psi_1}{\partial t} + L_2 \frac{\partial \psi_2}{\partial t} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где введены обозначения: ψ_1 и ψ_2 – объемные доли перлита и мартенсита; L_1 и L_2 – значения теплоты фазовых переходов перлита и мартенсита соответственно. Численное решение уравнения (4) выполнено при задании следующих краевых условий:

$$\text{при } r = R_0 : \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_s (T_s - T), \text{ при } r = 0 : \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (5)$$

$$\text{при } t = 0 : T = T_0 \text{ и } \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad (6)$$

где R_0 – радиус цилиндра; α_s и T_s – коэффициент теплоотдачи на его поверхности и температура охлаждающей среды.

В качестве примера численного решения нестационарной задачи теплопроводности на рис. 2а приведены графики изменения во времени температур в трех характерных точках вдоль радиуса цилиндра диаметром 16 мм, при закалке в масле. При этом использованы следующие значения теплофизических свойств стали и параметров режима охлаждения: $\rho=7500 \text{ кг/м}^3$, $C=628 \text{ Дж/(кг}\times\text{град)}$,

$\lambda=30$ Вт/(м×град), $L_1 = 20,93$ кДж/кг, $L_2= 75,36$ кДж/кг, $\alpha_s=3000$ Вт/(м²×град), $T_0=1123$ К, $T_s=323$ К.

Изменение во времени продольной компоненты тензора напряжений для стадии заковки стальной заготовки представлено графиками рис. 2б.

Одна из особенностей термонапряженного состояния стальной заготовки при заковке состоит в том, что максимум растягивающих (т.е. наиболее опасных) напряжений достигается не в центре или на поверхности заготовки, а в промежуточном сечении, расположенном на расстоянии R_m от оси симметрии заготовки. Для принятых в данном расчете условий значение указанной координаты равно, как показано ниже, $R_m \cong 5,4$ мм.

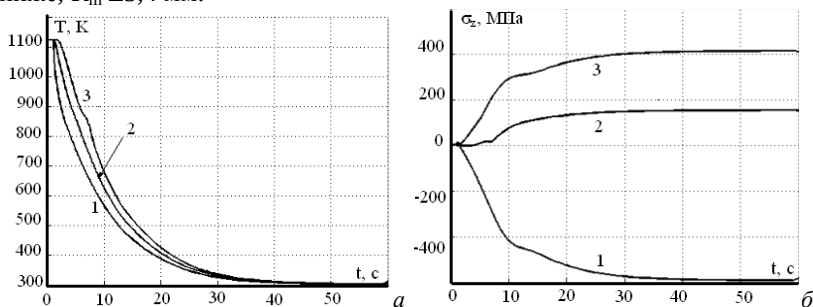


Рис. 2. Изменение во времени температур (а) и продольных напряжений (б) на стадии заковки для трех точек вдоль радиуса цилиндра: 1 – $r=R_0$; 2 – $r=R_m$; 3 – $r=0$

Рассмотрение графиков на рис. 2 позволяет отметить некоторые особенности термонапряженного состояния стальной цилиндрической заготовки диаметром 16 мм на стадии ее заковки в масле:

- с началом охлаждения заготовки наблюдается рост неравномерности поля температур по ее сечению, причем максимальный перепад температур ΔT достигается через 7,5 – 8 с от начала охлаждения и не превышает 155 – 160 град;
- растягивающие продольные напряжения σ_z в точках $r=R_m$ и $r=0$ монотонно нарастают со временем, достигая максимальных значений (405 и 165 МПа соответственно) через 45 – 50 с от начала охлаждения;
- выделенный период охлаждения заготовки в масле (60 с) оказался достаточным для практически полного остывания заготовки и стабилизации поля напряжений по ее сечению.

Тот факт, что моменты достижения максимальных значений перепада температур ΔT и продольных напряжений σ_z не совпали

между собой, свидетельствует о том, что структурные напряжения, обусловленные превращениями аустенита при закалке, преобладают над термическими напряжениями, вызванными неравномерностью поля температур по сечению заготовки.

Графики на рис. 3 – 5 характеризуют особенности термонапряженного состояния стальной заготовки для двух последующих стадий термической обработки – низкого отпуска и вторичной закалки. Штриховой линией на рис. 3 показано ступенчатое изменение во времени температуры внешней (охлаждающей, греющей) среды.

Для стадии низкого отпуска температура греющей среды поддерживается на уровне 573 К в течение 190 с, что оказалось достаточным для полного выравнивания температур по сечению заготовки к моменту окончания стадии отпуска. Предполагается, что отпуск осуществляется путем нагрева заготовки в кипящем слое твердых частиц, и коэффициент теплоотдачи от кипящего слоя к поверхности заготовки поддерживается на уровне 800 Вт/м²К [15]. Для заключительной стали ускоренного охлаждения заготовки температура охлаждающей среды (быстротекущего потока воды) принята равной 300 К, а коэффициент теплоотдачи – равным 20000 Вт/м²К.

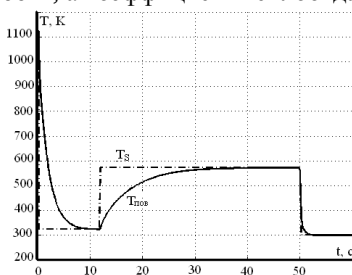


Рис. 3. Изменение во времени температуры охлаждающей среды и температуры поверхности цилиндра на стадиях закалки и отпуска: T_s - температура окружающей среды; $T_{пов}$ - температура поверхности цилиндра

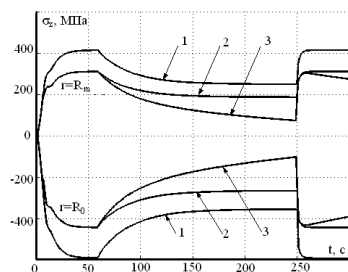


Рис. 4. Изменение во времени продольных напряжений в двух точках вдоль радиуса цилиндра (при $r=R_m$ и $r=R_0$) на стадиях закалки и отпуска для двух режимов возможной релаксации металла: 1 – решение упругопластической задачи; 2 – решение с учетом структурного разупрочнения в интервале температур «третьего превращения»; 3 – решение режима 2 при учете эффекта релаксации напряжений

На рис. 4 представлены результаты расчетного анализа напряжений в стальной заготовке при ее низком отпуске и вторичной

закалке. Как следует из рассмотрения графиков на рис. 4, непосредственно с начала отпуска (при $t = 60$ с) наблюдается плавное снижение абсолютных значений продольных напряжений в точках сечения $r=R_m$ и $r=R_0$.

Следует отметить, что снижение уровня напряжений в закаленном изделии может быть обусловлено двумя причинами – ползучестью металла (вязким течением металла под воздействием растягивающих напряжений) и разупрочнением металла, вызванным протеканием структурных превращений, связанных с изменением удельного объема отдельных фаз [16].

В реальных условиях при отпуске закаленной стали происходит совмещение обоих упомянутых причин разупрочнения металла. Предложенная в настоящей работе математическая модель позволяет дифференцировать влияние структурных превращений и вязкого течения металла при возникновении напряжений в стальных изделиях, подвергаемых закалке и отпуску. Как отмечено выше, учет «третьего превращения» при отпуске углеродистой стали сопровождается заметным снижением удельного объема мартенситной фазы, что учитывается уменьшением эффективного коэффициента линейного расширения $\beta_3 = \beta(M)$.

На рис. 4 сопоставлены графики изменения во времени продольных напряжений, рассчитанных без учета указанного изменения коэффициента $\beta(M)$ (см. графики, отмеченные цифрой 10, и напряжений, рассчитанных с учетом коррекции коэффициента $\beta(M)$ (см. графики, отмеченные цифрой 2). В первом случае снижение напряжений, определяемых при решении упругопластической задачи, обусловлено снижением модуля упругости и предела текучести стали при повышении температуры нагреваемой при отпуске заготовки. Во втором случае снижение уровня напряжений обусловлено коррекцией коэффициента $\beta(M)$.

Скорость снижения напряжений максимальна с первых секунд стадии отпуска и достигает нуля через 120 – 150 с от начала нагрева металла. Полное снижение уровня напряжений к моменту завершения отпуска, обусловленное коррекцией коэффициента $\beta(M)$, составляет 15 – 20% от стабилизированных значений продольных напряжений, достигаемых к моменту окончания отпуска.

Оценка дополнительного разупрочнения металла, обусловленного вязким течением металла, может быть выполнена с учетом эмпирических данных относительно релаксации напряжений в стальных изделиях при повышенных температурах. Явление релаксации напряжений определяется, согласно И.А. Одингу, как «процесс

самопроизвольного ослабления напряжений в изделиях, которые работают в условиях, исключающих возможность изменения линейных размеров в направлении действия сил».

Обсуждение различных механизмов релаксации напряжений и факторов, влияющих на процесс самопроизвольного снижения напряжений в закаленных стальных изделиях, приводится в книге [17].

В наиболее упрощенной форме учет самопроизвольного снижения напряжений под влиянием эффекта релаксации можно выполнить, используя соотношение

$$\sigma_R = \sigma_E(r, t) \times \exp \left[- \left(\frac{t}{t_R} \right)^m \right], \quad (7)$$

где $\sigma_E(r, t)$ – значения напряжений, вычисленные при решении соответствующей упругопластической задачи, r – координата; t – текущее время; t_R – время релаксации; m – эмпирическая константа.

В работах В.Я. Зубова и С.В. Грачева [17 – 19] приводятся результаты большой серии экспериментов по исследованию процесса релаксации напряжений в изделиях из легированной стали, подвергаемых закалке и отпуску. В этих исследованиях установлено, в частности, что скорость релаксации «свежезакаленного» мартенсита

на порядок превышает скорость релаксации отпущенного мартенсита, причем показатель степени « m » в формуле (7) намного превышает значение $m = 1$, используемое рядом исследователей при описании эффекта релаксации напряжений.

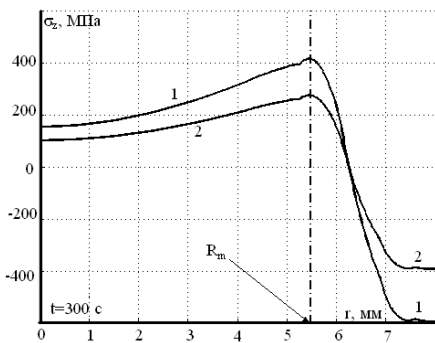


Рис. 5. Распределение продольных напряжений вдоль радиуса цилиндра для двух способов задания механических свойств металла: 1 – решение упругопластической задачи; 2 – то же при совместном учете структурного разупрочнения и эффекта релаксации

пределах $m = 1,8 - 1,85$, а время релаксации напряжений в стальной

пружинной ленте изменяется в широких пределах – от 20 до 150 – 200 с.

На рис. 4 приведены результаты расчета продольных напряжений в стальной заготовке цилиндрической формы с учетом влияния релаксации напряжений согласно формуле (7) при задании эмпирических параметров $m=1,82$ и $t_R=200$ с. Согласно расчетам (см. графики, отмеченные цифрой 3) учет эффекта релаксации приводит к дополнительному снижению уровня напряжений на 25 – 30 %, по сравнению с расчетом, выполненном при условиях структурного разупрочнения стали.

Суммарный эффект разупрочнения закаленной стали, зафиксированный к моменту окончания стадии низкого отпуска ($t = 250$ с), достигает 50 – 60% от максимальных значений продольных напряжений, полученных при решении упругопластической задачи. При вторичной закалке заготовки в быстротекущем потоке воды (при $t > 250$ с) указанный эффект разупрочнения существенно снижается за счет возникновения вторичных закалочных напряжений. На рис. 5 приводятся графики распределения напряжений вдоль радиуса цилиндрической заготовки, полученные к моменту завершения процесса тепловой обработки: цифрой 1 указаны напряжения, полученные при решении упругопластической задачи, цифрой 2 – напряжения, полученные с учетом указанных выше факторов разупрочнения металла.

Заключение

В обоих случаях на поверхности заготовки, подверженной закалке и отпуску, зафиксированы сжимающие напряжения, а на оси симметрии заготовки – растягивающие напряжения, что согласуется с известными результатами тензометрических экспериментов. В то же время максимум растягивающих напряжений наблюдается в некотором промежуточном сечении заготовки, расположенном на расстоянии $\Delta R=(0,3 \div 0,32)R_0$ от поверхности заготовки. При этом различие максимальных значений растягивающих напряжений в точке $r=R_m$ не превышает 125 МПа, что составляет $\pm 30\%$ от максимальных значений, полученных при решении упругопластической задачи.

Список литературы

1. Структура отпущенного мартенсита и процессы отпуска закаленной стали / Г.В. Курдюмов, Н.Л. Ослон // Журнал технической физики.– 1939. – Т. 9. – Вып. 21. – С. 1891 – 1909.

2. О природе «третьего превращения» при отпуске закаленной стали / П.Л. Грузин, Г.В. Курдюмов, Р.И. Энтин // *Металлург.*– 1940. – № 8. – С. 15 – 23.
3. Превращения в железе и стали / Г.В. Курдюмов, Л.М. Утевский, Р.И. Энтин. – М. : Наука, 1977. – 238 с.
4. Теория температурных напряжений / Б. Боли, Дж. Уэйнер. – М.: Мир, 1964. – 517 с.
5. Юрьев С.Ф. Удельные объемы фаз в мартенситном превращении аустенита. – М. : Metallurgizdat, 1950. – 47 с.
6. Lukas L.-D. Densite de metaux a haute temperature. // *Memoires Sci. Revue Metallurgie.*– 1972. – V.69. – №6. – P. 479 – 492.
7. Mathematical Model of Heat Flow and Austenite-Perlit Transformation in Eutectoid Carbon Steel Rods for Wire / K.A. Prakash, J.K. Brimacombe // *Metall. Trans.*– 1981. – V. 12. – P. 121 – 133.
8. Analysis of Temperature, Structure and Stress during Quenching of Steel with Consideration for Stress Dependence of Transformation Kinetics / Z. Wang, T. Inoue // *Journal of Society Mater. Sci., Japan*, 1983. – № 360. – P. 993 – 996.
9. Объемные изменения при отпуске закаленной углеродистой стали и природа третьего превращения / Э.З. Каминский, Д.Ш. Кацнельсон // *Журнал технической физики.* – 1945. – Т. 15. – Вып. 3. – С. 182 – 192.
10. Кристиан Дж. Теория превращений в металлах и сплавах. – М.: Мир, 1978. – Ч. 1. – 806 с.
11. Блантер М.Е. Теория термической обработки. – М. : *Металлургия*, 1984. – 328 с.
12. Арский В.Н. Время образования мартенситного кристалла // *Металловедение и обработка металлов.*– 1956. – № 11. – С. 26 – 29.
13. Арский В.Н. Микрокинетика мартенситного превращения // *Физика металлов и металловедение.*– 1958. – Т. 6. – Вып. 3. – С. 496 – 504.
14. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк.», 1967. – 599 с.
15. Применение кипящего слоя для термической и химико-термической обработки металлов / Н.Н. Варыгин, Е.Я. Ольшанов. // *Металловедение и термическая обработка металлов.*– 1971. – № 6. – С. 2 – 11.
16. Физические основы электротермического упрочнения стали / В.Н. Гриднев [и др.]. – Киев : Наук. думка, 1973. – 335 с.
17. Зубов, Структура и свойства стальной пружинной стали. / В.Я. Зубов, С.В. Грачев. – М. : *Металлургия*, 1964. – 224 с.

18. Влияние обычной и изотермической обработки на релаксационную стойкость пружинной стали / В.Я. Зубов, С.В. Грачев, А.Ф. Григорьев // Научные доклады высшей школы. – 1958. – № 21. – С. 249 – 255.

19. Релаксация напряжений при мартенситном превращении остаточного аустенита / В.Я. Зубов, С.В. Грачев, Я.А. Песин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1960. – № 5. – С. 115 – 120.

Работа представлена д.т.н., действительным членом Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, профессором кафедры вычислительной техники и прикладной математики Логуновой О.С.

Дата представления работы: 11.03.2011.

РОЛЬ МАССООБМЕНА В АКУСТИКЕ ВЛАЖНЫХ ПОРИСТЫХ СРЕД

Л.Ф.Ситдикова, В.Л.Дмитриев

ГОУ ВПО «Стерлитамакская государственная педагогическая академия им. Зайнаб Бишиевой»,

*Россия, 4531030, Республика Башкортостан, г. Стерлитамак,
пр. Ленина, д. 49
tact1988@rambler.ru*

Рассматривается распространение акустических волн в насыщенных газом пористых средах, с учетом межфазных сил взаимодействия, тепло- и массообмена между скелетом пористой среды, жидкостью и газом. Показана необходимость учета массообмена между жидкой и газовой фазами в отдельных случаях.

ROLE MASS EXCHANGE IN ACOUSTICS OF DAMP POROUS ENVIRONMENTS

L.F.Sitdikova, V.L.Dmitriev

Distribution of acoustic waves to the porous environments sated with gas, taking into account interphase forces of interaction, heat - and mass exchange between a skeleton of the porous environment, a liquid and gas is considered. Necessity of the account mass exchange between liquid and gas phases on occasion is shown.

Актуальность работы

Исследование свойств пористых сред акустическими методами весьма актуально, особенно с точки зрения определения их состава. При этом важно помнить, что тепловое взаимодействие между фазами

может оказывать существенное влияние на распространение акустических волн. С другой стороны, для влажных пористых сред может потребоваться проводить учет массообмена между газовой и жидкой фазами. В данной работе рассматривается возможность учета массообменных процессов в рамках ячеистой модели.

Основные уравнения

При описании распространения одномерных волн во влажной пористой среде примем следующие допущения: значения длин рассматриваемых волн намного больше размеров пор; скорости жидкой пленки и скелета при прохождении волны равны. В качестве характерных размеров среды примем средний радиус пор $-a_0$, среднюю толщину водной пленки $-h_0$ и среднюю полутолщину стенок пор $-b_0$.

Система уравнений, описывающих рассматриваемый процесс, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_l}{\partial t} + \rho_{l0} \frac{\partial v_l}{\partial x} &= -I, \quad \frac{\partial \rho_{vg}}{\partial t} + \rho_{vg0} \frac{\partial v_{vg}}{\partial x} = I, \quad \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \rho_{s0} \frac{\partial v_s}{\partial x} = 0, \\ \rho_{vg0} \frac{\partial v_{vg}}{\partial t} &= -\alpha_{vg0} \frac{\partial p_{vg}}{\partial x} - F, \quad \rho_{l0} \frac{\partial v_l}{\partial t} = -\alpha_{l0} \frac{\partial p_l}{\partial x} + F, \quad F = F_m + F_\mu + F_B, \\ \rho_{vg0} \frac{\partial v_{vg}}{\partial t} + \rho_{s0} \frac{\partial v_s}{\partial t} + \rho_{l0} \frac{\partial v_l}{\partial t} &= \alpha_{s0} \frac{\partial \sigma_s}{\partial x} - \alpha_{vg0} \frac{\partial p_{vg}}{\partial x} - \alpha_{l0} \frac{\partial p_l}{\partial x}, \\ p_l - p_{l0}^0 &= C_l^2 (\rho_l^0 - \rho_{l0}^0), \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{E_s} \frac{\partial \sigma_s}{\partial t} + \frac{\sigma_s}{\mu_s}, \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial v_s}{\partial x}, \\ p_{vg} &= \rho_{vg0}^0 B' T'_{vg}, \quad B' = B_v g' + B_g (1 - g'), \quad g' = \rho'_v / \rho_{vg}^0, \\ I &= 4\pi a_0^2 n_0 j, \quad \frac{\rho_{vg0}^0 D}{1 - g_0} \left(\frac{\partial g'}{\partial r} \right) = j. \end{aligned}$$

Здесь p_{vg} , p_l – давление в газовой и жидкой фазе; α_s , α_l и α_{vg} – объемные содержания твердой, жидкой и газовой фаз соответственно; σ_s – напряжение в скелете; F_m – сила присоединенных масс, вызванная инерционным взаимодействием фаз; F_μ – аналог силы вязкого трения Стокса, F_B – аналог силы Бассэ, проявляющейся при высоких частотах из-за нестационарности вязкого пограничного слоя около границы с твердой фазой [3]; μ_g – динамическая вязкость газа;

$\rho_j, \rho_j^0, v_j, p_j, \alpha_j, a$ – средняя по объему и средняя по фазе плотности, скорость, давление, объемные содержания, размер пор; I и j – интенсивности фазовых переходов, отнесенные к единице объема и к единице площади поверхности раздела фаз.

Дополнительным индексом (0) внизу снабжены параметры, соответствующие невозмущенному состоянию, а параметры без этого индекса выражают малые возмущения параметров от равновесного значения; верхний индекс (0) соответствует истинному значению параметра.

Для описания неоднородностей температуры произведем схематизацию структуры среды, используя ячеистую схему. При этом пористую среду, насыщенную газом, примем как систему сферических газовых пузырьков, окруженных слоем жидкости и материала скелета. Таким образом, в каждой макроскопической точке, определяемой координатой x , вводим типичную ячейку, состоящую из газового пузырька со слоем жидкости и приходящегося на него скелета. Внутри ячейки имеется распределение микропараметров, а именно температуры $T'_j(t, x, r)$ и плотности газа $\rho_{vg}^0(t, x, r)$, где r – микрокоордината, отсчитываемая от центра ячейки. В дальнейшем штрихами наверху снабжены микропараметры.

Распределения температур и паросодержания в ячейке пористой среды получим на основе системы уравнений теплопроводности:

$$\begin{aligned} \rho_{vg0}^0 c_{vg} \frac{\partial T'_{vg}}{\partial t} &= \lambda_{vg} r^{-2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T'_{vg}}{\partial r} \right) + \frac{\partial p_{vg}}{\partial t} - \\ &- \rho_{vg0}^0 (B_g - B_v) T_{vg0} \frac{\partial g'}{\partial t}, \quad (0 < r < a_0); \\ \frac{\partial g'}{\partial t} &= r^{-2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D r^2 \frac{\partial g'}{\partial r} \right), \quad (0 < r < a_0); \\ \rho_{l0}^0 c_l \frac{\partial T'_l}{\partial t} &= \lambda_l \frac{\partial^2 T'_{vg}}{\partial r^2} + l \frac{\partial g'}{\partial t} \rho_{l0}^0, \quad (a_0 < r < a_0 + h_0); \\ \rho_{s0}^0 c_s \frac{\partial T'_s}{\partial t} &= \lambda_s \frac{\partial^2 T'_s}{\partial r^2}, \quad (a_0 + h_0 < r < a_0 + b_0 + h_0), \end{aligned}$$

где λ_j и c_j – соответственно коэффициенты теплопроводности и удельной теплоемкости при постоянном давлении ($j = g, l, s$); g' – распределение массового паросодержания; D – коэффициент диффузии; l – удельная теплота парообразования.

Граничные условия для данной системы имеют вид:

$$\begin{aligned} T'_{vg} &= T'_l, \quad \lambda_l \frac{\partial T'_l}{\partial r} = \lambda_{vg} \frac{\partial T'_{vg}}{\partial r} + jl; \quad (r = a_0); \\ T'_l &= T'_s, \quad \lambda_s \frac{\partial T'_s}{\partial r} = \lambda_l \frac{\partial T'_l}{\partial r}; \quad (r = a_0 + h_0); \\ \frac{\partial T'_{vg}}{\partial r} &= 0, \quad \frac{\partial g'}{\partial t} = 0 \quad (r = 0); \quad \frac{\partial T'_s}{\partial r} = 0 \quad (r = a_0 + b_0 + h_0). \end{aligned}$$

Результаты расчета

Решение системы уравнений будем искать в виде затухающих бегущих волн:

$$\begin{aligned} \rho_j^0, v_j, p_j, a_j &\cong \exp[i(Kx - \omega t)], \quad g' = G(r) \exp[i(Kx - \omega t)], \\ T'_j &= T_j(r) \exp[i(Kx - \omega t)], \quad K = k + i\delta, \end{aligned}$$

где ω – круговая частота; K – комплексное волновое число; δ – коэффициент затухания.

После ряда преобразований, получим дисперсионное соотношение, на основе которого можно проанализировать распространение волн в среде.

В расчетах параметры фаз взяты при температуре среды 300 К. Для резины: $\rho_{s0}^0 = 920 \text{ кг/м}^3$, $E_s = 10^8 \text{ Па}$, $\lambda_s = 0,15 \text{ Дж/(м} \cdot \text{с} \cdot \text{К)}$, $c_s = 1571 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, $\mu_s = 10^8 \text{ Па} \cdot \text{с}$; для воздуха: $\rho_{vg0}^0 = 1,17 \text{ кг/м}^3$, $c_{vg} = 1006 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, $\lambda_{vg} = 0,027 \text{ Дж/(м} \cdot \text{с} \cdot \text{К)}$, $\gamma = 1,4$, $\mu_{vg} = 1,86 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$; для воды: $\rho_{l0}^0 = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\lambda_s = 0,6 \text{ Дж/(м} \cdot \text{с} \cdot \text{К)}$, $c_l = 4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$, $C_l = 1500 \text{ м/с}$.

На рис. 1 представлены зависимости коэффициента затухания δ и фазовой скорости C_p «медленной» (сплошные линии 1, 2) и «быстрой» (штриховые линии 1, 2) волн от частоты. Здесь и далее все графики построены с учетом межфазных сил. Линии 1 построены с учетом массо- и теплообмена, линии 2 – с учетом теплообмена. Характерные размеры среды $a_0 = 10^{-3} \text{ м}$, $b_0 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}$, $h_0 = 10^{-5} \text{ м}$.

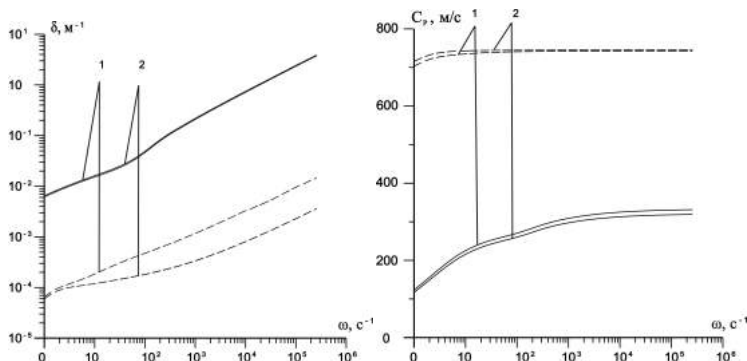


Рис. 1. Влияние массообмена на затухание и фазовые скорости «быстрой» и «медленной» волн в пористой среде, насыщенной воздухом

Видно, что учет массообмена практически не влияет на затухание «медленной» волны; на затухание «быстрой» волны, напротив, оказывается значительное влияние. Скорость «медленной» волны в случае учета массообмена возрастает на 10-15 м/с по сравнению со случаем, когда массообмен не учитывается; различие в скоростях «быстрой» волны имеет место только в области низких частот.

Эти результаты можно объяснить следующим образом. При распространении волны происходит некоторое изменение температуры в ячейках среды. В результате общая упругость скелета и жидкости может уменьшаться, а значит, это приведет к росту затухания быстрой волны. Так как роль теплообмена растет в области более высоких частот [4], то и затухание быстрой волны также растет с ростом частоты. Массообмен также приводит к дополнительному росту плотности и упругости парогазовой фазы, что и приводит к увеличению скорости «быстрой» волны.

На рис. 2 показано влияние толщины водной пленки на характер распространения «медленной» (сплошные линии 1, 2) и «быстрой» (штриховые линии 1, 2) волны. Линии 1 соответствуют толщине водной пленки $h_0 = 10^{-5}$ м, линии 2 – $h_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ м, остальные параметры те же, что и для рис. 1, произведен учет тепло- и массообмена.

Видно, что толщина слоя водной пленки сильно влияет на затухание и скорость «быстрой» волны: так, для $h_0 = 10^{-5}$ м коэффициент затухания «быстрой» волны больше на порядок, чем для $h_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ м. Соответственно скорость «быстрой» волны меньше. Скорость «медленной» волны изменяется при этом незначительно.

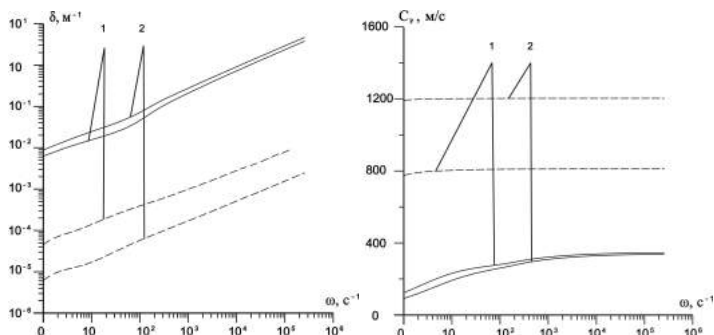


Рис. 2. Влияние толщины слоя водной пленки на характер распространения «медленной» (сплошные линии) и «быстрой» (штриховые линии) волн

Заключение

В целом по проведенным исследованиям можно заключить, что в зависимости от характерных размеров пор среды и диапазонов частот, на распространение акустических волн основополагающее влияние могут оказывать как теплообменные, так и массообменные процессы, а также тепло- и массообменные процессы в совокупности.

Список литературы

1. Распространение линейных волн во влажных насыщенных газом пористых средах / С.В. Володин, В.Л. Дмитриев, И.Г. Хусаинов // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47. – №5. – С. 734 – 740.
2. Распространение слабых возмущений в трещиновато-пористых средах / А.А. Губайдуллин, О.Ю. Кучугурина // ПММ. – 1999. – Т.63. – Вып. 5. – С. 816 – 825.
3. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Ч. 1. – 464 с.
4. Распространение линейных волн в насыщенных газом пористых средах с учетом межфазного теплообмена / В.Ш. Шагапов, И.Г. Хусаинов, В.Л. Дмитриев // ПМТФ. – 2004. – Т. 45. – № 4. – С. 114 – 120.

Работа представлена заведующим кафедрой прикладной математики и механики Стерлитамакской государственной педагогической академии им. Зайнаб Бишевой, д. ф.-м. н., профессором Гималетдиновым И.К.

Дата представления работы: 13.04.2011.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПРИ ТОРМОЖЕНИИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНИХ ТЕМПЕРАТУР ТОРМОЗНОГО БАРАБАНА И ФРИКЦИОННЫХ НАКЛАДОК

Н.А. Вольченко, П.А. Поляков

*ГОУ ВПО «Кубанский государственный технологический
университет»*

*Россия, 350062, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2
polyakov.pavel2012@yandex.ru*

Современная тепловая динамика трения фрикционных узлов тормозных устройств в состоянии дать ответы на вопросы о том, каким образом: происходит преобразование механической энергии в тепловую; определяется количество теплоты генерируемое на парах трения; происходит изменение средних температур пар трения и на многое другое.

MATHEMATICAL MODELING OF ROAD VEHICLES BRAKES ENERGY BALANCE AND FINDING OF HIGH TEMPERATURE BRAKE DRUM AND THE FRICTION LININGS

N.A. Volchenko, P.A. Polyakov

Modern thermal dynamics of friction braking device nodes are able to give answers to questions about conversion of mechanical energy into heat, determined of the amount of heat generated by friction couple, there is a changing in of average temperatures of friction pairs and much more.

Актуальность работы

В связи с возрастающим скоростями движения автотранспортных средств предъявляются более жесткие требования к колесным тормозным механизмам, такие как тормозной путь автомобиля, тормозной момент. Тормозные механизмы работают при высоких динамических и тепловых нагрузках. В связи с этим обстоятельством необходимо разработать методы расчета теплонагруженности пар трения тормозов.

Основные проблемы

Для определения генерируемой теплоты на парах трения тормозных устройств необходимо записать уравнение энергетического баланса заторможенного автомобиля:

$$\Delta T_K = Q_{z.n.} + A_t + A_{\phi}, \quad (1)$$

где ΔT_K – уменьшение кинетической энергии автомобиля при торможении, Дж;

A_i – суммарная работа сил трения в двигателе и трансмиссии, сил сопротивления движению, Дж;

$Q_{с.л.}$ – энергия, преобразуемая тормозными механизмами в тепло при однократном торможении (суммарная работа сил трения в тормозных механизмах), Дж;

A_ϕ – работа сил трения скольжения в контакте шин с дорогой, Дж:

$$A = A'_\tau + A_f + A_w, \quad (2)$$

где A'_τ – работа сил трения в двигателе на режиме принудительного холостого хода и агрегатах трансмиссии, Дж;

A_f, A_w – работа сил сопротивления качению и сил сопротивления воздуху соответственно, Дж.

После подстановки уравнение энергетического баланса заторможенного автомобиля имеет вид:

$$\frac{m_a}{2} \cdot (v_H^2 - v_K^2) = Q_{с.л.} + \frac{J_\Sigma \cdot \tau \cdot \delta_{ep}}{\omega_\kappa \cdot S} + m_a \cdot g \cdot \psi \cdot S + k \cdot F \cdot v_a^2 \cdot S + m_a \cdot g \cdot \phi \cdot S, \quad (3)$$

где m_a – полная масса автомобиля, кг;

v_H – начальная скорость автомобиля, м/с;

v_K – конечная скорость автомобиля, м/с;

J_Σ – суммарный момент инерции, кг м²;

τ – время торможения, с;

δ_{ep} – коэффициент учета инерции вращающихся масс;

S – тормозной путь, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

ψ – коэффициент сопротивления дороги;

k – коэффициент сопротивления воздуха, Н с²/м⁴;

F – площадь лобового сечения автомобиля, м²;

ϕ – коэффициент сцепления.

Определим энергию, преобразуемую в тепло всеми тормозными механизмами автомобиля, в случае однократного торможения на горизонтальной дороге.

$$Q_{с.л.} = \frac{m_a}{2} \cdot j \cdot \frac{(V_H + V_K)}{2} \cdot d\tau - \frac{J_\Sigma \cdot d\tau \cdot \delta_{ep}}{\omega_\kappa \cdot S} - m_a \cdot g \cdot \psi \cdot v_a \cdot d\tau - k \cdot F \cdot v_a^3 \cdot d\tau - m_a \cdot g \cdot \phi \cdot v_a \cdot d\tau. \quad (4)$$

Количество теплоты, генерируемой на рабочих поверхностях пар трения тормозного механизма, распределяется между тормозным барабаном и фрикционными накладками в соответствии с коэффициентом распределения тепловых потоков σ . То есть количество теплоты, поглощаемое тормозным барабаном, будет равна

$$Q_{\delta} = \sigma \cdot (1 - \gamma) \cdot \left(\frac{m_a}{2} \cdot j \cdot \frac{(V_H + V_K)}{2} - \frac{J_{\Sigma} \cdot d\tau \cdot \delta_{op}}{\omega_K \cdot S} - m_a \cdot g \cdot \psi \cdot v_a - k \cdot F \cdot v_a^4 - m_a \cdot g \cdot \varphi \cdot v_a \right) \cdot d\tau = \Delta U d\tau, \quad (5)$$

где j – среднее замедление автомобиля, создаваемое суммарным сопротивлением его движению, м/с²;

γ – коэффициент распределения тормозных сил между осями автомобиля;

ΔU – тепловой поток, Дж/с.

$$Q_{\delta} = \frac{m_a \cdot g \cdot \sigma \cdot V_c \cdot (\sin i - f') \cdot (1 - \gamma) d\tau}{2} = \Delta U d\tau \quad (6)$$

Тогда количество теплоты, поглощаемое тормозной колодкой и фрикционными накладками, будет равна

$$Q_K = (1 - \sigma) \cdot (1 - \gamma) \times \\ \times \left(\frac{m_a}{2} \cdot j \cdot \frac{(V_H + V_K)}{2} - \frac{J_{\Sigma} \cdot d\tau \cdot \delta_{op}}{\omega_K \cdot S} - m_a \cdot g \cdot \psi \cdot v_a - k \cdot F \cdot v_a^4 - m_a \cdot g \cdot \varphi \cdot v_a \right) \cdot d\tau = \Delta U d\tau. \quad (7)$$

$$Q_K = \frac{m_a \cdot g \cdot V_c \cdot (\sin i - f') \cdot (1 - \gamma) \cdot (1 - \sigma) d\tau}{2} = \Delta U d\tau. \quad (8)$$

Для определения количества теплоты, отводимого от поверхности обода тормозного барабана площадью $F_{об}^K$, следует воспользоваться законом Ньютона-Рихмана.

$$Q^K = \alpha \cdot (T_{об} - T_{нов}) \cdot F_{об}^K \cdot d\tau, \quad (9)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/К м²;

$T_{об}$ – температура обода тормозного барабана, К;

$T_{нов}$ – температура поверхности тормозного барабана, К.

К боковой стенке теплота отводится посредством кондуктивного теплообмена. Согласно закону Фурье [76] количество теплоты, отводимое от боковой поверхности обода тормозного барабана площадью $F_{об}^i$ к боковой стенке длиной h , находится

$$Q^{ic} = \frac{\lambda \cdot d (T_{об} - T_{обc}) \cdot F_{обc}^i d\tau}{dh}, \quad (10)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала тормозного барабана, Вт/К м;

$T_{обc}$ – температура боковой стенки тормозного барабана, К.

При наличии лучевого теплообмена на некоторой части поверхности барабанно-колодочного тормоза S_{σ} для нахождения граничных условий третьего рода применим закон Стефана-Больцмана.

$$Q^{\sigma} = \sigma_{сб} \cdot \varepsilon \cdot (T^4 - T_{нов}^4) \cdot F_{об}^{\sigma} d\tau, \quad (11)$$

где $\sigma_{сб}$ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м² К⁴;

ε – степень черноты;

T – температура абсолютно черного тела, К;

$F_{об}^{\sigma}$ – площадь поверхности лучистого теплообмена, м².

Количество теплоты, аккумулируемой ободом тормозного барабана (боковой стенкой), определяется с помощью зависимости

$$Q_{об(бс)} = m_{об(бс)} \cdot c_{об(бс)} \cdot dT_{об(бс)}, \quad (12)$$

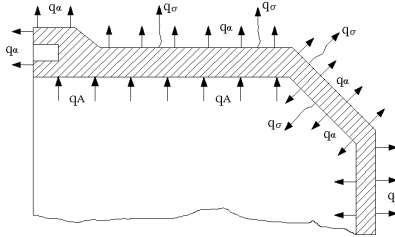
где $m_{об(бс)}$ – масса обода тормозного барабана (боковой стенки), кг;
 $c_{об(бс)}$ – теплоемкость материала обода тормозного барабана (боковой стенки), Дж/кг К.

Тепловой поток, воспринимаемый тормозным барабаном, равен

$$Q_{\delta} = Q^{бс} + Q_{об} + Q^* + Q^{\gamma}. \quad (13)$$

Чтобы решить математическую модель приближенными аналитическим или численным методом, необходимо ее преобразовать таким образом, чтобы незначительно повлиять на точность оценки теплового состояния барабанного тормоза и одновременно упростить процесс нахождения его параметров.

На рисунке показаны тепловые потоки, образующиеся вследствие трения при торможении, при этом q_A подводится к рабочей поверхности и аккумулируется в объеме тормозного барабана. Часть теплового потока отводится конвекцией q_a и излучением q_{σ} в окружающую среду.



Тепловые потоки в тормозном барабане

При решении математической модели тепловых процессов в барабанном тормозе пренебрегаем лучевым теплообменом, считая, что его влияние незначительно. Подставив (8)-(9) и (11) в (12), получили следующую зависимость для тормозного барабана:

$$\Delta U d\tau = m_{бс} \cdot c \cdot d(T_{бс} - T_0) + m_{об} \cdot c \cdot d(T_{об} - T_0) - \alpha \cdot ((T_{об} - T_0) - (T_{ном} - T_0)) \cdot F_{\delta} \cdot d\tau, \quad (14)$$

Тепловой баланс для боковой стенки описывается с помощью закона Фурье

$$\lambda \frac{d\left(\frac{T_{бс} - T_0}{dh}\right)}{dh} V_{бс} = m_{бс} \cdot c \cdot \frac{d(T_{бс} - T_0)}{d\tau}, \quad (15)$$

После замены в (15) дифференциала $\frac{d(T_{бс} - T_0)}{dh}$ на $\frac{\Delta(T_{бс} - T_0)}{h}$ и вынесения h из под дифференциала можно получить следующее:

$$\lambda \cdot \frac{d(T_{o\delta} - T_{\delta c} - T_0 + T_0)}{d\tau} \cdot V_{\delta c} = m_{\delta c} \cdot c \cdot \frac{d(T_{\delta c} - T_0)}{d\tau}, \quad (16)$$

где $V_{\delta c}$ – объем боковой стенки, м³.

Уравнение (15) не имеет решения. Для нахождения приближенного решения следует записать:

$$d(T_{o\delta} - T_{\delta c} - T_0 + T_0) = d(T_{o\delta} - T_0) - d(T_{\delta c} - T_0). \quad (17)$$

$$d(T_{o\delta} - T_0) = \Delta(T_{o\delta} - T_0). \quad (18)$$

$$d(T_{\delta c} - T_0) = \Delta(T_{\delta c} - T_0). \quad (19)$$

Поскольку осуществленные преобразования снижают точность результата, целесообразно ввести коэффициент уточнения ψ , с помощью которого согласуется характер искомой зависимости с результатами эксперимента и математического моделирования. После упрощения получаем

$$\frac{\psi \cdot h \cdot dh}{(\Delta(T_{o\delta} - T_0) - \Delta(T_{\delta c} - T_0)) \cdot \lambda \cdot V_{\delta c}} = \frac{d\tau}{\Delta(T_{\delta c} - T_0) \cdot m_{\delta c} \cdot c}. \quad (20)$$

После интегрирования равенства (20) получаем

$$\frac{\tau}{\Delta(T_{\delta c} - T_0) \cdot m_{\delta c} \cdot c} - \frac{\psi \cdot h^2}{2\lambda \cdot V_{\delta c} (\Delta(T_{o\delta} - T_0) - \Delta(T_{\delta c} - T_0))} + C_1. \quad (21)$$

Начальными условиями являются $\tau = 0$, $h = 0$. Поэтому $C_1 = 0$. В результате равенство (21) приобрело вид

$$\Delta(T_{\delta c} - T_0) = \frac{\Delta(T_{o\delta} - T_0)}{\left(1 + \frac{\psi \cdot h^2 \cdot \rho \cdot c}{2\tau \cdot \lambda}\right)}, \quad (22)$$

где ρ – плотность материала боковой стенки тормозного барабана, кг/м³.

Превратив полученное значение (22) в дифференциальный вид и подставив его в уравнение теплового баланса (14), имеем

$$\Delta U d\tau = \frac{m_{\delta c} \cdot c \cdot \Delta(T_{o\delta} - T_0)}{\left(1 + \frac{\psi \cdot h^2 \cdot \rho \cdot c}{2\tau \cdot c}\right)} + m_{o\delta} \cdot c \cdot d(T_{o\delta} - T_0) - \alpha \cdot ((T_{o\delta} - T_0) - (T_{нов} - T_0)) \cdot F_{\delta} \cdot d\tau. \quad (23)$$

После группировки составляющих зависимости (23) получаем

$$\frac{d(T_{o\delta} - T_0)}{\Delta U - \alpha \cdot (\Delta(T_{o\delta} - T_0) - \Delta(T_{нов} - T_0)) \cdot F_{\delta}} = \frac{d\tau}{\left(\frac{m_{\delta c} \cdot c}{\left(\frac{\psi \cdot h^2 \cdot \rho \cdot c}{2\lambda \cdot \tau} + 1\right)} + m_{o\delta} \cdot c\right)}. \quad (24)$$

Преобразуем

$$\frac{d(T_{o\delta} - T_0)}{\Delta U - \alpha \cdot (\Delta(T_{o\delta} - T_0) - \Delta(T_{нов} - T_0)) \cdot F_{\delta}} = \frac{(\psi \cdot h^2 \cdot \rho \cdot c + 2\lambda \cdot \tau) d\tau}{(2\lambda \tau (m_{\delta c} \cdot c + m_{o\delta} \cdot c) + m_{o\delta} \cdot c^2 \cdot \psi \cdot h^2 \cdot \rho)}. \quad (25)$$

При интегрировании заменим $2\lambda\tau(m_{\delta c} \cdot c + m_{o\delta} \cdot c) + m_{o\delta} \cdot c^2 \cdot \psi \cdot h^2 \cdot \rho = t$, тогда

$$\tau = \frac{t - m_{o\delta} \cdot c^2 \cdot \psi \cdot h^2 \cdot \rho}{2\lambda(m_{\delta c} \cdot c + m_{o\delta} \cdot c)}, \quad d\tau = \frac{dt}{2\lambda(m_{\delta c} \cdot c + m_{o\delta} \cdot c)}.$$

$$\int \frac{d(T_{o\delta} - T_0)}{\Delta U - \alpha \cdot F_{\delta} \cdot (\Delta(T_{o\delta} - T_0) - \Delta(T_{нов} - T_0))} = \int \frac{(\psi \cdot h^2 \cdot \rho \cdot c^2 \cdot 2\lambda \cdot m_{o\delta} + 2\lambda t) dt}{(m_{\delta c} \cdot c \cdot 2\lambda + m_{o\delta} \cdot c \cdot 2\lambda)^2 t}. \quad (26)$$

Принтегрировав обе части равенства (26), получаем

$$\frac{\ln(\Delta U - \alpha \cdot F_{\delta} \cdot (T_{o\delta} - T_0) + \alpha \cdot F_{\delta} \cdot (T_{нов} - T_0))}{-\alpha \cdot F_{\delta}} = \frac{\psi \cdot h^2 \cdot \rho \cdot m_{\delta c}}{2\lambda \cdot (m_{\delta c} + m_{o\delta})^2} \times$$

$$\times \ln(2\lambda \cdot c \cdot \tau(m_{\delta c} + m_{o\delta}) + m_{o\delta} \cdot \psi \cdot h^2 \cdot \rho \cdot c^2) + \frac{\tau}{(m_{\delta c} + m_{o\delta}) \cdot c} + \frac{\psi \cdot h^2 \cdot \rho \cdot m_{o\delta}}{2\lambda \cdot (m_{\delta c} + m_{o\delta})^2} + C_2. \quad (27)$$

Для нахождения C_2 следует задаться начальным условием (при $\tau = 0$, $T_{o\delta} = T_0$). Тогда, подставив ее в выражение (27), получаем

$$C_2 = \frac{\ln(\Delta U + \alpha \cdot F_{\delta} \cdot (T_{нов} - T_0))}{-\alpha \cdot F_{\delta}} - \frac{\psi \cdot h^2 \cdot \rho \cdot m_{\delta c}}{2\lambda \cdot (m_{o\delta} + m_{\delta c})^2} \ln(m_{o\delta} \cdot c^2 \cdot \psi \cdot h^2 \cdot \rho) - \frac{\psi \cdot h^2 \cdot \rho \cdot m_{o\delta}}{2\lambda \cdot (m_{o\delta} + m_{\delta c})^2} \quad (28)$$

После подстановки значения C_2 окончательно записываем уравнение теплового баланса

$$\frac{\ln(\Delta U - \alpha \cdot F_{\delta} \cdot (T_{o\delta} - T_0) + \alpha \cdot F_{\delta} \cdot (T_{нов} - T_0))}{-\alpha \cdot F_{\delta}} = \frac{\psi \cdot h^2 \cdot \rho \cdot m_{\delta c}}{2\lambda \cdot (m_{\delta c} + m_{o\delta})^2} \cdot \ln(2\lambda \cdot c \cdot \tau(m_{\delta c} + m_{o\delta}) + m_{o\delta} \cdot \psi \cdot h^2 \cdot \rho \cdot c^2) +$$

$$\frac{\tau}{(m_{\delta c} + m_{o\delta}) \cdot c} + \frac{\psi \cdot h^2 \cdot \rho \cdot m_{o\delta}}{2\lambda \cdot (m_{\delta c} + m_{o\delta})^2} + \frac{\ln(\Delta U + \alpha \cdot F_{\delta} \cdot (T_{нов} - T_0))}{-\alpha \cdot F_{\delta}} - \frac{\psi \cdot h^2 \cdot \rho \cdot m_{\delta c}}{2\lambda \cdot (m_{o\delta} + m_{\delta c})^2} \ln(m_{o\delta} \cdot c^2 \cdot \psi \cdot h^2 \cdot \rho) -$$

$$- \frac{\psi \cdot h^2 \cdot \rho \cdot m_{o\delta}}{2\lambda \cdot (m_{o\delta} + m_{\delta c})^2}. \quad (29)$$

Преобразуем

$$\frac{\ln\left(1 - \frac{\alpha \cdot F_{\delta} \cdot (T_{o\delta} - T_0)}{\Delta U + \alpha \cdot F_{\delta} \cdot (T_{нов} - T_0)}\right)}{-\alpha \cdot F_{\delta}} = \frac{\psi \cdot h^2 \cdot \rho \cdot m_{\delta c}}{2\lambda \cdot (m_{\delta c} + m_{o\delta})^2} \times \ln\left(\frac{2\lambda \cdot \tau(m_{\delta c} + m_{o\delta})}{m_{o\delta} \cdot c \cdot \psi \cdot h^2 \cdot \rho} + 1\right) + \frac{\tau}{(m_{\delta c} + m_{o\delta}) \cdot c}. \quad (30)$$

Таким образом, окончательное уравнение имеет следующий вид:

$$T_{o\delta} = \frac{\left(1 - e^{\frac{-\alpha F_{\delta} \psi h^2 \rho m_{\delta c}}{2\lambda(m_{\delta c} + m_{o\delta})^2}} \left(1 + \frac{2\lambda \cdot \tau(m_{\delta c} + m_{o\delta})}{m_{o\delta} \cdot c \cdot \psi \cdot h^2 \cdot \rho}\right) + e^{\frac{\alpha F_{\delta} \tau}{(m_{\delta c} + m_{o\delta}) \cdot c}}\right) (\Delta U + \alpha \cdot F_{\delta} \cdot (T_{нов} - T_0))}{\alpha \cdot F_{\delta}} + T_0. \quad (33)$$

Заключение

Анализ выражения (33) показывает, что значения средних температур обода тормозного барабана зависит от его термодинамических

параметров ($\alpha, \lambda, T_{нов}, c, T_0$), удельных массовых и геометрических параметров ($m_{бс}, m_{об}, F_{б}, h$) элементов тормозного барабана.

Список литературы

1. Алексеев Г.Н. Общая теплотехника. – М.: Высш. шк., 2005. – 552 с.

2. Богатырев А.В. Автомобили. – М.: Колос, 2001. – 496 с.

Работа представлена профессором кафедры «Техническая механика» Кубанского государственного технологического университета, д. т. н. С.Б. Бережной.

Дата представления работы: 13.04.2011.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЯ МАТЬЕ В ПЕРВОЙ ОБЛАСТИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ

А.В. Нестеров, С.В. Нестеров

*ГОУ ВПО «Кубанский государственный технологический
университет»,*

*Россия, 350072, г. Краснодар, ул. Московская, д. 2
nesterov@kubstu.ru*

В работе представлены результаты исследования однородного уравнения Матье. В ходе вычислительного эксперимента установлена зависимость устойчивых решений названного уравнения от соотношения его коэффициентов. Предложено найденную зависимость изображать графически в виде линий равной амплитуды (изоамплитуд). Разработанная модифицированная диаграмма Айнса-Стретта, отличающаяся от обычной диаграммы наличием изоамплитуд, и соответствующая методика ее использования при выборе коэффициентов уравнения Матье, при которых устойчивые решения уравнения принадлежат области допустимых значений.

THE RESEARCH OF MATHIEU EQUATION SOLUTION OF THE FIRST STABILITY REGION AT MODELING OF NON-STATIONARY OBJECTS OF CONTROL

A.V. Nesterov, S.V. Nesterov

In this work the research results of homogeneous Mathieu equation are presented. During computational experiment the dependence of stable solution of mentioned equation on its ratio relation was found. It was offered to represent the found dependence graphically as lines of equal amplitude

(isoamplitudes). Ince-Strutt modified diagram is worked out. This diagram differs from usual diagram by the presence of isoamplitudes and corresponding method of its usage during selection of Mathieu equation ratio when stable equation solution belong to the region of allowed values.

Актуальность работы

Важность указанных в названии статьи исследований объясняется широким использованием уравнения Матье в качестве математической модели нестационарных объектов управления (ОУ). Для значительной части из них (ОУ промышленного назначения [2]) нормальное функционирование означает устойчивость последнего. Это обстоятельство актуализирует настоящие исследования.

Основные проблемы

С математической точки зрения однородное уравнение Матье

$$\ddot{y} + (a + 2q \cos 2\tau)y = 0$$

изучено достаточно полно. Однако есть несколько нерешенных задач из области технических приложений. Одна из проблем, которая составляет предмет настоящих исследований, связана с малой изученностью решений уравнения Матье в первой области устойчивости диаграммы Айнса-Стретта. Известно, что названные решения $y(\tau)$ всегда имеют колебательный характер. График такой функции $y(\tau)$ изображает колебания, модулированные по амплитуде A и частоте ω (рис. 1).

При исследовании первой области устойчивости ранее была обнаружена зависимость амплитуды колебаний A от коэффициентов уравнения a и q [1]. Установлено также, что амплитуда A тем меньше, чем ближе названные коэффициенты к нулю. Однако при этом возникает серьезный вопрос: если условие $a \rightarrow 0$ и $q \rightarrow 0$ выполнить технически невозможно, то при каких значениях коэффициентов a и q можно добиться минимума колебаний ($A \rightarrow \min$).

Цель работы

Проблему минимизации A допустимо упростить и рассматривать ее как техническую задачу выбора коэффициентов a и q (параметров ОУ), при которых амплитуда A не будет превышать допустимого значения $A_{\text{доп}}$. Ясно, что найти такие коэффициенты, при которых выполняется условие

$$A < A_{\text{доп}},$$

легче, чем искать минимум $A = \min$. Далее, с практической точки зрения решение этой проблемы целесообразно представить графиче-

ски. Для этого следует непосредственно на диаграмме Айнса-Стретта изобразить зависимости амплитуды A от коэффициентов уравнения Матье. В связи с этим целью данной работы является модернизация диаграммы Айнса-Стретта.

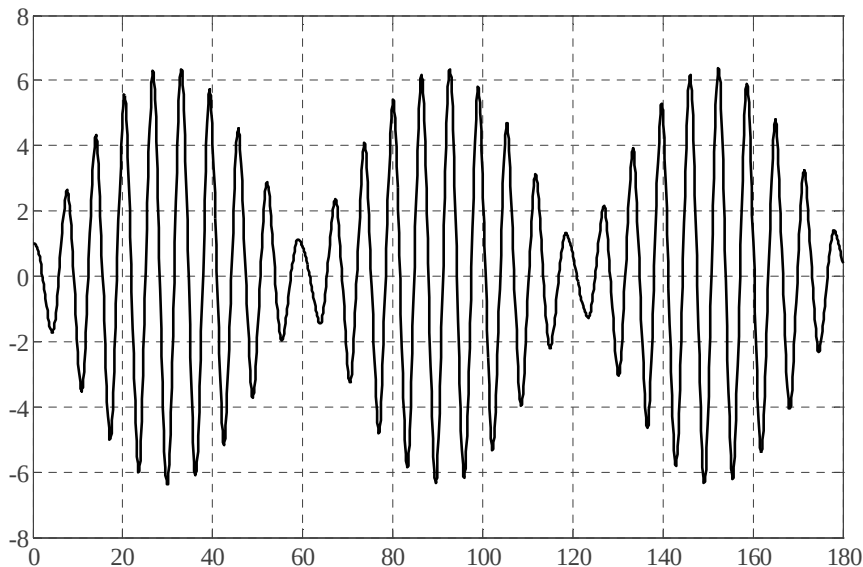


Рис. 1. График устойчивого решения уравнения Матье $y(\tau)$

Результаты вычислительного эксперимента

Уравнение Матье не имеет точного решения. Приближенное его решение $y(\tau)$ можно получить вручную, например методом Хилла [3], или найти одним из численных методов с помощью компьютера.

Ниже приведены результаты вычислительного эксперимента, выполненного в системе компьютерной математики MATLAB с использованием «жесткого» решателя ode23tb. Суть эксперимента заключается в решении задачи Коши для уравнения Матье, приведенного к нормальной форме:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2; \\ \dot{x}_2 &= -(a + 2q \cos 2\tau)x_1, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $y = x_1$.

Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений (1) произведено при начальных условиях

$$\left. \begin{aligned} x_1(0) &= 1; \\ x_2(0) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Диапазон изменения коэффициентов a и q соответствует «размерам» первой области устойчивости диаграммы Айнса-Стретта [3], т.е.

$$\left. \begin{aligned} 0 < a < 1; \\ 0 < q < 1. \end{aligned} \right\}$$

Одно из полученных решений $y(\tau)$ при $a = 0,675$ и $q = 0,3$ изображено на рис.1.

Анализ функций $y(\tau)$ свидетельствует о зависимости амплитуды A от коэффициентов уравнения Матье a и q , а также их соотношения. Наглядно эту зависимость выражают линии равной амплитуды $A = \text{const}$ (изоамплитуды). На рис. 2 семейство изоамплитуд совмещено с диаграммой Айнса-Стретта. В разрывах линий указаны соответствующие амплитуды. Границы первой области неустойчивости обозначены пунктирными линиями.

Такая (модифицированная) диаграмма Айнса-Стретта может служить инструментом выбора коэффициентов a и q (параметров ОУ). Если при этом должно выполняться условие $A < A_{\text{доп}}$, то допустимому значению $A_{\text{доп}}$ на усовершенствованной диаграмме соответствует изоамплитуда $A = \text{const}$. Последняя делит диаграмму на две части. Та из них, которая расположена под изоамплитудой, может быть названа областью допустимых значений.

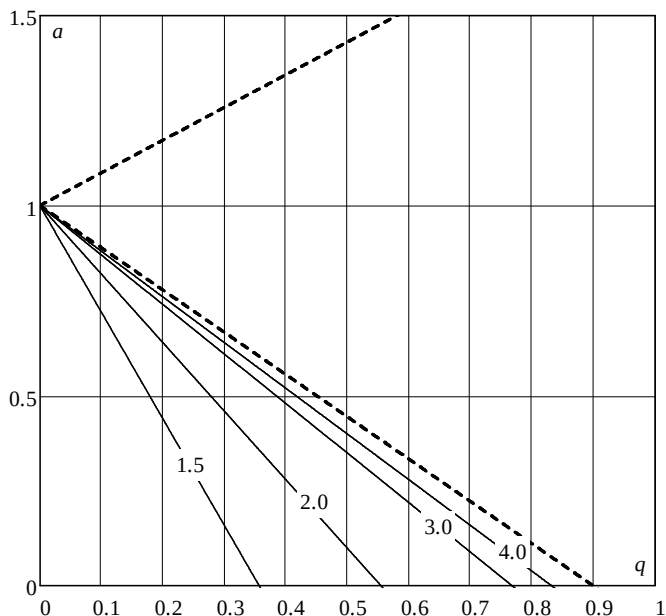


Рис. 2. Модифицированная диаграмма Айнса-Стретта

В свою очередь, искомым коэффициентам a и q допустимо поставить в соответствие характеристическую точку N , которую можно нанести на диаграмму Айнса-Стретта, считая a и q ее координатами. с *изоамплитудами*

Очевидно, что при выполнении условия $A < A_{\text{доп}}$ характеристическая точка N должна быть левее линии равной амплитуды $A = A_{\text{доп}}$. С другой стороны, зная коэффициенты a и q , легко определить амплитуду по положению характеристической точки N . Некоторая погрешность результата компенсируется простотой метода. Более точное значение A можно получить по формуле

$$A = 6,606[(1 - a)/q]^{-1,647} \quad (3)$$

или по графику, изображенному на рис. 3.

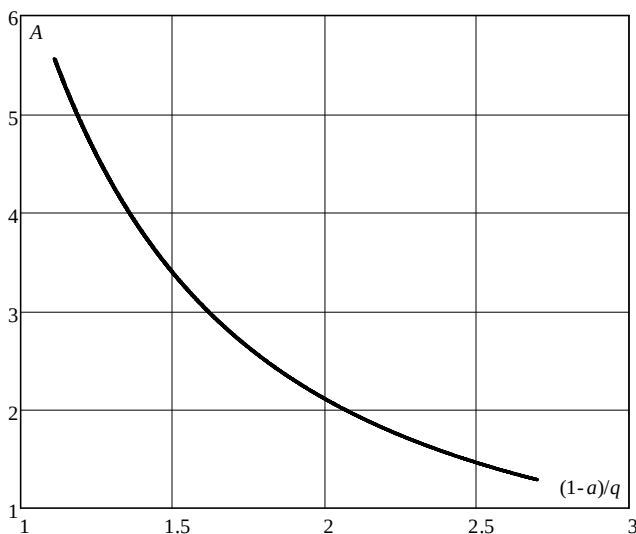


Рис. 3. График зависимости амплитуды A от соотношения коэффициентов a и q

Модифицированной диаграммой можно пользоваться и при других начальных условиях:

$$x_1(0) = k;$$

$$x_2(0) = 0.$$

Любое отличие от «единичных» начальных условий (2) вызывает адекватное изменение амплитуды A в k раз. Поэтому при определении A непосредственно по рис. 2 или 3, а также по формуле (3) конечный результат следует принимать со множителем k .

Заключение

Таким образом, поставленная выше цель исследований достигнута. В результате анализа устойчивых решений уравнения Матье предложена модифицированная диаграмма Айнса-Стретта. Построенные в первой области устойчивости диаграммы изоамплитуды позволяют графически получить приближенную оценку амплитуды колебательных решений уравнения Матье без его интегрирования. Кроме того, даны конкретные рекомендации по выбору коэффициентов уравнения Матье (параметров ОУ), обеспечивающих ограничение амплитуды колебательных решений допустимым значением.

Список литературы

1. Исследование параметрических колебаний в электромеханических системах с переменным моментом инерции / А.В. Басси, А.В. Нестеров, С.В. Нестеров // Труды XVIII Междунар. Интернет-конференции молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС-2006). – М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2006. – С. 166.

2. Электропривод роторного зернистого фильтра и сирены / Ю.П. Добробаба, А.В. Нестеров, С.В. Нестеров. – СПб.: Энергоатомиздат, 1991. – 48 с.

3. Мак-Лаклан Н.В. Теория и приложения функций Матъе. – М.: Изд-во иностр. лит., 1953. – 475 с.

Работа представлена к. ф-м. н., доцентом, заведующим кафедрой общей математики Кубанского государственного технологического университета Терещенко И.В.

Дата представления работы: 06.04.2011.

АЛГОРИТМ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕСУРСАМИ НА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТАХ ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ И ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

И.С. Наумов

*ГОУ ВПО «Пермский государственный технический университет»,
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр. д.29
igor14-88@list.ru*

Описана проблема в управлении ресурсами при чрезвычайных ситуациях и необходимость автоматизировать процесс принятия решений по их распределению. Приведена модель, при помощи которой определяется тип и количество агрегатов каждого типа для объектов при локализации и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

ALGORITHM OF DECISION-MAKING IN SYSTEM OF MAINTENANCE WITH RESOURCES ON INDUSTRIAL TARGETS FOR LOCALIZATION AND LIQUIDATION OF EMERGENCY

I.S. Naumov

The problem in resource management is described at emergency and necessity to automate decision-making process on their distribution. Deduce the model with which help it is defined the type and number of units of each type of objects for localization and liquidation of emergency.

Актуальность работы

Для устойчивого развития любого предприятия и страны в целом необходимо принятие мер по сокращению ущерба, причиняемого чрезвычайными ситуациями (ЧС), и количества ресурсов, используемых при их предупреждении и ликвидации.

Необходимо совершенствование систем управления, ориентированных на локализацию и ликвидацию ЧС. Основными критериями формирования оптимального плана по предупреждению и ликвидации последствий ЧС являются минимум ущерба; минимум общих затрат на реализацию превентивных мероприятий; минимум общего времени реализации оперативных мероприятий по ликвидации ЧС и ее последствий.

Решение проблемы

Предложена концептуальная модель совершенствования и функционирования системы обеспечения ресурсами, на основании которой разработана методическая схема решения задачи, предполагающей автоматизацию процесса управления ресурсами:

- обоснование рационального объема бюджетного финансирования; типов и количества ресурсов, размещаемых в системе обеспечения ресурсами;
- обоснование иерархии структуры систем обеспечения ресурсами и соответствующего расположения центрального пункта с учетом инфраструктуры района функционирования;
- обоснование порядка определения потенциальной опасности объектов для противодействия возможным ЧС, на которых создается система;
- обоснование размещения ресурсов по элементам системы;
- обоснование эффективной стратегии функционирования системы.

Общее содержание математической модели:

Рассмотрим N пространственно распределенных объектов, на которых с вероятностью $P_i (i = \overline{1, N})$ могут возникнуть ЧС. ЧС на i -м объекте может быть ликвидирована за времени τ_i . За времени $\tau^{\max} = \max \{\tau_i\}$ возможно одновременное развитие ЧС на множестве объектов $\{\Omega\}$ с вероятностью P^{Ω} .

Для ликвидации ЧС выделены финансовые средства C_{Σ} , на которые для i -х объектов можно закупить X_{ij} ресурсов из V типов агрегатов со стоимостью $C_j, (j = \overline{1, V})$ и производительностью π_j . Чем

позже начинаются мероприятия по локализации ЧС ($\tau'_i = \tau_i - \tau_i^{\text{начала}}$), тем больше ущерб от ЧС. Количество ресурсов, одновременно используемых на объекте, ограничено:

$$\sum_i x_{ij} \leq x_i^{\max}.$$

Граф дорожной сети $G(L, K)$ задается матрицей инцидентий $\| \tau_{(l,k)}^G \|$; $l \in L$; $k \in K$; $i = \overline{1, N}$; $k = \overline{1, N}$.

Непредотвращенный ущерб на i -м объекте

$$U_i = U_i^{\max} \sum_j x_{ij} \pi_j \tau_i,$$

где $U_i^{\max}$ – максимальный ущерб на i -м объекте в результате ЧС.

$\|U_i\|$ – матрица ущербов от ЧС на объектах. Определяется по результатам ЧС на аналогичных объектах, измеряется в денежных единицах.

Производительность ресурсов на i -м объекте

$$\Pi_i = \sum_j x_{ij} \pi_j.$$

На первом этапе использования методической схемы необходимо провести предварительную оценку общих затрат на систему обеспечения ресурсами. Это даст исходную информационную основу для последующей оптимизации параметров системы. Для этого оценивается возможный ущерб от ЧС при отсутствии обеспечения ресурсами процесса ее ликвидации.

Для завершения первого этапа методической схемы необходимо определить типы ресурсов и их количество на объектах. Постановка задачи, решаемой с помощью алгоритма по методу двух функций, принимает вид:

найти такое $\{x_{ij}\}$,

при котором $\sum_{i=1}^N (U_i^{\max} - \Pi_i \tau_i) \rightarrow \min,$

при ограничениях:

$$\Pi_i > 0; \Pi_i \leq \Pi_i^{\max}; \sum_j C_i x_{ij} \leq C_i^{\max}; \sum_i C_i^{\max} \leq C_{\Sigma}; x_{ij} \geq 0;$$

$$\sum_i x_{ij} \leq x_i^{\max},$$

где $C_i^{\max}$ – средства, выделяемые для приобретения ресурсов на i -м объекте.

Для реализации второго этапа методической схемы требуется обоснование структуры системы обеспечения ресурсами с учетом предлагаемого нового подхода. В сложившейся практике доминирует развитие систем обеспечения ресурсами как двухэтапных систем, то есть основное совершенствование системы состоит в развитии централизованного ресурса, например региональной базы МЧС.

Третий этап реализации предложенной методической схемы предполагает обоснование порядка определения потенциальной опасности объектов для ликвидации ЧС, на которых создается система обеспечения ресурсами. Если на некоторых объектах возможна ЧС в течение времени ликвидации ЧС на одном из объектов, то с этих объектов нельзя направлять ресурсы на объект, где возникла ЧС. Поэтому необходимо определить максимальное количество объектов, на которых с вероятностью, не меньше заданной, возможно возникновение ЧС в течение $\tau_{\max} = \max_i \{\tau_i\}$ (τ_i – продолжительность развития ЧС на i -м объекте). Содержание задачи, решаемой методом статистического моделирования, состоит в следующем.

Дано:

$\tau_{\max} = \max_i \{\tau_i\}$ – максимальное время ликвидации ЧС на объекте.

λ_i – интенсивность возникновения ЧС на i -м объекте; $i = \overline{1, N}$.

$P_{\text{доп}}$ – минимально допустимая вероятность возникновения ЧС.

$f_i(t) = \lambda_i e^{-\lambda_i t}$ – плотность распределения вероятности возникновения ЧС на i -м объекте в течение времени t .

Найти: максимальное количество объектов, на которых возможно развитие ЧС в течение $\tau_{\max}$ с вероятностью, большей $P_{\text{доп}}$.

Алгоритм решения задачи состоит в следующем:

1. «Розыгрыш» моментов появления ЧС.
2. Формирование множества вариантов одновременно развивающихся ЧС по их количеству.
3. Определение среднего времени существования развития ЧС по каждому варианту их количеств.
4. Повторение пунктов 1-3 в соответствии с заданным количеством циклов моделирования.
5. Расчет вероятности развития ЧС по каждому варианту их количеств.

6. Определение максимального количества одновременно развивающихся ЧС по условию превышения их вероятности величины $P_{\text{доп}}$.

Четвертый этап предполагает обоснование распределения ресурсов между центральной базой и объектами, обеспечивающего минимум максимального ущерба от ЧС. В случае возникновения ЧС на i -м объекте, которая может привести к ущербу на этом объекте величиной $U_i^{\max}$, ресурсы, размещенные на нем, немедленно используются для ее ликвидации и предотвращают ущерб на величину

$$U_i^0 = \sum_j \pi_j \tau_i x_{ij}.$$

С соседних k -х объектов ($k \neq i; k = \overline{1, N}; i = \overline{1, N}$), если на них не производится ликвидации ЧС, прибывают ресурсы j типов в количестве x_{kj} через время $\tau_{\text{ДВ}ki}$.

Их использование позволяет предотвратить ущерб на величину

$$\Delta U_i^C = \sum_{\substack{\forall k: k \neq i \\ \forall k: k \notin \{\Omega\} \\ \forall k: \tau_{\text{ДВ}ki} < \tau_i}} \sum_{j=1}^V x_{kj} \pi_j (\tau_i - \tau_{\text{ДВ}ki}).$$

С центральной базы прибывают ресурсы j типов в количестве x_{ij} через время $\tau_{\text{ДВ}ji}$, которые позволяют предотвратить ущерб на величину

$$\Delta U_i^U = \sum_{j=1}^V \pi_j (\tau_i - \tau_{\text{ДВ}ji}) x_{ij}.$$

Общий предотвращенный ущерб на i -м объекте

$$U_i = U_i^0 + \Delta U_i^C + \Delta U_i^U.$$

Ввиду того, что возможно возникновение ЧС на N объектах, необходимо учитывать возможную потребность в одновременном использовании ресурсов на нескольких объектах и соответственно суммарный ущерб на объектах (U_{Σ}).

Это приводит к необходимости распределения ресурсов между объектами и центральной базой (определить значения x_{ij}, x_{kj}, x_{ij}) так, чтобы возможный ущерб (U_{Σ}), даже при одновременном развитии ЧС на нескольких объектах, был минимальным. При этом необходимо учитывать ограничения на максимальные возможности раз-

мещения ресурсов при ликвидации ЧС на i объекте $\|x_i^{\max}\|$ и их наличие на центральной базе $\|x_{Lij}^{\max}\|$, а также параметры перемещения ресурсов от соседних объектов $\|\tau_{DBki}\|$ и с центральной базы $\|\tau_{DBLi}\|$.

Дано: $\|U_i^{\max}\|$; $\|\pi_j\|$; $\|\tau_i\|$; $\|\tau_{DBki}\|$; $\{\Omega\}$; $\|x_i^{\max}\|$; $\|\tau_{DBLi}\|$.

Найти такие x_{ij}, x_{kj}, x_{Lij} , при которых обеспечивается:

$$U_{\Sigma} = \sum_{i \in \{\Omega\}} U_i^{\Sigma} \rightarrow \min;$$

$$U_i^{\Sigma} = U_i^{\max} - \left[\sum_{j=1}^V x_{ij} \pi_j \tau_i + \sum_{\substack{\forall k: k \neq i \\ \forall k: k \notin \{\Omega\} \\ \forall k: \tau_{DBki} < \tau_i}} \sum_{j=1}^V x_{kj} \pi_j (\tau_i - \tau_{DBki}) + \sum_{j=1}^V x_{Lij} \pi_j (\tau_i - \tau_{DBLi}) \right],$$

при ограничениях:

$$\forall i \in \{\Omega\}: \left[\sum_j x_{ij} + \sum_{\substack{\forall k: k \neq i \\ \forall k: k \notin \{\Omega\} \\ \forall k: \tau_{DBki} < \tau_i}} x_{kj} + \sum_j x_{Lij} \leq x_i^{\max} \right];$$

$$\forall \{(i, j, k) \setminus [k \notin \{\Omega\}; i \in \{\Omega\}]\}: [x_{kj} \leq x_{kj}^{\max}; x_{Lij} \leq x_{Lij}^{\max}],$$

где $\|\pi_j\|$ – производительность оборудования при ликвидации ЧС на i -м объекте;

$\{\Omega\}$ – множество вариантов одновременного развития ЧС.

Заключение

Задача решается последовательно для всех ситуаций, при этом алгоритм решения задачи состоит в следующем.

1. Вычисляются оптимальные величины $x_{ij}, x_{kj}, x_{Lij}, U_i^{\Sigma}$ решением целочисленной задачи линейного программирования.
2. Эта процедура повторяется для всех возможных ситуаций.
3. Строится матрица $\|U_i^{\Sigma}\|$.
4. Распределяются ресурсы по варианту, для которого $\|U_i^{\Sigma}\|$ максимально.

Таким образом, завершается предварительный процесс синтеза системы и осуществляется переход к решению задач, связанных с количественным анализом результатов ее функционирования.

Список литературы

1. Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. – М.: Физматлит, 2007. – 584 с.
2. Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем. – М.: Наука, 1993. – 160 с.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ЛИНЕЙНОЙ УСАДКИ СЛЯБА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ

В.А. Мохов, А.Е. Позин, И.М. Ячиков, К.Н. Вдовин

*ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»,*

***Россия, 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38,
vmokhov88@gmail.com***

Разработана математическая модель теплового состояния слитка в кристаллизаторе МНЛЗ. Созданы алгоритм решения краевой задачи и компьютерная программа. Проведены численные исследования затвердевания сляба и его линейной усадки в кристаллизаторе МНЛЗ ОАО «ММК». На основе полученных результатов были разработаны практические рекомендации по конструкции медных стенок кристаллизатора, направленных на снижение их износа.

SOFTWARE FOR COMPUTATION OF LINEAR SHRINKAGE OF SLAB IN A CRYSTALLIZER OF CSCM

V.A. Mokhov, A.E. Pozin, I.M. Yachikov, K.N. Vdovin

Mathematical model of thermal state of ingot in a crystallizer of continuous steel casting machine (CSCM) was created. Appropriate algorithm of solution of boundary-value problem and computer program were developed. Computational researches of solidification of slab and its linear shrinkage in the crystallizer of CSCM of Magnitogorsk Iron and Steel Works were conducted. Practical guidelines for construction of copper walls of crystallizer used for reducing of its wear were developed taking into account results of conducted modeling.

Актуальность работы

Кристаллизатор является основным узлом любой машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Его функция заключается в том, чтобы отвести тепло от подаваемого расплава к охладителю и сформировать на поверхности образующейся заготовки надежную корку, выдерживающую ферростатическое давление жидкого металла после выхода заготовки из кристаллизатора.

Технологичность процесса непрерывной разливки стали и его экономическая эффективность в значительной степени зависят от работоспособности, а точнее от эксплуатационной стойкости кристаллизатора, определяемой его конструкцией и материалом, используемым для изготовления. От эксплуатационной стойкости кристаллизатора зависит длительность межремонтных периодов и, следовательно, производительность МНЛЗ, а состояние его рабочей полости влияет на качество поверхности непрерывно-литой заготовки.

Одним из важных шагов, направленных на повышение качества поверхности разливаемого сляба и повышения стойкости кристаллизатора, а, следовательно, и на повышение производительности МНЛЗ, является совершенствование процессов охлаждения заготовки в зоне кристаллизатора, направленных на интенсификацию процессов кристаллизации.

Наиболее существенными факторами, влияющими на величину теплообмена между слитком и кристаллизатором, являются конструктивные особенности кристаллизатора. В верхней части кристаллизатора происходит непосредственный контакт жидкого металла и охлаждающей стенки. Плотность теплового потока, ввиду того, что затвердевающая корочка еще тонкая и плотно прижата к медной стенке, достигает максимального значения. При росте твердой корки и ее охлаждении происходит термическая и фазовая усадка слитка (в большей степени происходящая по широкой грани). Вследствие этого слиток отделяется от стенки кристаллизатора и образуется зазор, снижающий интенсивность теплообмена и приводящий к разогреву корочки слитка. В нижней части кристаллизатора из-за увеличения ферростатического давления жидкого металла и повышения температуры корочки происходит ее расширение и приближение слитка к поверхности стенки.

В этих условиях повышению интенсивности теплообмена поможет такая конструкция медных стенок кристаллизатора, которая обеспечит контакт с минимальным зазором между твердой коркой слитка и рабочей поверхностью кристаллизатора. Для решения этой задачи необходимо знание линейной усадки слитка, которое, в свою

очередь, требует знания температуры во всех точках его поперечного сечения.

Реализация решения задачи

Создадим модель теплового состояния слитка, используя квазиравновесную теорию затвердевания [1]. Выделение тепла кристаллизации учтем введением эффективной удельной теплоемкости стали $C_{эф}$ в уравнение нестационарной теплопроводности:

$$\rho C_{эф}(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \text{grad } T),$$

$$\text{где } C_{эф}(T) = \begin{cases} c_{ж}, & \text{при } T > T_{лик}; \\ c_{тв} + L / (T_{лик} - T_{сол}), & \text{при } T_{сол} \leq T \leq T_{лик}; \\ c_{тв}, & \text{при } T < T_{сол}, \end{cases}$$

ρ – плотность стали, T – температура, τ – время, λ – коэффициент теплопроводности, $T_{лик}$, $T_{сол}$ – температура ликвидуса и солидуса, $c_{ж}$, $c_{тв}$ – удельная теплоемкость жидкой и твердой фазы, L – удельная теплота плавления.

Теплопроводность твердой фазы больше теплопроводности жидкой ($\lambda_m > \lambda_{ж}$), однако в жидком ядре слитка тепло переносится не только теплопроводностью, но и конвекцией. Причинами этого является естественная конвекция перегретого расплава и его перемешивание струей подаваемого жидкого металла. Конвективный теплоперенос в объеме жидкой фазы учтем введением эквивалентной теплопроводности $\lambda_{эkv} = \varepsilon_k \lambda_{ж}$, где ε_k – коэффициент, зависящий от интенсивности движения расплава. В частности, в зоне активной циркуляции расплава (в зоне внедрения струи) $\varepsilon_k = 7-8$ [1].

При создании модели усадки слитка считаем, что изменение толщины заготовки происходит в аустенитной области $T_{сол} \geq \bar{T} > T_{\gamma\alpha}$, где $\bar{T}$ – средняя текущая температура затвердевшей части боковой грани, $T_{\gamma\alpha}$ – температура перлитного превращения стали.

Доля, скорость усадки и толщина заготовки:

$$k_{\gamma} = 0,91 - 0,48C + 0,013S_l ;$$

$$y_{\gamma} = y_p k_{\gamma} / (T_{col} - T_{\gamma\alpha}) ;$$

$$h_{\gamma} = h_0 [1 - y_{\gamma} (T_{col} - \bar{T})] ,$$

где $S_l = (Si + Mn + P + S + Cr + Ni + \dots)$ – массовая доля всех легирующих, кроме углерода C ; h_0 – раствор по верху кристаллизатора; y_p – полная линейная усадка стальной заготовки

$$y_p = [2,35 - (C - 0,04)0,9 - 0,15Si - 0,05Mn - 0,05Ni - 0,02Cr - 0,14Cu - 0,13Mo - 0,5V - 0,12Ti] / 100.$$

Из-за зеркальной симметрии рассмотрим только четверть сечения слитка. Выберем декартовую систему координат с центром в точке пересечения осей симметрии. В начальный момент времени температура во всех точках расчетной области равна температуре металла в промковше T_0 . Зададим граничные условия второго рода:

– на осях симметрии слитка $\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0$;

– на боковой поверхности слитка $-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q$.

Плотность теплового потока q от горячего металла к рабочей поверхности кристаллизатора будем задавать по одной из известных формул:

а) эмпирической зависимости, полученной в работе [2] (формула Л.В. Буланова)

$$q = v^{0,46668} \exp\{14,689 + h[-4,3376 + h(5,5939 - 3,1608h^2)] + 0,007815/h/v - 5,7084 \cdot 10^{-8} h^{-5}\} Bm / m^2 , \quad (1)$$

где h – расстояние от данной точки рабочей поверхности до мениска; m , v – скорость разливки, $m / мин$;

б) эмпирической зависимости, полученной в работе [3] (формула В.А. Емельянова)

$$q = 0,5 \cdot (A \cdot v^n \cdot L_k^{0,5} \cdot h^{-0,5}) Bm / m^2 , \quad (2)$$

где L_k – длина кристаллизатора, m ; $A = 953$, $n = 1/3$ для МНЛЗ криволинейного типа.

Графики плотностей теплового потока, полученные по формулам (1) и (2), представлены на рис. 1.

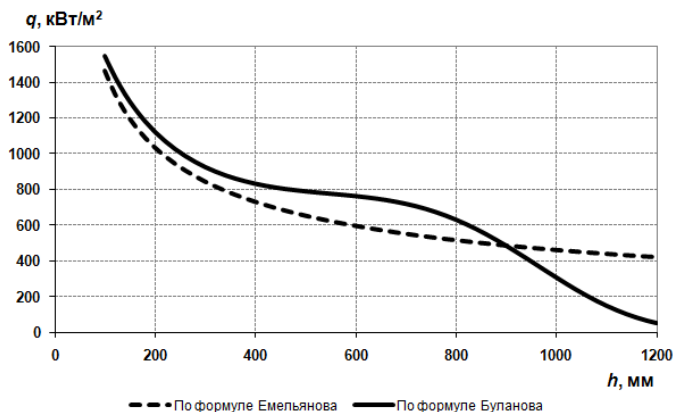


Рис. 1. Зависимость плотности теплового потока от расстояния до мениска

Разработанная краевая задача решалась приближенно методом конечных разностей, алгоритм которого приведен в работе [4].

Результаты моделирования

По данной математической модели на языке программирования C++ была создана программа «Моделирование усадки слэба в кристаллизаторе МНЛЗ». Проведено численное исследование для слэба из стали марки 09Г2С ($T_{сол} = 1491^{\circ}\text{C}$, $T_{лик} = 1509^{\circ}\text{C}$), $v = 0,7 \text{ м/с}$, высоте кристаллизатора 1200 мм , $T_0 = 1540^{\circ}\text{C}$, ширине и толщине заготовки $a = 1300 \text{ мм}$ и $b = 250 \text{ мм}$ соответственно. На рис. 2 показаны результаты численного моделирования, проведенного отдельно по формулам (1) и (2). Видно, что в середине слитка имеется жидкое ядро, далее – двухфазная область, а по краям – твердая корка.

Из рис. 2 видно, что толщина твердой корки середины широкой грани слитка на выходе из кристаллизатора составляет примерно 30 мм, что хорошо согласуется с экспериментальными значениями, полученными на кристаллизаторах МНЛЗ № 2 и 4 ОАО «ММК».

На рис. 3, 4 показано изменение размера широкой грани слитка по высоте кристаллизатора, полученное при расчете теплового потока по формулам (1) и (2) соответственно. Максимальная достигнутая величина усадки при расчете теплового потока по формуле (1) составляет около 14 мм, что примерно на 2,5 мм больше соответствующей величины, полученной при расчете теплового потока по формуле (2).

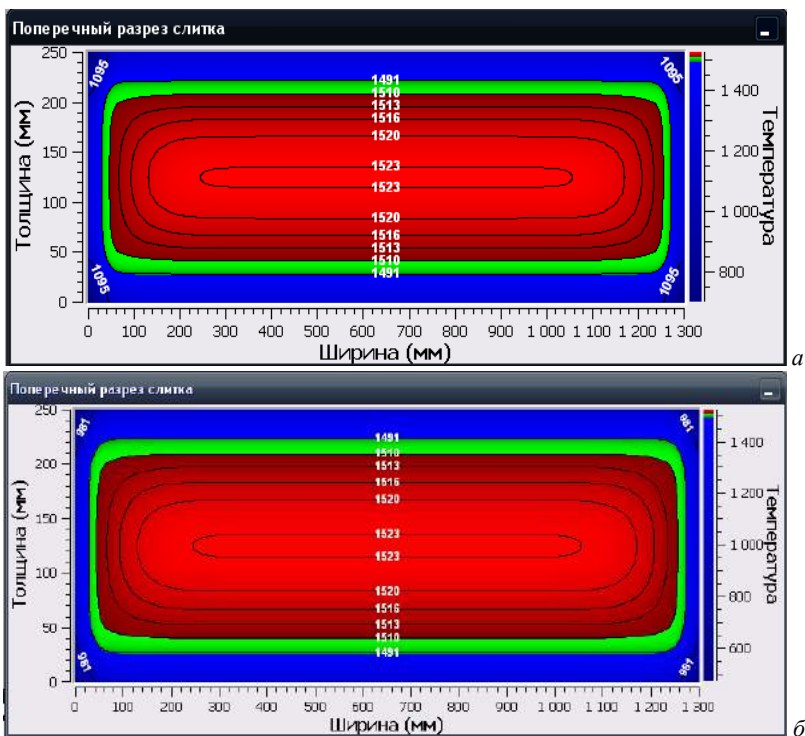


Рис. 2. Температурное поле в поперечном разрезе слитка на выходе из кристаллизатора: а – по формуле Л.В. Буланова; б – по формуле В.А. Емельянова



Рис. 3. Размер широкой грани слитка по высоте кристаллизатора при расчете теплового потока по формуле (1)

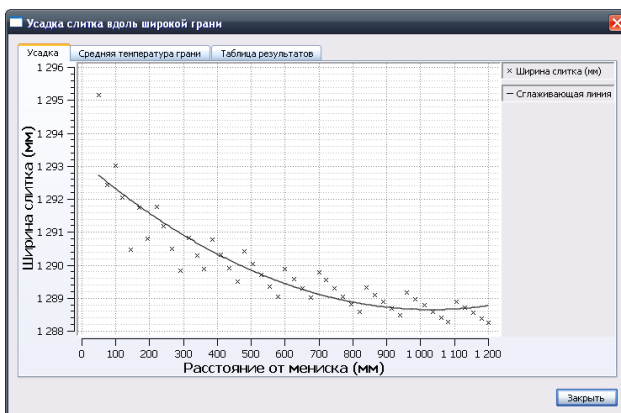


Рис. 4. Размер широкой грани слитка по высоте кристаллизатора при расчете теплового потока по формуле (2)

Результаты расчетов близки к опытным значениям ширины получаемых слывов. Это позволяет говорить об адекватности созданной математической модели теплового состояния и линейной усадки слыва.

Заклучение

Таким образом, разработана математическая модель и компьютерная программа, позволяющая анализировать затвердевание слитка прямоугольного сечения в слывовой МНЛЗ и контролировать процесс линейной усадки заготовки при заданных технологических параметрах разлики металла. Результаты работы могут быть использованы организациями, занимающимися проектированием и разработкой технологических режимов непрерывной разлики стали и модернизацией оборудования МНЛЗ и рекомендованы для внедрения в АСУ ТП МНЛЗ.

Список литературы

1. Тепловые процессы при непрерывном литье стали / Ю.А. Самойлович, С.А. Крулевецкий, В.А. Горяинов, З.К. Кабаков. – М.: Металлургия, 1982. – 152 с.
2. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / под общ. ред. Г.А. Шалаева. – Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы, 2003. – 320 с.
3. Емельянов В.А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок. – М.: Металлургия, 1988. – 53 с.
4. Математическое моделирование теплового состояния линейной усадки слыва в кристаллизаторе МНЛЗ / В.А. Мохов, И.М. Ячиков // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования:

материалы 68-й межрегион. науч.-техн. конференции. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. –Т.2. – С. 148 – 151.

Работа представлена д. т. н., действительным членом Академии инженерных наук м. А.М. Прохорова, профессором кафедры вычислительной техники и прикладной математики ГОУ ВПО «МГТУ» Логуновой О.С.

Дата представления работы: 11.04.2011.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОКАТКИ СЛЯБОВ НА ШИРОКОПОЛОСНОМ СТАНЕ ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ

Е.С. Зуев Е.С, Б.Н. Парсункин, А.В.Фомичев

ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,

Россия, 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38,
ООО «Исследовательско-технологический центр АУСФЕРР»,
Россия, Челябинская обл., г. Магнитогорск, ул. Горького, д. 18

В настоящее время актуальной является проблема прогнозирования параметров во всех технологических процессах. В ходе прокатного производства формируется полуфабрикат металлургической продукции, который используется в других отраслях. Прогнозирование процессов, протекающих при прокатке слябов, позволяет выявить причины возникновения дефектов и своевременно принять меры по корректировке технологии. В представляемой работе предлагается методика прогнозирования времени прокатки слябов на стане горячей прокатки.

FORECASTING OF TIME PROSKATING RINKS OF SLABS ON A BROADBAND CAMP HOT PROSKATING RINKS

E.S. Zuev, B.N. Parsunkin, A.V.Fomichev

Now the problem of forecasting of parameters in all technological processes is actual. During rolling manufacture the semifinished product of metallurgical production which is used in other branches is formed. Forecasting of processes of slabs proceeding at a proskating rink allows to establish the reasons of occurrence of defects and in due time to take measures on technology updating. In represented work the technique of forecasting of time proskating rinks of slabs on a camp hot proskating rinks is offered.

Описание проблемной ситуации

Для обеспечения оптимальной траектории нагрева в энергосберегающем режиме, при условии соблюдения всех технологических

ограничений работы нагревательных печей, необходимо располагать информацией о времени, за которое требуется нагреть заготовки [1]. В условиях превышения суммарной производительности печей над производительностью стана (что соответствует условиям стана 2000 ОАО «ММК»), данное время для конкретного сляба X_i , может быть определено как сумма времен, требующихся на прокатку всех заготовок лежащих в печах перед текущей. Таким образом, прогнозирование времени прокатки является обязательным условием реализации энерго-сберегающего режима.

$$t_{\text{нагр}}(X_i) = \sum_{j=1}^{i-1} t_{\text{прок}}(X_j), \quad (1)$$

где $t_{\text{нагр}}$ – время нагрева; $t_{\text{прок}}$ – время прокатки; $X_{1..j}$ – все слябы в печах перед X_i .

В свою очередь, время прокатки сляба состоит из двух составляющих: машинного времени ($t_{\text{маш}}$) – времени, затраченного непосредственно на прокатку; времени паузы ($t_{\text{пауз}}$) – интервал времени между прокаткой предыдущего и текущего слябов. Необходимо учитывать, что одновременно на стане может прокатываться более одного сляба, поэтому $t_{\text{маш}}$ – время прохождения наиболее узкого места. В условиях стана 2000 это чистовая группа клетей.

Установлено влияние позиции рулона в сортаментной партии на время паузы. Рулоны, стоящие первыми в сортаментных партиях, имеют отличные характеристики распределения (рис. 1) относительно остальных рулонов в партии. Это связано с необходимостью дополнительной настройки стана при смене сортамента. Таким образом, время паузы определяется как математическое ожидание соответствующего распределения, в зависимости номера позиции рулона в сортаментной партии.

При этом сортаментные партии отличаются от производственных, зависящих, как правило, от потребителя проката, и определяются по идентичности марки, НТД, начальной и конечной геометрии. Поэтому сортаментные партии могут включать несколько производственных.

Для прогнозирования $t_{\text{маш}}$ подходит хорошо зарекомендовавший себя метод k -ближайших соседей. Суть метода заключается в выборе для прогнозируемого сляба k наиболее близких ему «соседей» (наиболее «похожих» на прогнозируемый по совокупности характеристик) с уже известным временем прокатки. Прогнозирование осуществляется путем усреднения искомого параметра у выбранных соседей. Для реализации метода необходимо наличие подготовленной базы данных, сформированной из истории прокатки, включающей основные характеристики (доступные до начала прокатки) слябов, а так-

же прогнозируемый параметр – машинное время. Для определения соседей рассчитывается расстояние между прогнозируемым и всеми образцами в базе. Для этого, как правило, используется функция евклидова расстояния, поэтому все характеристики должны иметь числовое представление.

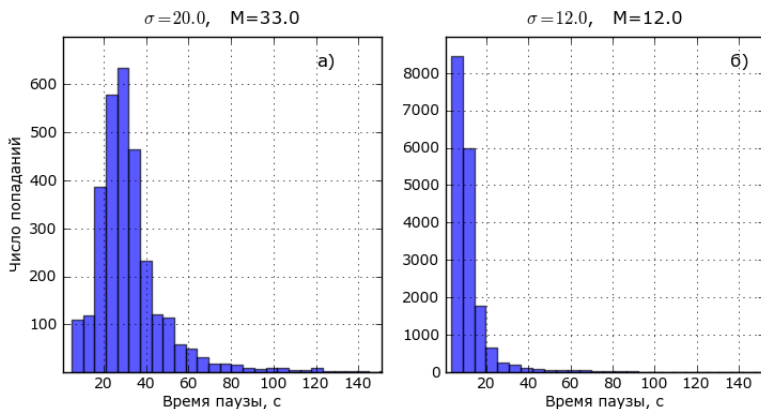


Рис. 1. Время паузы: а – для первого рулона в сортаментной партии; б – остальные рулоны

Таким образом, в качестве основного настраиваемого параметра алгоритма выступают сами данные из истории прокатки. Обеспечение их своевременного пополнения (желательно в реальном времени) позволяет, без дополнительных операций, реализовать автоматическую адаптацию модели к изменению технологических режимов и вводу новых сортовментов.

К недостаткам метода можно отнести относительно высокое потребление ресурсов ЭВМ, требующихся для вычисления евклидова расстояния для всех образцов в базе. Впрочем, в условиях современного развития микропроцессорных архитектур, а также систем управления базами данных данный недостаток не является существенным.

Для прогнозирования машинного времени ($t_{\text{маш}}$) на стане 2000 ОАО «ММК» выбраны основные параметры слэбов [2], влияющие на время прокатки:

- химический состав основных элементов (C, V, Mn, Si, S, P, Cr);
- геометрия слэба;
- геометрия раската;
- режим ускорения (на стане 2000 ОАО «ММК» осуществляются два режима ускорения прокатки, применение которых определяется технологической картой и состоянием агрегатов).

Естественно, что данные параметры описываются в различных единицах измерения и оказывают различное влияние на производительность стана. Поэтому для улучшения прогнозирующих характеристик модели данные параметры нужно масштабировать. После оптимизации масштаба характеристик методом имитации отжига получены коэффициенты, которые представлены на рис. 2.

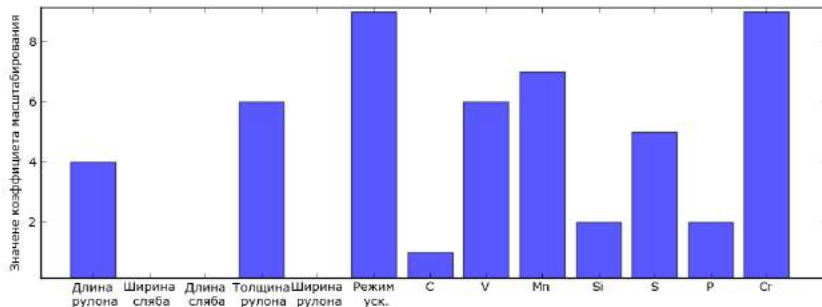


Рис. 2. Коэффициенты масштабирования

Из рис. 2 видно, что параметры – ширина слэба, длина слэба, и ширина рулона оказывают незначительное влияние на определение машинного времени. Дело в том, что действительная длина рулона может быть определена только после прокатки. Поэтому для прогнозирования используется расчетная длина, формула которой включает все геометрические свойства слэба и раската.

В результате моделирования процесса, получены следующие характеристики ошибки предсказания показанные на рис. 3.

Распределение ошибки соответствует нормальному, со стандартным отклонением 5.0. Средняя абсолютная ошибка предсказания составляет 2.7 с.

Существует множество модификаций метода k – ближайших соседей (например, метод взвешенных соседей), позволяющих добиться дополнительного улучшения характеристик предсказания и адаптационных качеств модели. К сожалению, данные модификации способны оказать лишь незначительное улучшение конечного результата — предсказания времени прокатки. Это вызвано тем, что распределение времени паузы (см. рис. 1) обладает значительно худшими характеристиками, по сравнению с распределением ошибки предсказания машинного времени (см. рис. 3).

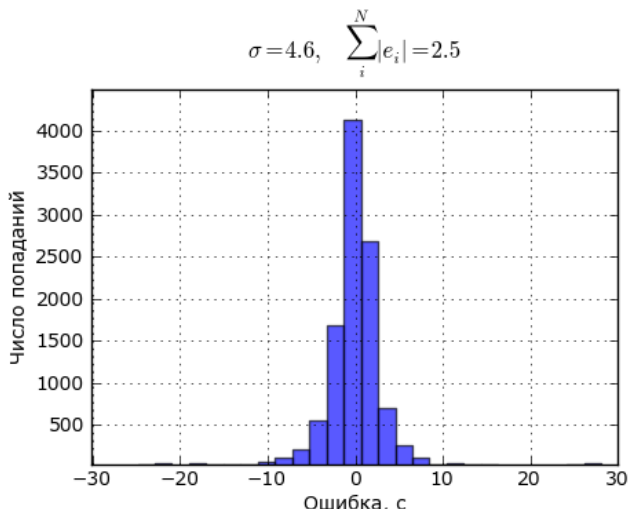


Рис. 3. Ошибка прогнозирования времени прокатки

Процесс прогнозирования результирующей моделью, включающей прогнозирование времени паузы ($t_{\text{пауз}}$) в зависимости от позиции в сортаментной партии и предсказание машинного времени ($t_{\text{маш}}$), с использованием метода k – ближайших соседей представлен на рис.

4

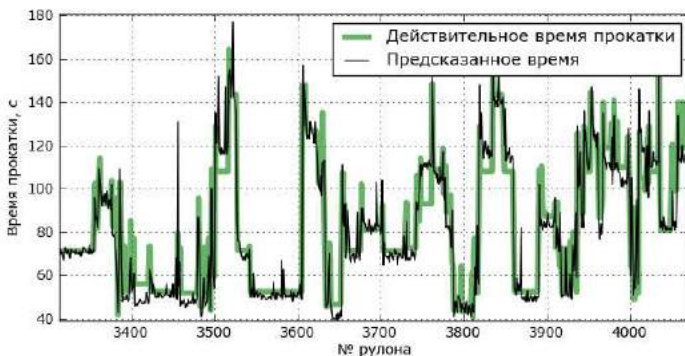


Рис. 4. Прогнозирование времени прокатки

Модель хорошо отслеживает изменение производительности стана. При этом в процессе моделирования не происходило пополнение базы образцов, чем объясняется постоянство сигнала предсказания внутри сортаментной партии (за исключением первого рулона). Такое пополнение позволяет уменьшить ошибку предсказания. При этом вероятность ошибки будет зависеть от положения сляба в печи и дос-

тигать минимального значения на слябах, для которых часть партии уже прокатана и, следовательно, известно их время прокатки. Ошибка предсказания представлена на рис. 5.

Распределение результирующей ошибки соответствует нормальному. Стандартное отклонение равно 15,0, а средняя абсолютная ошибка составляет 8,5 с.

Из графика следует, что основным источником вариабельности в результирующей ошибке является предсказание времени паузы, которое по своей природе является случайной величиной с нормальным распределением. Как правило, это означает, что уменьшение вариабельности данного параметра нуждается во внесении системных изменений в работу агрегата, что не всегда возможно и экономически оправдано.

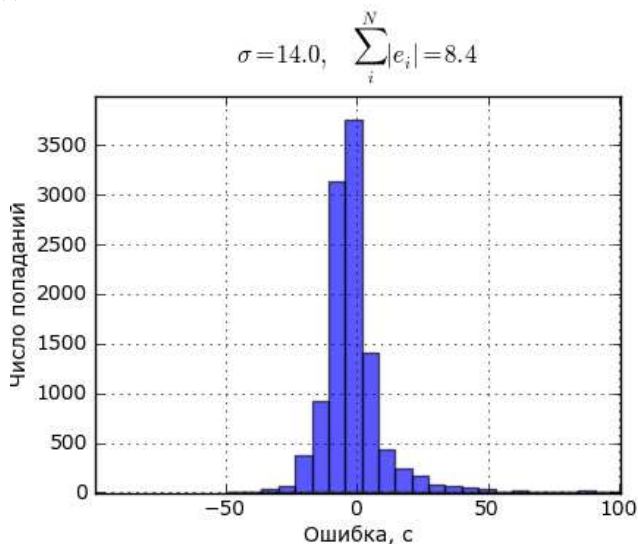


Рис. 5. Ошибка прогнозирования времени прокатки

Основной задачей печных агрегатов в производственном комплексе «печи-стан» является своевременная подача нагретых заготовок. При этом любая оптимизация процесса нагрева не должна негативно сказаться на выполнении этой задачи. Однако данная задача накладывает ограничение только с одной стороны — слаб не должен быть недогрет. Таким образом, при расчете времени нагрева нужно учитывать погрешность модели, сводя к допустимому минимуму вероятность недогрева. Естественно, что при этом, в подавляющем большинстве случаев, предсказанное время будет меньше реального. А

значит, уменьшена эффективность применения энергосберегающего режима. Что является естественной платой за надежность.

Список литературы

1. Прогнозирование продолжительности нагрева непрерывно-литой заготовки в методической печи / Парсункин Б.Н., Андреев С.М // Сталь. – 2003. – №1. – С.71-74.

2. Зуев Е. С. Основы оптимального управления технологическим комплексом «печи-стан» в производстве горячего проката // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. науч. тр. Ч. 1. - Липецк: ЛГТУ, 2010. – С.19-24.

Работа представлена к.т.н., действительным членом Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, доцентом кафедры промышленной кибернетики и систем управления ГОУ ВПО «МГТУ» Андреевым С.М.

Дата представления работы 31.03.2011.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА (НА ПРИМЕРЕ ПРОЦЕССА АГЛОМЕРАЦИИ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД)

Б. Б. Зобнин, С. В. Ендияров

*ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет»,
Россия, 6201448, Свердловская обл., г. Екатеринбург,
ул. Куйбышева, 30
zobninbb@mail.ru*

В статье рассмотрена проблема повышения достоверности контроля сложного технологического комплекса на примере процесса агломерации железных руд, а также проблемы, возникающие при решении задач повышения достоверности контроля и пути их решения. Представлена структура модели необходимой для эффективного решения задачи повышения достоверности контроля, дано ее математическое описание, предлагается алгоритм обучения.

MODELLING THE SYSTEM FOR INCREASING THE CONTROL REALIBILITY INDEX OF A COMPOUND TECHNOLOGICAL COMPLEX (BY EXAMPLE OF A SINTERING PROCESS)

B.B. Zobnin, S.V. Yendiyarov

In this article we consider the problem of increasing the control reliability index of a compound technological complex by example of a sintering process. Some problems which arise during solving tasks of increasing the control reliability index are considered and different ways of solving these problems are given. The structure of the model which is used to efficiently solve the problems of increasing the control reliability index is proposed, the formal description of this model is given and a supervised learning algorithm is contributed.

Описание проблемной ситуации

Необходимым условием создания MES-системы металлургического предприятия является построение системы повышения достоверности контроля состояния сложного технологического комплекса, в частности массовых расходов материальных потоков.

Традиционный подход к решению этой задачи заключается в минимизации суммы квадратов невязок между измеренными и истинными значениями расходов материальных потоков, найденной с учетом погрешностей измерения каждого из потоков [1].

При решении задачи оценки расходов материальных потоков используются уравнения материального баланса, имеющие вид:

$$\sum_{i=1}^m \bar{x}_i = \sum_{j=1}^n \bar{x}_j \quad (1)$$

где x_i – расход i -го материального потока; m, n – число входных и выходных потоков соответственно.

Обработка результатов весовых замеров сырья позволяет поставить задачу расчета баланса как оптимизационную: рассчитать коррекцию замеренных расходов по каждому отдельному потоку таким образом, чтобы отклонения расчетных значений от истинных были минимальными с учетом точности контроля расходов по каждому потоку.

Таким образом, задача сводится к минимизации суммы невязок, взвешенных по средним квадратическим ошибкам отдельных измерений:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\alpha}{\sigma_i} (x_i - x_i^*)^2 = \min \quad (2)$$

При наличии ограничений в форме уравнений материального баланса:

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n a_{ij} x_i = 0 \quad (3)$$

где x_i , x_i^* – измеренное и истинное значение расходов i -го потока соответственно; α – масштабный коэффициент; $i=1, 2, \dots$; n – число расходов, подлежащих определению; m – число уравнений материального баланса; a_{ij} – параметры уравнений.

Коэффициенты уравнений определяются по результатам опробований материальных потоков и, следовательно, содержат ошибки пробоотбора, пробоподготовки и анализа. Поэтому для получения устойчивых решений из уравнения желательно выбирать те коэффициенты, значения которых значимо превышают ошибку их измерения.

Фактически при решении этой задачи возникает целый комплекс дополнительных проблем, которые можно проиллюстрировать примером расчета материального баланса процесса спекания, составленным на основании текущей производственной информации по аглоцеру №3 комбината Северсталь (см. таблицу).

Отметим, что таблица содержит значения расходов возвратных продуктов, получаемые расчетным путем, при этом, как правило, не учитываются качественные характеристики (химический и фракционный состав) возвратных продуктов, либо учет производится на низких частотах, не отражающих существующую изменчивость характеристик материальных потоков.

Коэффициенты балансовых уравнений, найденные опытным путем, являются случайными величинами, поэтому балансовая система (при числе уравнений больше числа неизвестных) несовместна.

Отметим также, что, как правило, отсутствует контроль использования в качестве шихтовых материалов разовых одномоментных добавок (например, отходов прокатного или доменного производства, кека), характеризующихся незначительными объемами в масштабах производства и значительными отличиями свойств и характеристик (химический и фракционный состав) от основных шихтовых компонент. Это приводит к длительному (в силу инерционности процесса и наличия технологических рециклов) отклонению процесса от технологического регламента и выпуску продукта, не соответствующего технологическим требованиям. В существующих системах контроля материальных потоков, как правило, отсутствует контроль различных типов сырья, характеризующихся различным качеством. При изменении качественных характеристик потоков сырья, а также состояния оборудования и действиях технологического персонала изменяются величины удельных расходов сырья на единицу готовой продукции.

Таблица

Материальный баланс процесса спекания по аглоцеху № 3 за июнь 2001 г.

Приход			Расход		
Статьи прихода	т/ч	%	Статьи расхода	т/ч	%
Оленегорский концентрат	276,6	27,1	Агломерат	486,7	47,7
Ковдорский концентрат	183,7	18,0	Собственный возврат	136,0	13,4
Известняк	69,3	6,8	Постель	117,4	11,5
Коксовая мелочь	27,0	2,6	Отсев с ДП 5	152,8	15,0
Отсев с ДП 5	152,8	15,0	Потери при спекании	126,5	12,4
Собственный возврат	136,0	13,4			
Постель	117,4	11,5			
Вода	56,6	5,6			
Итого	1019,4	100,0	Итого	1019,4	100

Совокупность указанных причин существенно снижает достоверность контроля и уменьшает эффективность управления процессом.

Таким образом, повышение достоверности контроля материальных потоков требует использования, кроме результатов их взвешивания, оперативной информации о качественных характеристиках материальных потоков, состоянии оборудования и действиях технологического персонала. Полученные уравнения материального баланса могут быть также использованы для решения диагностических задач, в частности, для определения содержания неконтролируемых оксидов в железорудной части шихты и сопоставления полученного значения с допустимой величиной [2].

Состояние оборудования также определяет материальный баланс технологического передела. В частности, колосниковая решетка (КР) агломерационной машины должна обеспечить: низкое газодинамическое сопротивление при равномерном поле скоростей фильтрации газа по ширине паллет и между паллетами; стабильное живое сечение, без перекосов и выпадения колосников; минимальный унос шихты в тракт; высокую термическую стойкость; эффективную тепловую защиту подколосниковых балок, исключаящих их прогиб. Износ КР во времени характеризуется угаром металла на 1 т агломерата и изменением стрелы прогиба колосников за определенный интервал времени.

Сложность математических моделей, описывающих технологический комплекс, для которых строится модель материальных балан-

сов, делает рациональным использование методов, основанных на рассеянных и неточных знаниях. Знания о процессах, существующие в виде наблюдений и словесных описаний, в результате применения нечеткой логики могут использоваться при классификации процессов. С этой целью лингвистические переменные взвешиваются с весовыми коэффициентами для значений, лежащих между «ИСТИНА» и «ЛОЖЬ» соответственно.

Для описания сложного технологического комплекса (СТК) введем топологические модели (ТМ) двух типов: в пространстве свойств функционирования и в пространстве реальных физических элементов. В первом случае вершины орграфа соответствуют некоторым свойствам функционирования СТК, а дуги – причинно-следственным связям между ними. Во втором случае вершины графа соответствуют реальным физическим элементам, т.е. блокам, узлам или отдельным деталям проектируемой системы, а дуги – реальным взаимодействиям между рассматриваемыми физическими элементами. В обоих случаях возможно построение ТМ на различных уровнях детализации.

Для настройки топологической модели первого типа предлагается использовать когнитивную модель, обобщающую опыт, накопленный технологами в плане управления СТК. Причем формулы, по которым рассчитываются значения технико-экономических показателей (ТЭП) при различных изменениях структуры СТК, остаются одинаковыми.

Формально когнитивная карта может быть представлена графом, однако каждая дуга в этом графе – это некая функциональная зависимость между соответствующими факторами, т.е. когнитивная модель ситуации представляется функциональным графом. Рис. 1 иллюстрирует использование когнитивной карты для описания процесса агломерации железных руд.

Формальное представление параметрического векторного функционального графа

$$\Psi \langle \langle V, E \rangle, X, F, Y \rangle. \quad (4)$$

Выражение (4) – это кортеж, в котором: $G = \langle V, E \rangle$, где $V = \{v_i | v_i \in V, i=1, 2, \dots, k\}$; $E = \{e_{ij} | e_{ij} \in E, i=1, 2, \dots, N\}$; где G – знаковый ориентированный граф (когнитивная карта), в нем: V – множество вершин, вершины («концепты») $v_i \in V, i=1, 2, \dots, k$, являются элементами изучаемой системы; E – множество дуг, дуги $e_i \in E, i, j=1, 2, \dots, N$, отражают взаимосвязь между вершинами v_i и v_j , влияние v_i на v_j в изучаемой ситуации может быть положительным, отрицательным или отсутствовать; $X: V \rightarrow Y$, X – множество параметров вершин,

$X = \{x^{(v_i)} \mid x^{(v_i)} \in X, i = 1, 2, \dots, k\}$, $x^{(v_i)} = \{x_g^{(i)}\}$, $g = 1, 2, \dots, m$. $x_g^{(i)}$ – g -параметр вершины v_i , если $g=1$, то $x_g^{(i)} = x_i$; Y – пространство параметров вершин; $F : E \times X \times Y \rightarrow R$; $F = F(X, E) = F(x_i, x_j, e_{ij})$ – функционал преобразования дуг, ставящий в соответствие каждой дуге либо знак («+», «-»), либо весовой коэффициент ω_{ij} , либо функцию $f(x_i, x_j, e_{ij}) = f_{ij}$.

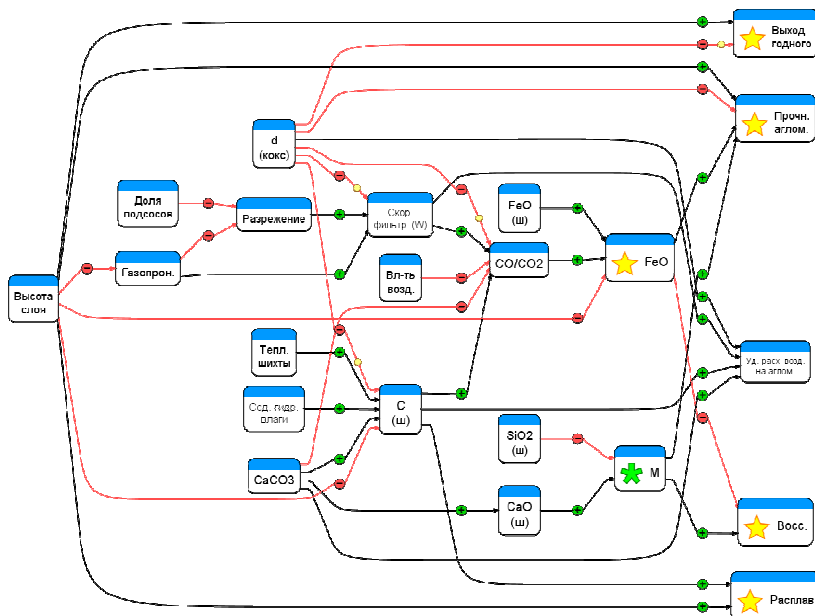


Рис. 1. Фрагмент когнитивной карты процесса агломерации железных руд

Данный подход позволяет интегрировать в рамках единой и непротиворечивой модели информацию из различных источников: научных статей, учебных пособий, знаний, накопленных конкретными людьми (технологи, руководители и т. д.), выраженных в виде текстовой (словесной), графической или аналитической форм записи.

В результате становится возможным использовать информацию, которая ранее не была задействована в процессах управления СТК и одновременно имеет непосредственное влияние на ход технологического процесса и соответственно на качество производимой продукции. Кроме того, использование когнитивного подхода позволяет оценить влияние рециклов, колебаний свойств сырья и других факторов на ход процесса.

Как было отмечено ранее, формулы, по которым рассчитываются значения ТЭП при различных изменениях структуры СТК, остаются неизменными, однако ее параметры подвергаются настройке, а именно вводится понятие «дрейфа» параметра, т. е. отклонения прогнозного значения от фактического.

Дрейф параметров может происходить по различным причинам, таким как: колебание химического состава исходного сырья, изменение относительного количества мелочи рудной части, износ оборудования и т. п.

Таким образом, в ходе процесса существующие зависимости не изменяются, а корректируются на основе мультипликативной ошибки.

Например, если модель прогнозирования включает $x_1, \dots, x_n$ входов и один выход, то модель ошибки может быть представлена в виде нейронной сети (универсальный аппроксиматор).

В результате, прогнозирование с использованием когнитивной модели выполняется в три этапа:

- расчет значения выхода по значениям входов;
- прогнозирование значения ошибки (дрейфа) на основе нейронной сети;
- адаптация модели ошибок, если достоверность прогноза не удовлетворительна.

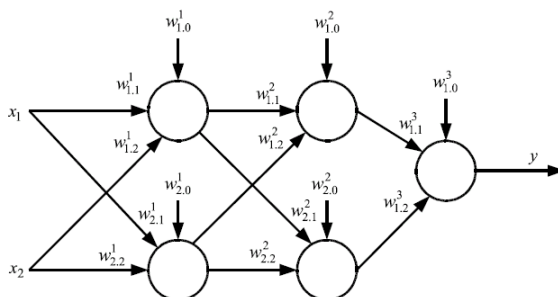
В случае нечетких входов $x_1, \dots, x_n$ ошибка $\Delta\epsilon$ также является нечеткой, и мы имеем дело с нейронечеткой нейронной сетью. Однако параметры $x_1, \dots, x_n$ могут быть деффазифицированы для использования «классических» нейронных сетей.

Обучение данной модели может быть построено по методу обратного распространения, тогда ошибка с внешнего (целевого) слоя распространяется до входов модели. Однако данный подход требует для подбора весовых коэффициентов (мультипликативных параметров ошибки) находить частные производные по всем каналам, что в данном случае является трудоемкой задачей и, кроме того, лишает данный подход гибкости и расширяемости.

Поэтому в качестве обучающего алгоритма предлагается использовать генетический алгоритм. Приведем основные шаги, необходимые для реализации данного алгоритма обучения [3]:

- веса, подлежащие нахождению, кодируются в хромосому (рис. 2);
- функция отбора подходящих индивидов задается в виде

$$Q = \sum_{i=1}^n (d_i - y_i)^2;$$



Хромосома с закодированными весами:

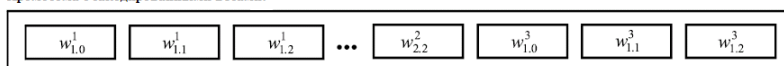


Рис. 2. Пример представления весов сети в хромосоме [4]

- операция скрещивания. Для каждой вершины, не являющейся вершиной ввода, случайным образом выбирается родитель и все «входящие» веса в данную вершину копируются от выбранного родителя. На рис. 3 изображена ситуация, при которой веса, входящие в вершину 6 и 4, взяты от второго родителя, тогда как веса 5 – вершины от первого;
- операция мутации. Случайным образом выбирается вершина и все «входящие» веса, относящиеся к данной вершине, подвергаются мутации.

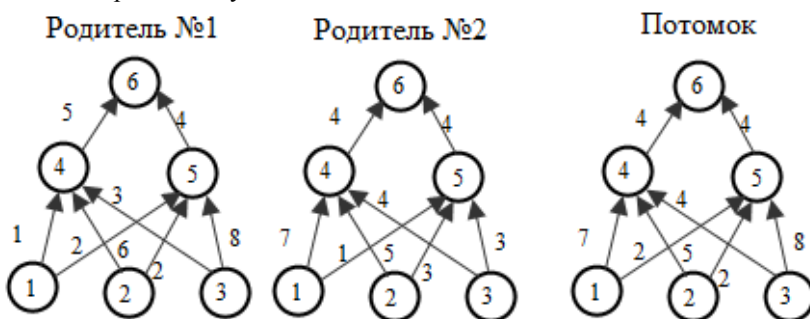


Рис. 3. Пример операции скрещивания для обучения сети

Для настройки топологической модели второго типа в системе необходима функция формирования и коррекции матрицы инцидентности по материальным потокам, которая обеспечивается решением следующих задач:

- формирование графа сети, связывающей отдельные техноло-

- гические переделы;
- формирование графа сети, связывающей предприятие с потребителями;
- коррекция графа сети.

Транспортная сеть представляет собой конечный ориентированный связный линейный граф с e дугами (ориентированными ветвями) и v вершинами (узлами). Математически линейный граф однозначно отображается матрицей инцидентности A . Элементы этой матрицы могут быть найдены:

$$a_{ki} = \begin{cases} 1, & \text{если } i - \text{я дуга инцидентна вершине } k \text{ и направлена к ней;} \\ -1, & \text{если } i - \text{я дуга инцидентна вершине } k \text{ и направлена от нее;} \\ 0, & \text{если } i - \text{я дуга неинцидентна вершине } k. \end{cases}$$

В основу решения задачи адаптации рационально положить функционально ориентированный подход, основанный на управлении ограниченным числом жизненно важных функций сложного технологического комплекса.

Список литературы

1. Повышение достоверности контроля при управлении производственными процессами горных работ / Б.Б. Зобнин, С.С. Головырин, Р.Л. Катаев // Современное состояние и перспективы развития горнодобывающих отраслей промышленности: материалы II Междунауч. науч.-практ. конференции (г. Рудный, 18-20 мая 2004 г.) / под общ. ред. С.Ж. Галиева. - Рудный, 2004: - 420 с.
2. Пат. 2375659 РФ. Автоматизированная система управления качеством агломерата / Б.Б. Зобнин, А.В. Малыгин, А.А. Сурин, С.С. Головырин (РФ).
3. Rutkowski L. Computational Intelligence: Methods and Techniques. – England: Polish Scientific Publishers PWN, 2008. – 514 p.
4. Mitchell M. An Introduction to Genetic Algorithms. – England: MIT Press, 1999. – 162 p.

Работа представлена Президентом УрО АИН им. А.М. Прохорова, заведующим кафедрой автоматики и управления в технических системах УрФУ им. Первого президента России Б.Н. Ельцина, д.т.н., профессором Лисиенко В.Г.

Дата поступления работы: 19.03.2011.

МНОЖЕСТВЕННОСТЬ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ПРОЦЕССА ПОЛИКОНДЕНСАЦИИ АСПАРАГИНОВОЙ КИСЛОТЫ

Ф.Т. Бадртдинова, С.И. Спивак, Л.А. Бигаева

*Бирская государственная социально-педагогическая академия,
452450, Россия, Башкортостан, г.Бирск, ул. Интернациональная, д.10
fairusa85@mail.ru*

При решении обратной задачи поликонденсации аспарагиновой кислоты получено несколько наборов констант скоростей, которые описывают экспериментальные данные практически с одинаковой точностью. Среди найденных наборов констант скоростей выделены глобальные и локальные наборы параметров.

PLURALITY OF THE DECISION OF THE RETURN PROBLEM OF PROCESS OF POLYCONDENSATION ASPARAGINIC OF ACID

F.T.Badrtdinova, S.I.Spivak, L.A.Bigayeva

At the decision of a return problem of polycondensation asparaginic acids have received some sets of constants of speeds which describe experimental data, practically with identical accuracy. Among the found sets of constants of speeds have allocated global and local parameters.

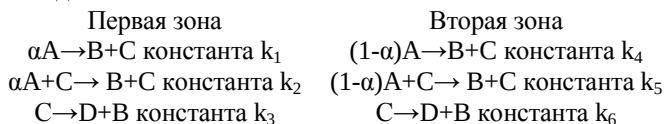
Актуальность работы

Обратная задача химической кинетики является одной из класса задач, которая имеет несколько наборов параметров, хорошо описывающих экспериментальные данные. Нахождение наиболее оптимальных параметров, описывающих реальный процесс поликонденсации аспарагиновой кислоты, остается актуальной проблемой на сегодняшний день.

Основные проблемы

Рассмотрим химический процесс поликонденсации аспарагиновой кислоты, который проходит в двух зонах твердой фазы. Экспериментально этот химический процесс изучали методом термогравиметрии, регистрирующим, как известно, потерю веса образца при его нагревании*. Метод является весьма информативным для изучения кинетики этого сложного превращения, т. к. в этой реакции выделяется вода, удаляемая из образца вследствие достаточно высокой температуры опытов. Измерения проводили в температурном диапазоне от 169 до 227⁰ С. В результате были получены изотермы кинетики потери веса кислоты [1].

Кинетическая схема рассматриваемого процесса имеет следующий вид:



Здесь: А – исходный мономер; В – вода, выделяющаяся в каждой из проходящих реакций; С – автокатализирующий промежуточный продукт – димер, тример и т. п.; D – конечный продукт; α – параметр, отражающий долю исходного мономера в данной зоне матрицы.

Согласно приведенной схеме процесс проходит в двух автономных зонах. Превращение исходного мономера в конечный продукт в каждой из зон происходит в две стадии. Первая – собственно поликонденсация, которая приводит к росту молекулярной массы, – реализуется в виде двух параллельных реакций с выделением воды в качестве побочного продукта: (1) прямого взаимодействия двух молекул мономера и (2) автокаталитического превращения с участием возникающего олигомера. Последнее предположение основано на экспериментально наблюдающемся увеличении скорости потери массы (выделения воды). Во второй стадии происходит реакция полимераналогичного превращения получающегося полимера: карбоксильная и имидная группы отщепляют воду с образованием сукцинимидного цикла. Конечным продуктом является полисукцинимид. Его образование обусловлено, таким образом, отщеплением двух молекул воды от молекулы исходного мономера.

Математическая модель для каждой из зон представлена в виде системы дифференциальных уравнений (СДУ). СДУ для описания кинетики поликонденсации в первой и во второй зоне процесса:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dA}{dt} = -k_1(\alpha \cdot A) - k_2(\alpha \cdot A)C \\ \frac{dC}{dt} = k_1(\alpha \cdot A) + k_2(\alpha \cdot A)C - k_3 \cdot C \\ \frac{dB}{dt} = k_1(\alpha \cdot A) + k_2(\alpha \cdot A)C + k_3 \cdot C \\ \frac{dD}{dt} = k_3 \cdot C \end{array} \right. \quad (1) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{dA}{dt} = -k_4(1-\alpha)A - k_5(1-\alpha) \cdot A \cdot C \\ \frac{dC}{dt} = k_4(1-\alpha)A + k_5(1-\alpha) \cdot A \cdot C - k_6 \cdot C \\ \frac{dB}{dt} = k_4(1-\alpha)A + k_5(1-\alpha) \cdot A \cdot C + k_6 \cdot C \\ \frac{dD}{dt} = k_6 \cdot C \end{array} \right. \quad (2)$$

В соответствии с этой математической моделью были определены 6 констант скоростей и параметр α при различных температурах в диапазоне от 169 до 227⁰ С, т.е. была решена обратная задача химической кинетики [2].

В ходе решения обратной задачи обнаружилось, что задача имеет несколько наборов параметров, хорошо описывающих экспериментальные данные.

Из одного набора констант были построены отношения между константами скоростей для одинаковых реакций зон, а также отношения констант двух стадий процесса. Одинаковые реакции для зон это те реакции, участие которых в химическом процессе каждой зоны имеют один и тот же химический смысл. Например, отношение констант k_1 и k_2 для прямых реакций означает взаимодействие двух молекул мономера.

Большой интерес представляет зависимость констант двух стадий процесса поликонденсации аспарагиновой кислоты при различных температурах. Данная зависимость определяет поведение промежуточного продукта, которая выражается следующими соотношениями:

для первой зоны – $\frac{k_1 + k_2}{k_3}$, для второй зоны – $\frac{k_4 + k_5}{k_6}$. Чем больше это

отношение, тем вклад дегидратации промежуточного продукта будет меньше. Найденные отношения констант приведены в таблице.

Таблица

<i>Отношения констант скоростей для первой и второй зон</i>		
<i>Температура, °C</i>	$(k_1 + k_2)/k_3$	$(k_4 + k_5)/k_6$
187	239,3	1,67
197	95,5	1,44
203	19,14	1,18
208	9,4	1,15
212	6,1	1,103
218	4,67	1,15
223	5,90	1,14
227	5,16	1,103

Тем самым можно построить зависимость найденных отношений от температуры (рис.1). Из приведенного рисунка видно, что при температурах от 185 до 200⁰C участие промежуточного продукта в образование конечного продукта очень мало, что нельзя сказать при температурах от 200 до 230⁰C. На рис. 1 показана зависимость $\frac{k_1 + k_2}{k_3}$ от температуры t^0C .

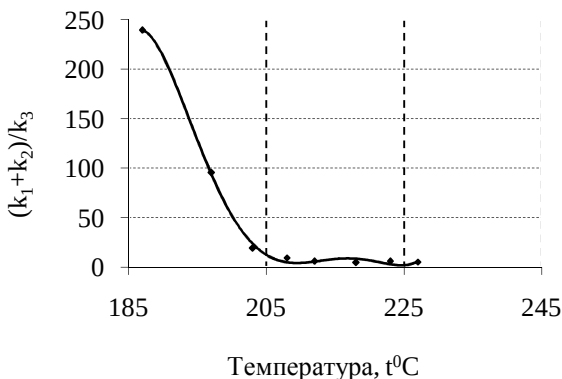


Рис. 1. Зависимость отношения констант для первой зоны процесса от температуры

Учитывая отношения констант скоростей, рассмотрим найденные решения обратной задачи процесса поликонденсации аспарагиновой кислоты при температуре 227°С, которые составляют:

$$\frac{k_1+k_2}{k_3}=5.16; \quad \frac{k_4+k_5}{k_6}=1.1; \quad \frac{k_1}{k_4}=1.8;$$

Учитывая данные отношения, получаем:

$$k_3 = \frac{1.8k_4 + 0.031k_5}{5.16}, \quad (3)$$

$$k_6 = \frac{k_4 + k_5}{1.1}$$

Тем самым, используя (3), решаем обратную задачу только относительно двух параметров k_4 , k_5 , считая остальные известными. В качестве критерия соответствия расчета измерения используется неравенство, которое характеризует вариацию экспериментальных данных в пределах величины их максимальной относительной погрешности:

$$\max_i \frac{|Y_i^{\text{эксп}} - Y_i^{\text{расч}}|}{Y_i^{\text{эксп}}} < \varepsilon, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

где n – число экспериментальных точек; $Y_i^{\text{эксп}}$ – экспериментальное значение; $Y_i^{\text{расч}}$ – расчетное значение, которое находится из решения систем дифференциальных уравнений (1) и (2); ε – предельно допустимая погрешность измерений. В расчете использовалась $\varepsilon \leq 3\%$.

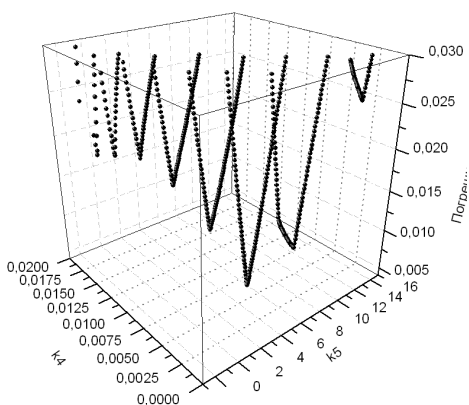


Рис. 2. Зависимость параметров k_4 , k_5 от погрешности ε

На рис. 2 приведена зависимость параметров k_4 , k_5 от погрешности.

Из данного рисунка видно, что глобальный минимум на интервале изменения константы k_4 от 0 до 0,45 один, локальных же минимумов много. Если увеличивать интервал для параметров, то минимумов может быть гораздо больше и каждый из этих минимумов мо-

жем взять в качестве решения обратной задачи.

Заключение

Показано, что для процесса поликонденсации аспарагиновой кислоты существует несколько наборов констант, среди которых есть, может быть не один глобальный минимум. Не исключено, что при увеличении диапазона для параметров, либо беря другое отношение для констант скоростей стадий, будет существовать еще несколько глобальных минимумов.

Список литературы

1. Кинетический анализ твердофазной поликонденсации аспарагиновой кислоты / В. М. Гольдберг [и др.] // Доклады Академии наук. – 2008. – Т. 423. – № 5, дек. – С.583-587.

Статья представлена к. ф.-м. н., доцентом, заведующим кафедрой математического моделирования и информационных систем Бир-ГСПА Латыповым И.И.

Дата поступления работы: 24.03.2011.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА ПО ПОВЕРХНОСТИ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЕМКОСТИ ПРИ ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА

С.Н. Сергиенко, И.М. Ячиков

*ГОУ ВПО «Орский гуманитарно-технологический институт, филиал
Оренбургского государственного университета»,*

*Россия, 462403, Оренбургская обл., г. Орск, пр. Мира, д. 15
sergienkoorsksw@mail.ru,*

*ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»,*

*Россия, 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38
Jachikov@mail.ru*

Работа промежуточной емкости электронно-лучевой печи оказывает существенное влияние на процессы, влияющие на качество получаемых титановых слитков. Разработана методика расчета распределения среднего локального теплового потока, падающего на прямоугольную поверхность, в зависимости от мощности луча электронного пучка и заданных периодических функций его параметрической развертки и диаметра фокального пятна. Показано, что для практики наиболее интересной является не равномерная, а линейно-гармоническая развертка электронного пучка.

DISTRIBUTION OF THE HEAT FLUX ON THE SURFACE OF THE TANK AT A GIVEN TRAJECTORY OF THE ELECTRON BEAM

S.N. Sergienko, I.M Yachikov

Work interim capacity of electron-beam furnace has a significant influence on the processes that affect the quality of titanium ingots. The method of the calculation of the distribution of the average of the local heat flux falling on a rectangular surface, depending on the output beam electron beam and the set of periodic functions of his parametric scanning and the diameter of the focal spot. It is shown that for the practice of the most interesting is not uniform, and the line-harmonic frequency of the electron beam.

Актуальность работы

Печь ЭЛП-30, установленная в ОАО «Электронно-лучевая печь» (г. Орск), позволяет получать титановые заготовки высокого качества в виде слабов и цилиндров. Печь снабжена пятью аксиальными

ми пушками ЕН-1200/50-1,2MW, имеющими максимальную силу тока 24 А при максимальном ускоряющем напряжении 50 кВ.

При электронно-лучевой плавке (ЭЛП) мощность электронных лучей расходуется на оплавление торцов подаваемой шихтовой заготовки и на поддержание жидкой ванны металла в кристаллизаторе и промежуточной емкости (ПЕ). Тепловое поле, устанавливающееся на обрабатываемой поверхности, является следствием воздействия электронного луча.

Диаметр сфокусированного фокального пятна существенно меньше размера поверхности переплавляемой заготовки и зеркала ванны. Поэтому на практике довольно часто используется расфокусированный электронный луч. Однако более эффективным методом задания нужного распределения мощности пучка по обрабатываемой поверхности является его программная развертка. Она позволяет управлять распределением поверхностного теплового потока, повышая эффективность технологических процессов. При неправильной развертке луча по поверхности ПЕ может происходить большой разогрев отдельных областей ванны и появление зон с низкой температурой, например по краям ванны. Это оказывает существенное влияние на процесс дегазации металла, удаления вредных примесей и неметаллических включений.

Цель работы: определить распределение теплового потока по прямоугольной поверхности при известной траектории движения по ней электронного луча заданной мощности.

Реализация решения задачи

За счет взаимодействия электронного пучка с веществом в печи возникают процессы нагрева, плавления и испарения материалов. Мощность потока ускоренных электронов зависит от ускоряющего напряжения $P = k_e U^{5/2}$ кВт, где k_e - полная проводимость электронного пучка (для аксиальных пушек ЕН-1200/50-1,2MW $k_e \approx 0,068$ А/кВ^{3/2}).

Наряду с выделением тепловой энергии возникают так называемые вторичные эффекты - тепловое излучение от нагретой поверхности, эмиссия рентгеновских лучей, термических электронов и электронов обратного рассеяния.

Доля мощности на рентгеновское излучение при воздействии электронного пучка на титан при максимальном напряжении составляет [1]

$$\eta_p = \frac{P_{рен}}{P} 100\% = 22\alpha U_{max} \cdot 100\% \approx 0,17\%,$$

где $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-6}$ - коэффициент пропорциональности (при измерении напряжения в кВ).

Вторичные электроны эмитируют с поверхности мишени с энергиями до 50 эВ. Плотность тока термоэмиссии определяется температурой поверхности и свойствами материала. Эмиссия вторичных электронов и термоэлектронная эмиссия практически не играют роли в балансе энергии электронно-лучевого процесса. Теряемая из-за них мощность не превышает 1% мощности электронного пучка [1].

Доля отраженных электронов от электронов пучка, их спектр энергий и распределение в пространстве в первую очередь зависят от номера элемента материала и угла падения пучка. Отражение электронов происходит тем интенсивнее, чем больше ось пучка отклонена от нормали к поверхности мишени. Максимум интенсивности располагается в направлении, приблизительно подчиняющемся закону оптического отражения. Зависимость доли электронов, отраженных в полусферическое пространство при отвесном падении пучка на плоскую поверхность мишени, не зависит от энергии пучка, а определяется материалом подложки. Из-за отражения электронов теряется значительная доля от мощности падающего пучка, например, для титана она составляет около 20%, для стали - 25%, для вольфрама – 38%.

Таким образом, для титановой подложки около $\eta = 78\%$ приобретенной электронами энергии при прохождении их через ускоряющее электрическое поле превращается в тепловую энергию, которая используется для нагрева, плавки и испарения материалов.

За глубину проникновения δ_e электронов пучка принимают расстояние по нормали от поверхности мишени в глубь нее, на котором электроны теряют практически всю свою энергию. Глубина проникновения зависит от энергии электронов и плотности материала и определяется по известной формуле Шонланда [2]. На расстоянии от поверхности, равном $\delta_e/3$, поглощаемая мощность достигает максимума и затем спадает до нуля на расстоянии δ_e . Для большинства термических процессов, протекающих в ЭЛП, такая неравномерность поглощения энергии не играет роли, так как вызываемая ею в пределах δ_e разность температур быстро выравнивается под действием теплопроводности. Величина δ_e для титана порядка 10 мкм, поэтому можно считать электронный луч источником поверхностного нагрева.

Под диаметром фокального пятна и соответственно диаметром электронного пучка d_ϕ принято считать диаметр, при котором плотность тока в радиальном направлении снижается в e раз против макси-

мальной плотности J_0 . Внутри пучка, диаметр которого определен подобным образом, протекает $\varphi_0=68\%$ всего тока пучка [1]. Тепловые электроны, падающие на обрабатываемый материал, имеют распределение Максвелла, поэтому распределение плотности тока в фокальном пятне подчиняется кривой Гаусса

$$J(r) = J_0 e^{(-r^2/r_\phi^2)},$$

где r – радиальное расстояние от оси; $r_\phi = d_\phi / 2$ - радиус фокального пятна.

При мощности пучка от 60 до 1200 кВт минимальный диаметр фокального пятна на переплавляемой заготовке и на поверхности ванны расплава составляет $d_\phi=2-15$ см [1, с. 259]. Исходя из этого можно оценить средний поверхностный тепловой поток

$$q_n = \frac{4P\varphi_0\eta}{\pi d_\phi^2} = \varphi_0\eta U \bar{J} \approx 3,5-10 \text{ кВт/см}^2,$$

где $\bar{J}=0,14-1,27 \text{ А/см}^2$ – средняя плотность тока пучка в месте его встречи с поверхностью обрабатываемого материала.

Распределение плотности теплового потока пропорционально плотности тока $q = \eta U J \sim J$, поэтому плотность теплового потока в зависимости от расстояния до центра пятна близка к закону Гаусса

$$q(r) = q_0 e^{(-r^2/r_\phi^2)}.$$

Известен ряд способов для регулирования мощности пучка электронов за счет изменения тока эмиссии катода, основного ускоряющего напряжения U и потенциала на управляющем электроде пушки.

При управлении током пучка путем регулирования тока накала происходит существенное изменение сходимости электронного пучка и, следовательно, сильно меняются геометрические характеристики самого фокального пятна.

Изменение ускоряющего напряжения приводит к изменению фокусного расстояния магнитной линзы и угла отклонения пучка, поэтому данный способ практически не применяется в современных ЭЛП.

Основным способом регулирования мощности пучка, стабилизации заданного ее значения, импульсной модуляции тока, плавного его уменьшения при прекращении плавки является подача управляющего напряжения на прикатодный электрод электронно-лучевой пушки. Посредством современных отечественных и импортных модулято-

ров вполне реально управлять мощностью потока электронов по заданной программе совместно с разверткой луча по нагреваемой поверхности.

Для перемещения луча по поверхности на пути электронов помещают магнитную отклоняющую систему, позволяющую направлять электронный луч по заданной траектории. Программное управление распределением мощности по круглой или прямоугольной поверхности чаще всего базируется на использовании круговой ($a=b$) или эллиптической ($a \neq b$) развертки пучка:

$$\begin{cases} x = a \cos(\frac{2\pi}{T} \tau); \\ y = b \sin(\frac{2\pi}{T} \tau), \end{cases}$$

где T – период; τ - время.

Подбором полуосей a и b эллипса, описываемого пятном пучка, можно изменять скорости перемещения пятна вблизи вершин эллипса и, тем самым, соотношение мощностей, отдаваемых пучком на этих участках. Вблизи вершин, лежащих на большой оси, движение пятна замедляется по сравнению с движением вблизи вершин, лежащих на малой оси. Это приводит к тому, что средний тепловой поток вблизи больших осей больше, чем вблизи малых осей.

Получить равномерное температурное поле для большой площади поверхности ванны посредством эллиптической развертки пучка довольно сложно. В таких случаях прибегают к программам развертки с распределением мощности луча по площади всей поверхности. Для хорошего заполнения раstra необходимо, чтобы периоды горизонтальной и вертикальной разверток существенно отличались. Функцию развертки луча удобно представлять в параметрической форме (так как эти функции можно напрямую использовать в отклоняющей системе электронно-лучевой пушки):

$$\begin{cases} x = x(\tau); \\ y = y(\tau), \end{cases} \quad (1)$$

где $x(\tau)$, $y(\tau)$ - периодические функции от времени τ , причем их периоды могут и не совпадать.

В работе [3] установлено, что для равномерного нагрева поверхности ванны и минимального угара металла необходимо использовать кадровую развертку электронных пучков с частотой не менее $1/T = 100$ Гц. В этом случае можно пренебречь импульсным воздейст-

нием теплового потока, а говорить о средних величинах теплового потока, действующего на данную поверхность ванны.

Средний локальный тепловой поток является функцией координат и определяется как усреднение теплового потока за периоды кадровой и строчной разверток

$$\bar{q} = f(x, y). \quad (2)$$

В качестве упрощения будем полагать, что пучок, падающий на поверхность ПЕ, имеет форму квадрата со стороной d_ϕ . Тогда при равномерной развертке луча по обоим направлениям средний «размазанный» по площади раstra тепловой поток можно определить как

$$\bar{q} = \frac{\bar{q}_n d_\phi^2}{4y_0 x_0}, \text{ или в безразмерном виде}$$

$$\frac{\bar{q}}{\bar{q}_n} = \frac{d_\phi^2}{4y_0 x_0}, \quad (3)$$

где $2x_0 2y_0$ - площадь раstra развертки луча; $\bar{q}_n = \eta U \bar{J}$ - средний тепловой поток в фокальном пятне, создаваемый за счет преобразования энергии электронов в тепло.

Определим основные этапы алгоритма расчета среднего теплового потока (2), зная параметрическую форму развертки луча (1) и диаметр сфокусированного луча. Считаем, что координата центра луча x меняется от $-x_0$ до x_0 , а координата y - от $-y_0$ до y_0 . Тогда скорость движения луча

$$\begin{cases} V_x = \frac{dx}{d\tau}; \\ V_y = \frac{dy}{d\tau}. \end{cases}$$

Время прохождения луча через заданную точку $A(x, y)$ в горизонтальном и вертикальном направлении можно определить как

$$\tau_x = \frac{d_{\phi_x}}{V_x}, \quad \tau_y = \frac{d_{\phi_y}}{V_y}. \text{ Если период горизонтальной развертки существенно больше вертикальной } (T_x \gg T_y), \text{ тогда время действия луча в}$$

данной точке $A(x, y)$ $\tau_\phi = \tau_x \frac{\tau_y}{T_y}$, а если период горизонтальной раз-

вертки существенно меньше вертикальной ($T_x \ll T_y$), тогда

$$\tau_\phi = \tau_y \frac{\tau_x}{T_x}. \text{ Объединяя эти два случая, получим } \tau_\phi = \frac{\tau_x \tau_y}{\min(T_x, T_y)}.$$

Безразмерное время воздействия луча определим как отношение

$$\tau_\phi \text{ к максимальному периоду } \tilde{\tau}_\phi = \frac{\tau_x \tau_y}{\min(T_x, T_y) \max(T_x, T_y)} \text{ или}$$

$$\tilde{\tau}_\phi = \frac{\tau_x \cdot \tau_y}{T_x \cdot T_y}. \quad (4)$$

Очевидно, что средний по времени тепловой поток в данной точке пропорционален характерному времени $\tilde{\tau}_\phi$ и среднему тепловому потоку в фокальном пятне

$$q(x, y) = \bar{q}_n \tilde{\tau}_\phi(x, y) = \bar{q}_n \frac{d_\phi^2}{V_x(x) V_y(y) T_x T_y}. \quad (5)$$

Отсюда безразмерный тепловой поток

$$\frac{q}{\bar{q}} = \tilde{\tau}_\phi(x, y). \quad (6)$$

Анализируя выражение (5), можно увидеть, что первый сомножитель определяет мощность электронно-лучевого преобразователя, второй – особенности используемой функции развертки.

Пример 1. Рассмотрим равномерно-гармоническую развертку. Пусть в направлении Ox по длине ванны имеем равномерную (пилообразную) развертку луча $x = a \left(2 \frac{\tau}{T_x} - 1 \right)$, причем $-a \leq x \leq a$, T_x - период

горизонтальной развертки, а по ширине ванны (вдоль оси Oy) в качестве функции развертки выступает гармоническая функция $y = b \sin(\omega \tau)$

$) = b \sin \left(\frac{2\pi}{T_y} \tau \right)$ (T_y - период вертикальной развертки). Определим рас-

пределение теплового потока.

Ширина ванны ПЕ $B=500$ мм, ее длина $A=1800$ мм, поэтому $b=250$ мм, $a=900$ мм. Диаметр фокального пятна принимаем равным $d_\phi=50$ мм. Будем считать, что периоды горизонтальной и вертикальной разверток существенно отличаются. На рис. 1 показана траектория движения электронного луча по поверхности ванны для случаев, когда

частоты горизонтальной и вертикальной разверток отличаются в 10 раз.

Скорость движения луча $V_x = \frac{2a}{T_x}$, $V_y(\tau) = \frac{dy}{d\tau} = y_0 \omega \cdot \cos(\omega\tau)$,

$$V_y(y) = \omega \sqrt{y_0^2 - y^2} \quad \text{или} \quad V_y(\tilde{y}) = \omega d_\phi \sqrt{\tilde{y}_0^2 - \tilde{y}^2}, \quad \text{где} \quad \tilde{y} = y / d_\phi, \\ \tilde{y}_0 = y_0 / d_\phi.$$

Характерное время воздействия луча определяем по уравнению (4) и с учетом того, что при вертикальной развертке каждую точку луч проходит два раза, находим безразмерный тепловой поток

$$\frac{q}{\bar{q}} = \tilde{\tau}_\phi(\tilde{y}) = \frac{2\tau_x \cdot \tau_y}{T_x \cdot T_y} = \frac{1}{2\tilde{\kappa}_0 \sqrt{\tilde{y}_0^2 - \tilde{y}^2}}, \quad (7)$$

$$\text{где } \tilde{x}_0 = a / d_\phi = 18, \quad \tau_x = \frac{d_\phi T_x}{2a}, \quad \tau_y = \frac{d_\phi}{V_y}.$$

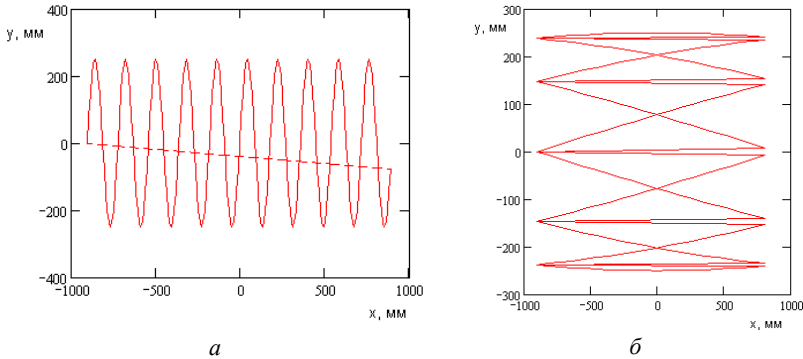


Рис. 1. Траектория движения электронного луча по поверхности ванны при равномерно-гармонической развертке: а - $1/T_x = 1$ Гц, $1/T_y = 10$ Гц;

$$\text{б - } 1/T_x = 10 \text{ Гц, } 1/T_y = 1 \text{ Гц}$$

Таким образом, если периоды горизонтальной и вертикальной разверток будут существенно отличаться ($T_x \ll T_y$ или $T_x \gg T_y$), то при заданных функциях разверток средняя по времени плотность теплового потока будет меняться только в направлении Оу.

На рис. 2 показана полученная зависимость $q/\bar{q} = f(\tilde{y})$ для полуширины ванны $\tilde{y}_0 = 5$. Видно, что при выбранной развертке тепло-

вой поток вдоль широких стенок ванны в 2-3 раза выше, чем в ее центральной части.

При этом средний «размазанный» по площади раstra безразмерный тепловой поток определяем по формуле (3)

$$\frac{\bar{q}}{\bar{q}_n} = \frac{d_\phi^2}{8y_0x_0} = \frac{1}{8\tilde{y}_0\tilde{x}_0} \approx 2,8 \cdot 10^{-3}.$$

Для проверки полученных результатов определим баланс тепловой энергии. Тепловая мощность электронного пучка $\bar{q}_n d_\phi^2$ в зависимости от заданных функций разверток рассеивается по всей поверхности ванны

$2x_0 \int_{-y_0}^{y_0} q(y) dy$. Считая эти мощности одинаковыми, можно

записать $\frac{d_\phi^2}{2x_0} = \int_{-y_0}^{y_0} \frac{q(y)}{\bar{q}_n} dy$. Проведя несложные преобразования, получим

$$\frac{1}{2\tilde{x}_0} = \frac{1}{2\pi\tilde{x}_0} \int_{-\tilde{y}_0}^{\tilde{y}_0} \frac{1}{\sqrt{\tilde{y}^2_0 - \tilde{y}^2}} d\tilde{y}, \quad \text{или} \quad \int_{-\tilde{y}_0}^{\tilde{y}_0} \frac{1}{\sqrt{\tilde{y}^2_0 - \tilde{y}^2}} d\tilde{y} = \pi. \quad \text{Последнее выражение истинно, что позволяет говорить о выполнении закона сохранения тепловой энергии в полученном нами уравнении (7).}$$

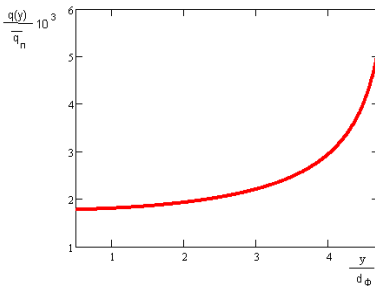


Рис. 2. Зависимость безразмерного среднего теплового потока по полуширине ванны при функции развертки луча $y=y_0 \sin(\omega\tau)$

Пример 2. Пусть в качестве горизонтальной и вертикальной разверток выступают гармонические функции

$$\begin{cases} x = x_0 \cos\left(\frac{2\pi}{T_x} \tau\right) \\ y = y_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T_y} \tau\right) \end{cases}. \quad (8)$$

Требуется определить распределение теплового потока на поверхности развертки электронного луча. Размеры ванны и фокального пятна такие же, как в примере 1.

Будем считать, что периоды горизонтальной и вертикальной разверток существенно отличаются. В этих случаях электронный луч движется по поверхности ванны по сложной циклической траектории (рис. 3).

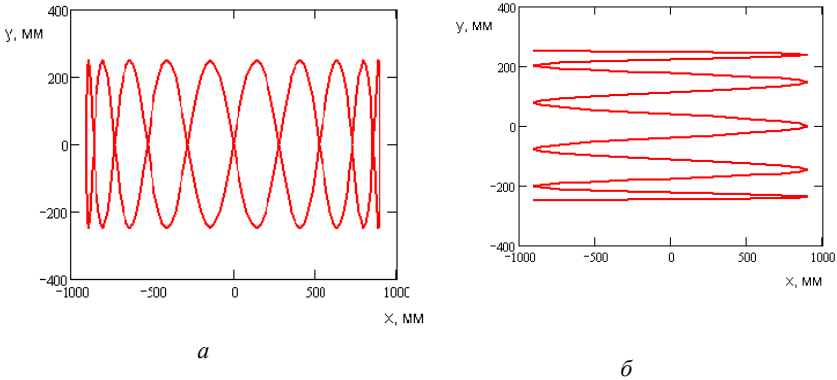


Рис. 3. Примеры траекторий движения электронного луча по поверхности ванны при: а - $1/T_x = 1$ Гц, $1/T_y = 10$ Гц; б - $1/T_x = 10$ Гц, $1/T_y = 1$ Гц (горизонтальная и вертикальная развертки осуществляются по гармоническим функциям)

Скорость движения луча в направлении Ох:

$$V_x(\tau) = \frac{dx}{d\tau} = -x_0 \omega_x \cdot \sin(\omega_x \tau), \quad V_x(x) = -\frac{2\pi}{T_x} \sqrt{x_0^2 - x^2} \quad \text{или}$$

$$V_x(\tilde{x}) = -\frac{2\pi}{T_x} d_\phi \sqrt{\tilde{x}_0^2 - \tilde{x}^2}, \quad \text{где } \tilde{x} = x/d_\phi, \quad \tilde{x}_0 = x_0/d_\phi.$$

Скорость движения луча в направлении Оу получена в первом примере:

$$V_y(\tilde{y}) = \frac{2\pi}{T_y} d_\phi \sqrt{\tilde{y}_0^2 - \tilde{y}^2}, \quad \text{где } \tilde{y} = y/d_\phi, \quad \tilde{y}_0 = y_0/d_\phi.$$

Далее определяем безразмерное время, исходя из модулей скоростей:

$$\tau_x(\tilde{x}) = \frac{T_x}{2\pi\sqrt{\tilde{x}_0^2 - \tilde{x}^2}}, \quad \tau_y(\tilde{y}) = \frac{T_y}{2\pi\sqrt{\tilde{y}_0^2 - \tilde{y}^2}}. \quad \text{С учетом того, что при}$$

вертикальной и горизонтальной развертках каждую точку луч проходит два раза, используя (4), получим:

$$\frac{q}{\bar{q}} = \tilde{\tau}_\phi(\tilde{y}) = \frac{2\tau_x \cdot 2\tau_y}{T_x \cdot T_y} = \frac{1}{\pi^2 \sqrt{\tilde{x}_0^2 - \tilde{x}^2} \sqrt{\tilde{y}_0^2 - \tilde{y}^2}}. \quad (9)$$

На рис. 4 показана зависимость безразмерного среднего теплового потока $q/\bar{q}$ по четверти поверхности ванны при $\tilde{x}_0=18$, $\tilde{y}_0=5$, полученная по формуле (9). Видно, что плотность теплового потока по поверхности развертки крайне неравномерна, максимальная плотность наблюдается вблизи узких стенок ванны и ее углов.

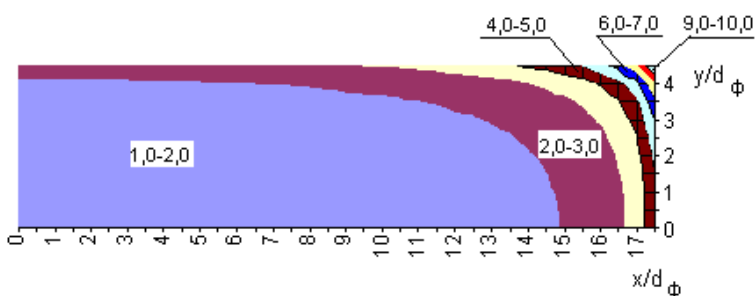


Рис. 4. Распределение безразмерного теплового потока $10^3 q/\bar{q}$ по поверхности четверти ванны при развертке электронного луча (8)

Заключение

1. Разработана методика расчета распределения среднего локального теплового потока, падающего на прямоугольную поверхность, в зависимости от мощности луча электронного пучка и заданных периодических функций его параметрической развертки.

2. Для хорошего заполнения раstra и усреднения импульсного воздействия теплового потока на обрабатываемый материал необходимо, чтобы периоды горизонтальной и вертикальной разверток электронного пучка существенно отличались, при этом максимальная частота развертки по поверхности должна быть не менее 100 Гц.

3. Для практики наиболее интересной является линейно-гармоническая развертка электронного пучка. При ее использовании в промежуточной емкости она дает повышенный тепловой поток в зонах стекания расплава с переплавляемого электрода и противоположной

стенки, на которой при отсутствии данной развертки образуется гарнисаж максимальной толщины.

Список литературы

1. Шиллер З. Электронно-лучевая технология / пер. с нем. У. Гайзиг, З.М. Панцер. – М. : Энергия, 1980. – 528 с.
2. Электронно-лучевая плавка / Б.Е. Патон и [др.]. – Киев: Наук. думка, 1997. – 265 с.
3. Электронно-лучевая плавка и рафинирование металлов и сплавов / Б.Д. Мовчан, А.Л. Тихоновский, Ю.А. Курапов. – Киев : Наукова думка, 1973. – 240 с.

Работа представлена д. т. н. действительным членом Академии инженерных наук м. А.М. Прохорова, профессором кафедры вычислительной техники и прикладной математики ГОУ ВПО «МГТУ» Логуновой О.С.

Дата представления работы: 11.04.2011.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ГАРНИСАЖА И КОКСОВОЙ НАСАДКИ

*Е.М. Курбацкая, Н.П. Сысоев, Ю.В. Федулов
ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»,*

*Россия, 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38
e.kurbatskaya@mail.ru*

Основными осцилляторами, оказывающими влияние на ход технологического процесса, являются динамика изменения состояния гарнисажа и коксовой насадки. Предложенная динамическая модель позволяет стабилизировать тепловое состояние и осуществлять прогноз технологических параметров.

DYNAMIC MODEL OF CHANGE IN SKULL AND FILTRATION ZONE CONDITION

E.M. Kurbatskaya, N.P. Sysoev, Y.V. Fedulov

Basic oscillators influencing a course of technological process, are dynamics of change of skull and filtration zone condition. The offered dynamic model allows to stabilize a thermal condition and to carry out the forecast of technological parameters.

Актуальность работы

Повышение конкурентоспособности выпускаемой продукции и улучшение технико-экономических показателей доменной плавки является одним из приоритетных направлений развития металлургических предприятий. В этой связи является важным совершенствовать расчетные механизмы, повышать многоуровневость анализа, вести поиск зависимостей между различными технологическими показателями процесса, осуществлять прогноз и выдавать достоверные рекомендации по упреждающему регулированию хода доменного процесса.

Проблематика работы

Проблема регулирования теплового состояния сводится к сохранению устойчивого теплового режима печи поддержанием параметров на таком технологическом уровне, который обеспечивает получение чугуна с минимальными отклонениями от заданного состава при использовании всех резервов процесса. Для осуществления успешного регулирования теплового состояния доменной печи с опережением необходимо осуществлять прогноз технологических параметров на несколько выпусков чугуна из доменной печи вперед.

Одной из трудностей стабилизации теплового состояния является тот факт, что каждый технологический осциллятор имеет собственный набор частот, классифицированных по уровню значимости, с которыми осуществляются колебания. Причем отдельные частоты могут входить в комплект другого осциллятора. Проблема стабилизации сводится к определению технологических показателей, имеющих основные по значимости частоты для осуществления регулирующих воздействий.

Цели и задачи работы

Целью работы является создание динамической модели технологических параметров, наиболее представительной отражающих динамику теплового состояния горна и динамику химического состава чугуна по выпускам из доменной печи.

Еще одной целью работы является расширение возможностей системы автоматизированного управления доменной плавкой.

Результаты реализации решения задачи

Проведенные ранее исследования [1] позволили обнаружить скрытые циклы колебаний технологических параметров и найти их периоды. Причем установлено, что каждый технологический осциллятор участвует одновременно в нескольких колебаниях с различными временными периодами, имеющих различные причины, а циклоида каждого параметра представляет собой результирующую интегриро-

ванную характеристику, аккумулирующую характер циклограмм других параметров доменной плавки.

Бесспорным является факт, что периодические колебания состава чугуна и теплового состояния доменной печи, во-первых, являются взаимозависимыми процессами, во-вторых, обусловлены противоточной природой доменного процесса, дискретностью загрузки печи и выпуска из нее продуктов плавки. Ввиду большой тепловой инерционности доменной печи период повторения таких циклов может измеряться десятками суток. Кроме того, выявлено влияние на состав чугуна технологических параметров, отражающих не внешние возмущения, а вторичные возмущения, к которым относятся технологические процессы, происходящие в рабочем пространстве доменной печи.

Критерием целесообразности применения факторного анализа базы данных были две причины. Первая из них заключается в том, что этот вид анализа позволяет сократить размерность анализируемых данных, т.е. осуществить их редукцию. К этой же причине относится возможность обнаружения сравнительно небольшого количества скрытых факторов, которые объясняют зависимости между наблюдаемыми переменными. Вторая причина предполагает возможность определения структуры взаимосвязей между переменными, т.е. классификацию переменных. Результатом факторного анализа стала визуализация факторных нагрузок для выделенных факторов. Отбор факторов осуществлялся с помощью следующих методик: визуализация факторных нагрузок, критерий Кайзера, отбор главных компонент, критерий каменистой осыпи. Одним из этапов факторного анализа была визуализация корреляционной матрицы (рис. 1). На данном рисунке изображено графическое представление параметров дутья. Для некоторых факторов наблюдается очень высокая теснота связи между параметрами, которая подтверждается диаграммой рассеяния. В результате этого определяется новая переменная, включающая в себя наиболее существенные черты остальных переменных.

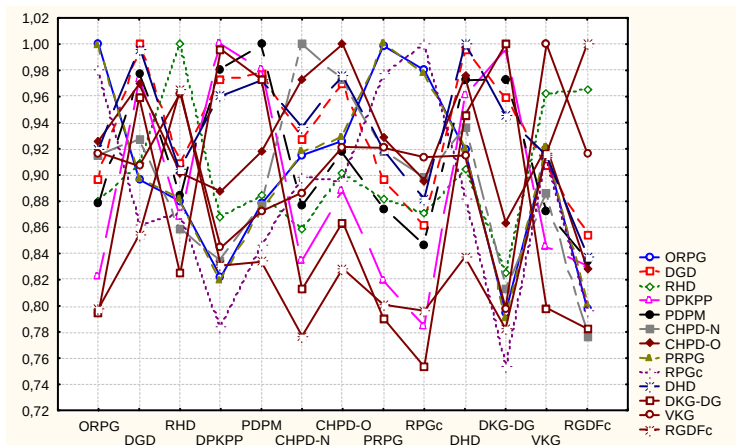


Рис. 1. Графическое представление корреляционной матрицы параметров дутья

Исследования, основанные на факторном анализе, позволили выявить четыре группы факторов, классифицированных по факторным нагрузкам (рис.2). Для каждой из групп определены наиболее представительные технологические параметры. Причем параметры каждой зоны можно при необходимости объединить в единую функцию-фактор, зависящую от всех представителей группы.

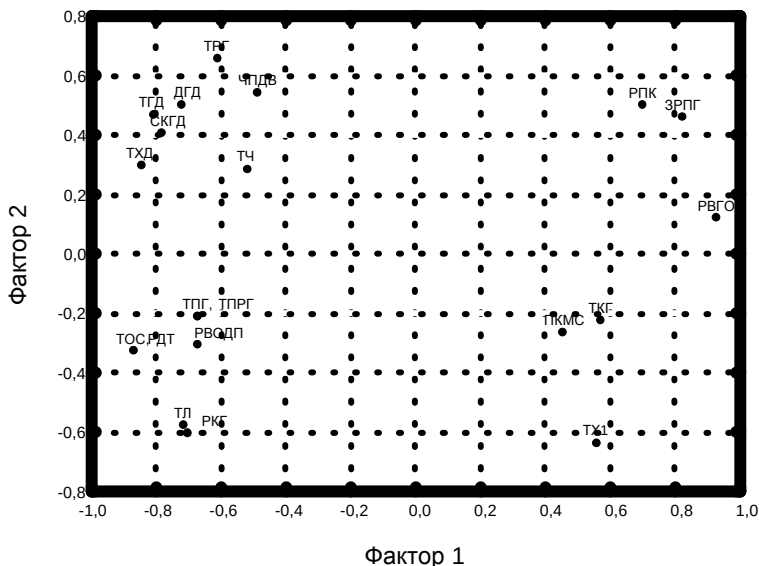


Рис. 2. Графическое представление факторных нагрузок

Благодаря этим исследованиям предложено рабочую зону доменной печи разделить на четыре температурные зоны, характеризующие температуры: фурменной зоны; нижней части горна доменной печи (зона коксовой насадки); нижней части шахты доменной печи; средней части шахты доменной печи.

Несмотря на то, что закономерности изменения температуры каждой из этих зон индивидуальны, температуры зон взаимосвязаны. Например, представительными характеристиками зоны, отражающей работу коксовой насадки, являются: расход воды на охлаждение доменной печи (шахта печи); средняя температура лещади; средний разгар кладки горна; температура окружающей среды.

Традиционно температура холодильников шахты и заплечиков доменной печи является одной из характеристик, отражающих состояние огнеупорной кладки. Кроме того, эта характеристика обычно используется доменщиками для оценки теплового состояния горна. Историческим является тот факт, что в результате разбора аварий на доменных печах, сопровождающихся разгаром кладки, а в единичных случаях и разрывом горна, обнаруживается повышение разности температур на холодильниках, зафиксированное в журналах водопроводчиков. Еще более информативным параметром является не перепад температур холодильников, а непосредственно сама температура.

Анализ закономерностей окислительно-восстановительных процессов, происходящих в доменной печи, выполненный на основе рассмотрения трехмерных микромоделей состава чугуна и шлака, позволил более детально рассмотреть температурные зоны низа доменной печи и подтвердил обоснованность выбора представленных температурных зон.

По мнению авторов, основными осцилляторами, оказывающими влияние на ход технологического процесса, тепловое состояние горна и на химический состав жидких продуктов плавки, являются следующие: динамика изменения состояния гарнисажа и динамика изменения коксовой насадки. Причем началом изменения состояния коксовой насадки возмущающей силой является опускание гарнисажа.

На практике замечено, что при установившейся работе доменной печи и при неизменных внешних воздействиях нарастание гарнисажа с определенной периодичностью чередуется с его оползанием. Механизм теоретической модели оползания гарнисажа, ранее изложенной авторами [2], представляется следующим.

Нарастание гарнисажа происходит преимущественно из минеральной части шихты при опускании проплавляемых шихтовых материалов. Углерод кокса в этом процессе не участвует, в результате чего возникает некоторый избыток кокса и, как следствие, снижается рудная нагрузка. В связи с ростом слоя гарнисажа, этот процесс сопровождается снижением теплопередачи по направлению от рабочего пространства доменной печи к огнеупорной кладке и, следовательно, к холодильникам шахты, что в конечном итоге приводит к уменьшению тепловых потерь. Происходит дополнительное раскачивание нагрева.

По мере повышения температуры слой образовавшегося гарнисажа размягчается, и за счет достаточно большого собственного веса и воздействия сил трения со стороны шихты начинается его оползание.

Влияние изменения состояния гарнисажа на периодичность изменения химического состава чугуна и шлака объясняется следующим образом. В результате оползания гарнисажа повышаются тепловые потери огнеупорной кладкой, с учетом времени запаздывания происходит уменьшение массовой доли кремния и увеличение массовой доли серы в чугуне. Кроме того, процесс оползания гарнисажа сопровождается повышением содержания оксидов калия и натрия в шлаке.

Динамика процессов, протекающих в горне, остается малоизученной вследствие отсутствия непрерывной информации о состоянии фурменных зон, механического перемещения кокса и расплава. Влияние периодически меняющихся характеристик состояния коксовой насадки горна, которая служит для фильтрации через нее жидких про-

дуктов плавки, на динамику химического состава чугуна проявляется в следующем. При анализе состояния коксовой насадки горна [2] было рассмотрено три периода, главным отличием которых является соотношение между фактическим и расчетным выходом чугуна, которое говорит о массе коксовой насадки. Для каждого периода проанализирована динамика массовых долей кремния и серы в чугуне с учетом внешних технологических воздействий. На рис. 3 представлен период, характеризуемый меньшей выдачей чугуна ($Q_{\text{факт}}$) в сравнении с ожидаемым количеством ($Q_{\text{расч}}$) и сравнительно небольшими отклонениями, что говорит о различном состоянии коксовой насадки. Сделан вывод о том, при увеличении фактического выхода чугуна, то есть при выпуске невыданного ранее чугуна из горна, с некоторым запаздыванием начинает возрастать содержание массовой доли серы в чугуне.

Разработке модели предшествовал ряд исследований. Во-первых, были получены следующие модели: статические абсолютные и относительные модели химического состава чугуна и шлака; динамическая модель технологических параметров. Для исследования статических моделей было предложено применять градиентный метод исследования функций. Во-вторых, предложено применение Фурье – преобразований для определения скрытых периодов колебаний технологических параметров, что позволило выявить периоды колебаний технологических осцилляторов и классифицировать их по уровням значимости. В-третьих, применение факторного анализа позволило осуществить редукцию данных, определить взаимозависимости технологических параметров и выделить температурные зоны рабочего пространства доменной печи.

Предлагаемый метод, заложенный в основу модели, базируется на непрерывно измеряемых параметрах доменного процесса в АСУ «Мониторинг работы доменных печей», используемых непосредственно и в качестве исходной информации для расчета ряда критериев, зависящих и (или) влияющих на состав чугуна и тепловое состояние плавки и позволяющих наряду с известными логическими представлениям прогнозировать их изменение, т. е. является экспертной системой, включенной в АРМ (автоматизированное рабочее место).

Исходные данные и рассчитанные на их основе параметры, критерии и результаты прогноза их изменений на три выпуска вперед отображаются на экране монитора в виде временных графиков. Модель позволяет анализировать предысторию на месяц назад. По критериям радиального газораспределения и соотношения кислорода и природного газа в дутье предусмотрены комментарии с логической диагностикой.

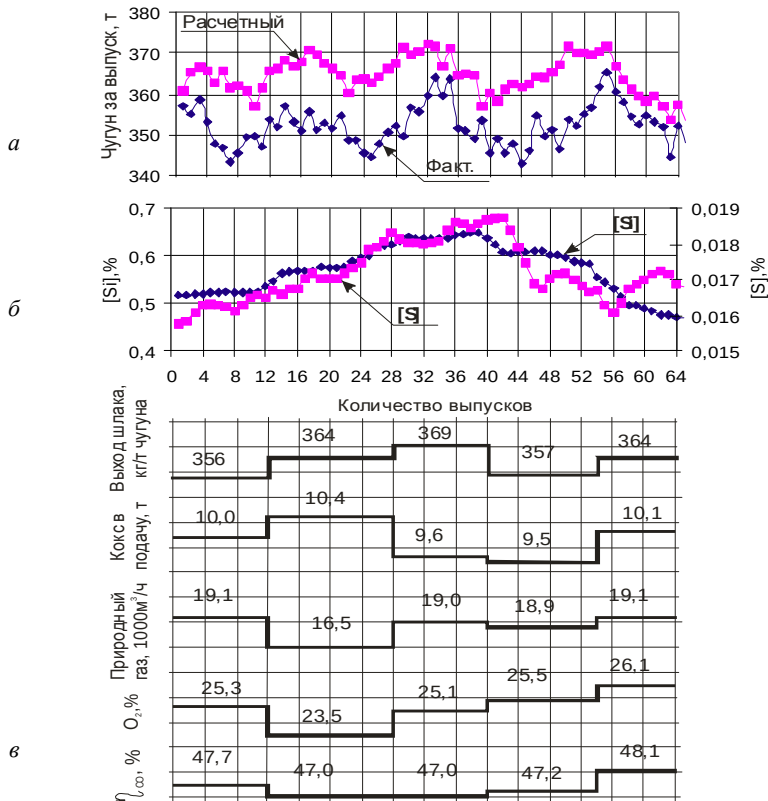


Рис.8. Показатели при превышении расчетного количества выпускаемого чугуна по сравнению с фактическим ($Q_{\text{факт.}} < Q_{\text{расч.}}$):

- а – динамика изменения фактической и расчетной массы чугуна по выпускам;
- б – динамика изменения содержания серы и кремния по выпускам;
- с – динамика изменения выхода шлака, расхода кокса, расхода природного газа, содержания кислорода в горячем дутье и степени использования углекислого газа

Заключение

Таким образом, по результатам работы можно утверждать, что предложенная динамическая модель изменения гарнисажа и коксовой насадки позволяет осуществлять прогноз и стабилизацию теплового состояния рабочего пространства, что, в свою очередь, влияет на улучшение качества выплавляемой продукции и на повышение технико-экономических показателей доменной плавки.

Список литературы

1. Курбацкая Е.М. Оценка параметров доменной плавки с использованием математического аппарата : монография. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. – 65 с.

2. Нестационарность выпуска чугуна из доменной печи / Ю.В. Федулов, Е.М. Курбацкая, А.О. Федулов // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: МГТУ, 2004. – Вып.4. – С. 35 – 39.

Работа представлена д. т. н., действительным членом Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, профессором кафедры вычислительной техники и прикладной математики ГОУ ВПО «МГТУ» Логуновой О.С.

Дата представления работы: 10.04.2011.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ

Г.А. Дубский, Л.Г. Егорова, Е.Г. Бондаренко

*ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»,*

***Россия, 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38
egorov-lyudmil@yandex.ru***

В работе представлено физико-математическое моделирование теплофизического процесса системы «расплав металла – покрытие – стенка кристаллизатора» в момент заливки стали. Для математического моделирования разработан программный продукт, использование которого позволяет проследить характер установления температурного поля в покрытии при тепловом ударе в момент заливки стали; проанализировать температурное поле от времени в покрытии и стенке кристаллизатора и определить максимальную величину температуры.

MATHEMATICAL MODELING OF THERMO PHYSICAL PROCESSES IN LAYERED STRUCTURES

G.A. Dubsky, L.G.Egorova, E.G. Bondarenko

Physical and mathematical simulation of thermal process of system «metal melt - a coating - a crystallizer pan wall» at the moment of steel priming is in-process presented. The software product which one utilization allows to

trace character of determination of temperature pattern in a coating at a heat shock at the moment of steel priming is developed for mathematical modeling; to analyze temperature pattern from time in a coating and a wall of a crystallizer pan and to specify the max rate of temperature.

Актуальность работы

При производстве кристаллизаторов для сортовых, блюмовых и слябовых машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) используют толстолистовую медь, из которой изготавливают плиты необходимых размеров с последующей доработкой их рабочих поверхностей до требуемых технологических и технических условий. Кристаллизаторы, собранные из таких листов, как правило, показывают низкую производительность из-за быстрого износа рабочих стенок, что сокращает время межремонтных периодов, а значит, увеличивает текущие расходы, повышая, тем самым, себестоимость единицы продукции.

Для увеличения срока работы кристаллизаторов в настоящее время все чаще прибегают к определенным технологическим модификациям их рабочих стенок. Экспериментально установлено, что наиболее перспективным методом модификации является газотермический метод напыления тугоплавких и тяжелых металлов и сплавов на рабочую медную стенку кристаллизатора. Одной из разновидностей этого метода является детонационный метод напыления. Достоинство его заключается в том, что при детонации рабочих газов, напыляемые порошки приобретают очень высокие скорости ($V \sim 800\text{--}1300$ м/с), сгустки выстреливаемых порошков имеют хорошую локализацию в пространстве, могут использоваться порошки любого сорта и фракции. При разработке технологии напыления покрытий необходимы доскональные знания о поведении теплофизических характеристик формируемого покрытия, модифицированной стенки и системы «покрытие – стенка кристаллизатора».

Математическая модель теплофизических процессов в слоистых структурах

Как показывают экспериментальные исследования [1, 2], температуропроводность, теплопроводность, теплоемкость напыленных покрытий очень сильно зависят от качества покрытия, а также от переходного слоя. Целью данной работы является физико-математическое моделирование теплофизического процесса системы «расплав металла – покрытие – стенка кристаллизатора» в момент заливки стали (тепловой удар) и разработка программного обеспечения для решения данной задачи.

Кристаллизатор МНЛЗ с введенной в него затравкой и заполненный расплавом стали представляет собой сложную термодинамическую систему, в которой развиваются в пространстве и времени сложные теплофизические процессы, приводящие к формированию «корки» слитка, термонапряжений в покрытии и медной стенке на границе покрытие – стенка. Прочность сцепления покрытия со стенкой кристаллизатора во многом зависит от характера поведения температурного поля в покрытии и на границе покрытие – стенка кристаллизатора. Схема описываемой термодинамической системы приведена на рис. 1.

Для описания этой термодинамической системы мы воспользуемся нестационарным уравнением теплопроводности, учитывающим зависимость теплопроводности материалов покрытия и стенки от температуры.



Рис. 1. Термодинамическая система
«расплав металла – покрытие – стенка кристаллизатора»

Для двухслойной задачи математическая модель может быть представлена в следующем виде:

$$c_i \rho_i \frac{\partial \Theta_i(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_i \Theta \frac{\partial^2 \Theta_i(x_i, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial \lambda_i}{\partial \Theta} \left(\frac{\partial \Theta_i(x_i, \tau)}{\partial x} \right)^2 \quad (i=1, 2); \quad (1)$$

$$\Theta_1(x, 0) = \Theta_{01}, \quad (2)$$

$$\Theta_2(x, 0) = \Theta_{02}, \quad (3)$$

$$\Theta_1(l, \tau) = \Theta_2(l, \tau), \quad (4)$$

$$q_1 = \lambda_1 \frac{\partial \Theta_1(l, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial \Theta_2(l, \tau)}{\partial x} = q_2, \quad (5)$$

$$\lambda_1 = \lambda_{01} [1 - k_1 \Theta_1(x, \tau) + k_2 \Theta_1(x, \tau)], \quad (6)$$

$$\lambda_2 = \lambda_{02} (1 - k_3 \Theta_2(x, \tau)) \quad (7)$$

где Θ_{01} – температура расплава; Θ_{02} – температура охлаждающей жидкости; a_1 – температуропроводность покрытия; a_2 – температуропроводность материала стенки кристаллизатора; $\Theta_1(x, \tau)$ – переменная температура покрытия; $\Theta_2(x, \tau)$ – переменная температура стенки кристаллизатора; λ_{01} – теплопроводность покрытия при 0°C ; λ_{02} – теплопроводность материала стенки кристаллизатора при 0°C ; k_1, k_2, k_3 – коэффициенты пропорциональности, определяемые из эксперимента. Толщина покрытия много меньше толщины стенки кристаллизатора, т.е. $\frac{l}{L-l} \ll 1$.

Проведем оценочный характер поведения температурного поля для термодинамической системы, состоящей из ограниченного и полуограниченного тел: $\Theta_1(0 \leq x \leq l)$; $\Theta_2(l \leq x \leq L)$, у которых в заданном температурном интервале будем считать, что $\lambda_1 = \lambda_{c\rho 1} = \lambda_{01}$ и $\lambda_2 = \lambda_{c\rho 2} = \lambda_{02}$. Например, для медной стенки кристаллизатора $\lambda_{02} \approx 350 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$, а для покрытия из никеля $\lambda_{01} \approx 60 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$. Запишем систему уравнений (1)-(8) для медного кристаллизатора с покрытием из никеля:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial x^2}, \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial x^2}; \end{cases} \quad (10)$$

$$\Theta_1(x, 0) = \Theta_2(x, 0) = 20^\circ \text{C}; \quad (11)$$

$$\Theta_1(l, \tau) = \Theta_2(l, \tau); \quad (12)$$

$$\lambda_{01} \frac{\partial \Theta_1(l, \tau)}{\partial x} = \lambda_{02} \frac{\partial \Theta_2(l, \tau)}{\partial x} ; \quad (13)$$

$$\Theta_1(0, \tau) = \Theta_{01} = 1530^0 \text{ C} ; \quad (14)$$

$$\Theta_2(L, \tau) = \Theta_{02} = 80^0 \text{ C} ; \quad (15)$$

$$a_1 = \frac{\lambda_{01}}{c_1 \rho_1}, \quad a_2 = \frac{\lambda_{02}}{c_2 \rho_2}.$$

Толщина покрытия составляет $l = 150$ мкм. Численное решение дифференциальных уравнений с заданными краевыми условиями, соответствующими тепловому удару в момент заливки стали, выполнялось с использованием неявной разностной схемы. Для математического моделирования изменения теплофизических процессов в системе «покрытие – стенка кристаллизатора» при различных начальных исходных данных был разработан программный продукт, который позволяет выполнить [3]:

- ввод и изменение исходных данных для коррекции модели;
- математический расчет результатов моделирования;
- графическое отображение результатов математического моделирования.

Программная реализация и результаты моделирования

Для реализации программного продукта был выбран язык программирования C++ и интегрированная среда программирования Borland C++ Builder 6.0.

В программном продукте можно выделить три основных модуля: подготовка исходных данных, реализация математической модели теплового состояния покрытия, графическая визуализация данных.

Результатом работы модуля реализации математической модели является таблица со значениями температуры покрытия, рассчитанная с учетом толщины покрытия и количества интервалов разбиения.

Модуль графической визуализации данных предназначен для отображения результатов реализации математической модели. По результатам математического моделирования получены следующие зависимости:

- зависимость температуры покрытия по толщине и времени (рис. 2);
- поверхность температур в координатах (l, Θ, τ) для точек по толщине покрытия;
- поверхность линий уровня для температурного поля во времени и пространстве;

- зависимость температуры покрытия в каждой точке по времени;
- зависимость температуры границы покрытия с металлом и стенкой кристаллизатора.

Использование представленного программного продукта позволило проследить характер установления температурного поля в покрытии при тепловом ударе в момент заливки стали, проанализировать температурное поле от времени в покрытии и стенке кристаллизатора и определить максимальную величину температуры.

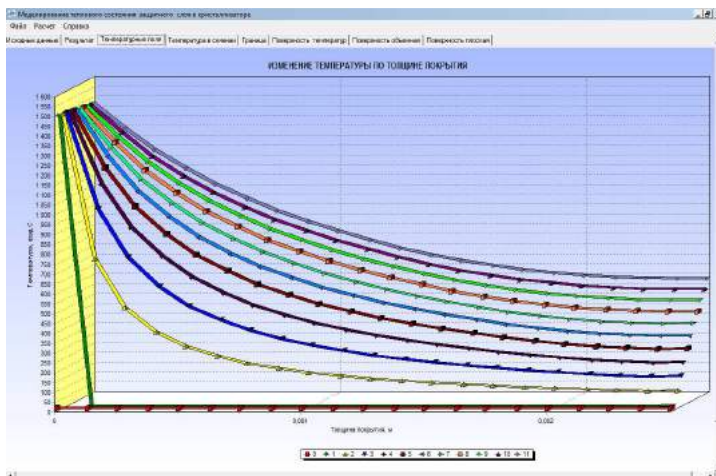


Рис. 2. Зависимость температуры покрытия по толщине и времени

Заключение

Полученные результаты можно использовать для выбора технологических условий напыления модифицирующих покрытий из никеля и плакированного никеля на рабочую стенку кристаллизатора, способных противостоять возможному их отслаиванию, за счет возникающих касательных тепловых напряжений при тепловом ударе.

Список литературы

1. Теплофизические свойства детонационно напыленного никеля на медные пластины кристаллизаторов МНЛЗ / Г.А. Дубский, [и др.] // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2008. – № 2. – С. 57–60.
2. Теплофизические свойства детонационно напыленной меди при заданных технологических условиях / Г.А. Дубский [и др.] // Сб. докл. 66 НТК МГТУ. – Магнитогорск: ГОУ ВПО МГТУ, 2008. – С.118 – 121.

3. Моделирование теплового состояния защитного слоя в кристаллизаторе: свидетельство об отраслевой регистрации разработки – М.: ВНИИЦ, 2009. – № 50200901232 / Л.Г.Егорова, Г.А. Дубский, Ю.Б. Кухта, Е.Г. Бондаренко.

Работа представлена д.т.н., членом корреспондентом Академии инженерных наук им. А.М.Прохорова, профессором кафедры вычислительной техники и прикладной математики ГОУ ВПО «МГТУ» Ячиковым И.М.

Дата представления работы: 12.04.2011.

МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА, ПАДАЮЩЕГО НА ПОВЕРХНОСТЬ МЕТАЛЛА ОТ ДУГ В ДСП

И.М. Ячиков, Е.М. Зарецкая

ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,

*Россия, 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38
Jachikov@mail.ru*

Создана математическая модель распределения теплового потока от одной и трех электрических дуг, расположенных под углом к теплопринимающей поверхности на произвольно расположенную площадку, находящуюся на поверхности ванны дуговой печи. Проанализированы зависимости тепловых потоков от азимутальной координаты и расстояния от центра распада электродов для условий работы сталеплавильной печи ДСП-180.

MODEL FOR HEAT FLOW INCIDENT ON THE METAL SURFACE FROM THE ARCS IN THE EAF

I.M. Yachikov, E.M. Zaretskaya

A mathematical model of heat flow spreadability from one and three electric arcs are located at an angle to the surface on heat randomly located site, situated on the surface of the bath arc furnace. The dependence of heat flow on the azimuthal coordinate and the distance from the center of the collapse of the electrodes for the working conditions of steel furnace EAF-180

Актуальность работы

В дуговой сталеплавильной печи (ДСП) трансформация электрической энергии в тепловую происходит в разрядном промежутке между торцами электродов и металлом. Электрическая цепь на этом промежутке замыкается электрической дугой. За счет электромагнит-

ного взаимодействия электрических токов, протекающих по графитированным электродам и в поверхностных слоях расплава, происходит выдувание дуги от центра печи. Средний угол наклона столба дуги θ по отношению к нормали зеркала ванны колеблется для ДСП различной мощности и емкости в пределах $45 - 65^\circ$ [1].

В данной работе рассматривается модель теплового потока от трех наклонных электрических дуг длиной l_d на произвольно расположенную площадку, находящуюся на поверхности ванны.

Реализация решения задачи

Тепловой поток от трех электрических дуг находим по принципу суперпозиции, как сумму тепловых потоков, падающих в данную точку от трех дуг. Рассмотрим математическую модель теплового потока на произвольно расположенную площадку dS , находящуюся на поверхности ванны от электрической дуги, расположенной под углом к ней.

Интенсивность облучения элементарной площадки поверхности посредством точечного цилиндрического излучателя мощностью dP можно определить [2]

$$dq = K_s \frac{dP \cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi^2 R^2}, \quad (1)$$

где R – расстояние от источника излучения до центра площадки; K_s – поправочный экспериментальный коэффициент, учитывающий долю мощности дуги, идущую на излучение; φ_1 – угол между нормалью к оси дуги и направлением излучения; φ_2 – угол между нормалью к поверхности ванны и направлением излучения.

Введем декартову систему координат $Oxyz$, связанную с центром привязки дуги, причем плоскость Oxy совпадает с поверхностью ванны, а начало координат O является пересечением оси дуги OA и поверхности ванны (рис. 1, а). Ось электрической дуги находится в плоскости Oxz . Положение площадки dS задается ее расстоянием r от точки O и углом ψ . Вектор $\vec{k}$ перпендикулярен площадке dS , а вектор $\vec{n}$ лежит в плоскости AOC и перпендикулярен прямой OA . В выбранной декартовой системе имеем координаты точек: $C(r \cos \psi, r \sin \psi, 0)$; $A(-z_0 \sin \theta; 0; z_0 \cos \theta)$.

Для определения углов φ_1 и φ_2 , используя векторную алгебру, напомним координаты основных векторов:

$$\begin{aligned} \vec{R} &= \vec{AC} = (r \cdot \cos \psi + z_0 \cdot \sin \theta; r \cdot \sin \psi; -z_0 \cdot \cos \theta); \\ \vec{CA} &= (-r \cdot \cos \psi - z_0 \cdot \sin \theta; -r \cdot \sin \psi; z_0 \cdot \cos \theta); \end{aligned}$$

$$\vec{OA} = (-z_0 \sin \theta; 0; z_0 \cos \theta); \quad \vec{AO} = (z_0 \sin \theta; 0; -z_0 \cos \theta);$$

$$\vec{k} = (0; 0; 1).$$

Найдем расстояние от источника излучения до центра dS

$$R = |\vec{R}| = \sqrt{(r \cdot \cos \psi + z_0 \sin \theta)^2 + (r \cdot \sin \psi)^2 + (z_0 \cos \theta)^2}, \quad \text{упрощая,}$$

получим

$$R = \sqrt{r^2 + 2 \cdot r \cdot z_0 \cdot \cos \psi \cdot \sin \theta + z_0^2}.$$

(2)

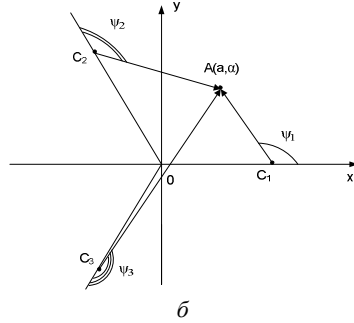
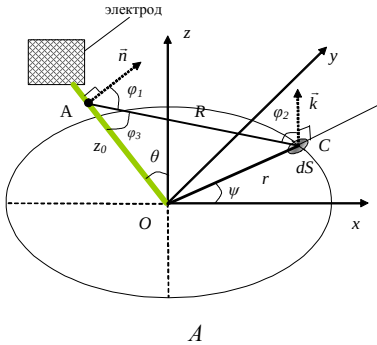


Рис. 1. К расчету плотности теплового излучения дуги на площадку dS :
а – модель от одной дуги; б- модель от трех дуг

Определим косинусы углов

$$\cos \varphi_2 = \frac{\vec{k} \cdot \vec{CA}}{|\vec{k}| \cdot |\vec{CA}|} = \frac{z_0 \cdot \cos \theta}{R}; \quad (3)$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{1}{R} \sqrt{R^2 - (r \cdot \cos \psi \cdot \sin \theta + z_0)^2}.$$

Подставив в последнее выражение значение R^2 , получим

$$\cos \varphi_1 = \frac{r}{R} \sqrt{1 - \cos^2 \psi \cdot \sin^2 \theta}. \quad (4)$$

С учетом соотношений (2)-(4), интегрируя (1), получим тепловой поток в точке C от излучения всей дуги:

$$q_{\text{изл}} = \frac{K_3 \cdot P \cdot r \cdot \cos \theta \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \psi \cdot \sin^2 \theta}}{\pi^2 \cdot l_0} \int_0^{l_0} \frac{z_0}{(r^2 + 2 \cdot r \cdot z_0 \cdot \cos \psi \cdot \sin \theta + z_0^2)^2} dz_0$$

или

$$q_{uzl}(r, \psi, \theta) = -\frac{K_2 \cdot P \cdot \cos \theta}{2 \cdot \pi^2 \cdot B^2 \cdot r \cdot l_\partial} \cdot \left(\frac{A \cdot B \cdot l_\partial \cdot r + B \cdot r^2}{r^2 + 2 \cdot A \cdot r \cdot l_\partial + l_\partial^2} + \right. \\ \left. + A \cdot \arctg\left(\frac{l_\partial + rA}{rB}\right) - B - A \cdot \arctg\left(\frac{A}{B}\right) \right), \quad (5)$$

где $A = \cos \psi \cdot \sin \theta$; $B = \sqrt{1 - A^2}$.

Переходим к модели теплового потока при одновременном горении трех дуг. Рассмотрим декартову систему координат $Oxyz$, началом которой является центр распада электродов (рис. 1, б). Плоскость Oxy совпадает с поверхностью ванны, ось Ox проходит через центр первого электрода, а ось электрической дуги находится в плоскости Oxz . Тогда центры привязки дуг с учетом их отклонения от нормали имеют следующие координаты:

$$C_1 \left(\frac{D_p}{2} + l_\partial \sin(\theta); 0 \right), \\ C_2 \left(-\frac{D_p + 2l_\partial \sin(\theta)}{4}; \frac{\sqrt{3}(D_p + 2l_\partial \sin(\theta))}{4} \right), \\ C_3 \left(-\frac{D_p + 2l_\partial \sin(\theta)}{4}; -\frac{\sqrt{3}(D_p + 2l_\partial \sin(\theta))}{4} \right),$$

где D_p - диаметр распада электродов.

Находим тепловой поток в точке $A(a \cdot \cos \alpha; a \cdot \sin \alpha)$, которая является центром площадки dS . Векторы, проходящие через центры привязки дуг и точку A , имеют координаты $C_i \vec{A}$ ($C_{ix} - A_x, C_{iy} - A_y$), а их длина $r_i = |C_i \vec{A}|$, где $i=1, 2, 3$.

Определим углы ψ_i , показанные на рис. 1, б:

$$\cos \psi_i = \frac{O\vec{C}_i \cdot C_i \vec{A}}{|O\vec{C}_i| \cdot |C_i \vec{A}|}.$$

Зная r_i и $\cos \psi_i$, запишем суммарный тепловой поток, падающий на элементарную площадку, как сумму тепловых потоков от каждой из дуг

$$q_{uzl}(a, \alpha, \theta) = \sum_{i=1}^3 q_{iuzl}(r_i, \psi_i, \theta). \quad (6)$$

С использованием созданной математической модели (5)-(6) был проанализирован тепловой поток излучения от дуги, действующий на расплав. Считаем, что мощность, выделяемая на электрических дугах в ДСП, определяется как $P_0 = S \cdot \cos \varphi = 3 \cdot U \cdot I$, где $\cos \varphi$ – коэффициент мощности электропечной установки в эксплуатационном режиме; U , I – действующие значения напряжения и тока дуги соответственно. В ДСП-180 ОАО «ММК» при максимальной полной мощности $S=150$ МВА и $\cos \varphi = 0,8$ получим мощность на одной дуге $P \approx 40$ МВт (при действующих напряжении $U = 570$ В и токе $I = 70$ кА). Для условий горения дуги на жидкую ванну ее длину определяем как $l_d = \frac{(U - U_a - U_k)}{b}$. Принимая сумму падений анодного и катодного напряжений $U_a + U_k \approx 17$ В и градиент потенциала в столбе дуги $b = 1,6$ В/мм [3], получим $l_d \approx 0,5$ м.

При рассмотренных выше условиях на рис. 2 показаны зависимости теплового излучения одной дуги от угловой координаты ψ , при разных углах наклона дуги θ . Видно наличие плоскости зеркальной симметрии Oxz (см. рис. 1, а), при этом минимальное значение теплового потока наблюдается при $\psi = 0^\circ$, а максимальное – вблизи направления $\psi = 180^\circ$.

На рис. 3 показано распределение теплового потока по азимутальной координате при разном расстоянии от центра распада электродов. Видно, что минимальный тепловой поток наблюдается между электродами в направлениях $\alpha = 60, 180$ и 300° . Наибольший тепловой поток внутри диаметра распада электродов ($r < D_p/2$) отмечается в направлениях их осей, а вне диаметра распада электродов ($r > D_p/2$) в направлениях, смещенных от осей электродов на $\pm 15^\circ$.

Заключение

Таким образом, создана математическая модель распределения теплового потока на поверхность ванны ДСП от одной и трех наклонных электрических дуг. Установлено, что

- при отклонении электрической дуги от нормали к поверхности ванны падающий тепловой поток перестает быть осесимметричным;

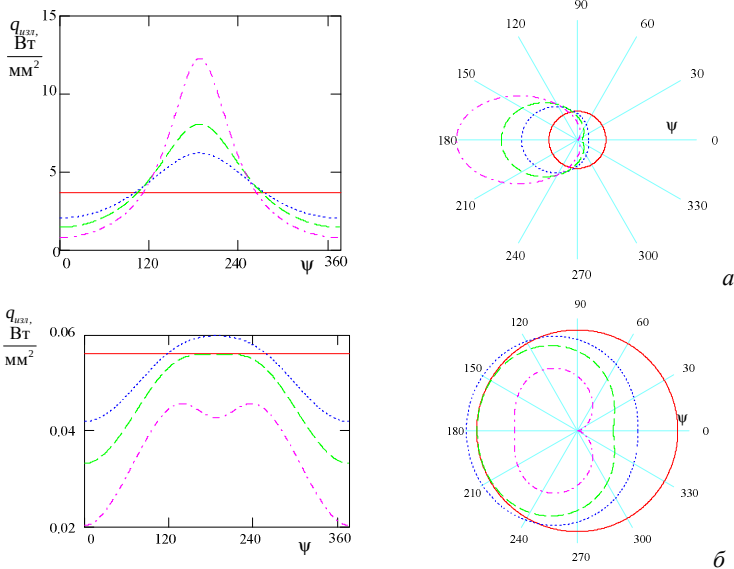


Рис. 2. Тепловой поток вдоль азимутальной координаты на разных расстояниях от точки привязки дуги: а – $r/l_0=1$; б – $r/l_0=5$. Угол наклона дуги: — $\theta=0^\circ$; $\theta=20^\circ$; --- $\theta=30^\circ$; - · - · $\theta=45^\circ$

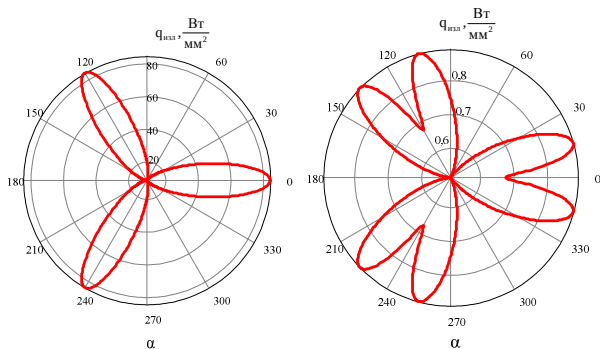


Рис. 3. Распределение теплового потока по азимутальной координате на расстоянии от центра распада электродов: а – $r=0,4$ м; б – $r=1,4$ м
— в распределении тепловых потоков имеет место зеркальная симметрия относительно плоскости, проходящей через ось дуги и перпендикулярной поверхности ванны;

- с увеличением расстояния от точки привязки дуги на расплав тепловой поток резко убывает и практически не зависит от азимутального направления при $r/l_0 > 5$;
- при горении трех электрических дуг минимальный тепловой поток наблюдается в направлениях между электродами, а наибольший - вблизи их осей.

Список литературы

1. Макаров, А.Н. Теплообмен в дуговых сталеплавильных печах. –Тверь : ТГТУ, 1998. –184 с.
2. Оптимальные тепловые режимы дуговых сталеплавильных печей / А.Н. Макаров, А.Д. Свенчанский. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 96 с.
3. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей / Л.Е. Никольский, В.Д. Смоляренко, Л.Н. Кузнецов. – М. : Металлургия, 1981. – 320 с.
4. Ячиков И.М., Портнова И.В. // Наука и технологии: тр. XXIV Российской школы по проблемам науки и технологий, посвященной 80-летию со дня рождения академика В.П. Макеева. – М.: [Б.и.], 2004. – Т. 1. – С. 224 – 230.

Работа представлена д. т. н., действительным членом Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, профессором кафедры вычислительной техники и прикладной математики ГОУ ВПО «МГТУ» Логуновой О.С.

Дата представления работы: 11.04.2011.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ «ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ ВЕНТИЛЯТОР – СЕТЬ ВОЗДУХОВОДОВ» ДЛЯ АНАЛИЗА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

*М.В. Вечёркин, Е.Е. Елисеева, А.А. Николаев, Л.В. Мельцер-Шафран,
С.Г. Шевченко*

ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,

*Россия, 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38
max_vecherkin@mail.ru*

Показаны основные принципы построения математической модели, позволяющей анализировать потребляемую мощность и КПД центробежных вентиляторов при работе в разветвленных сетях. Приведены результаты сравнительного анализа энергоэффективности различных способов регулирования производительности при работе одного вентилятора и вентиляторов, работающих в составе вентиляторной станции.

**MATHEMATICAL SIMULATION OF THE PHYSICAL
PROCESSES IN THE SYSTEM «CENTRIFUGAL VENTILATOR –
AIR DUCT NETWORK» FOR THE ANALYSES OF THE ENERGY
CHARACTERISTICS BY DIFFERENT WAYS OF THE
PERFORMANCE CONTROL**

*M.V. Vecherkin, E.E. Eliseeva, A.A. Nikolaev, L.V. Meltser-Shafran,
S.G. Shevchenko*

The basic principles of the construction of a mathematical model are presented, which enables the analyzing of consumed energy and efficiency factor of the centrifugal ventilators operated in the ramified networks. The results of the comparative analyses of energy efficiency are adduced, concerning the different ways of the performance control of the ventilator, operating as a single unit or as the part of a ventilator station.

Актуальность работы и постановка задачи

Турбомеханизмы, потребляя до четверти всей вырабатываемой в стране электроэнергии, имеют существенный резерв экономии электроэнергии за счет перехода к регулированию их производительности по потребностям производства. Наибольший энергосберегающий эффект может быть достигнут для мощных турбомеханизмов, оснащенных высоковольтным электроприводом переменного тока. Типичным примером является работа дутьевых центробежных вентиляторов в условиях металлургической и химической промышленности.

Для одиночного вентилятора, оснащенного осевым направляющим аппаратом, возможны следующие основные способы регулирования производительности:

- дросселирование (регулирование с помощью запорной арматуры на стороне нагнетания);
- регулирование частоты вращения вентилятора;
- изменение угла поворота лопаток осевого направляющего аппарата;
- комбинированный – сочетание нескольких способов.

Дросселирование является единственным способом, обеспечивающим индивидуальный расход воздуха каждого отдельного потребителя при работе вентилятора на разветвленную сеть.

Частотное регулирование обеспечивает регулирование производительности в широком диапазоне с высоким КПД вентилятора. Однако реализация такого способа требует существенных капитальных затрат, так как стоимость мощных высоковольтных преобразователей частоты достаточно высока и срок их окупаемости во многих случаях превосходит срок их службы.

Регулирование производительности с помощью осевого направляющего аппарата может быть достаточно эффективно при его оснащении устройством дистанционного изменения угла поворота лопаток.

Для разветвленных сетей с несколькими потребителями задача выбора рационального способа (или сочетаний способов) регулирования не имеет универсального решения. Выбор необходимо осуществлять на основе предварительной оценки энергетической эффективности каждого из способов регулирования с учетом всех особенностей технологического участка. Очевидно, что в условиях непрерывного производства такую оценку необходимо проводить на математической модели.

Широко распространен графический метод, основанный на анализе паспортных аэродинамических характеристик вентиляторов и характеристик сети воздуховодов. Метод достаточно точен и подробно описан в литературе. Однако для целей сравнительного анализа он требует многочисленных и многократных графических построений, которые с трудом поддаются автоматизации.

Существенно более эффективным является анализ математических моделей, в которых система «вентилятор-сеть» представлена в виде аналитических функций и (или) массивов численных данных. При этом математическая модель должна предполагать возможность анализа каждого из упомянутых способов регулирования производительности.

Моделирование работы вентилятора

Как известно, все основные свойства турбомеханизмов вообще и вентиляторов в частности определяются аэродинамическими характеристиками, представляющими собой экспериментальные графические зависимости полного давления, потребляемой механической мощности и КПД от производительности вентилятора.

Эти графические характеристики с достаточной для инженерных расчетов точностью могут быть аппроксимированы следующими аналитическими функциями [1]:

$$H = a_1 Q^2 + b_1 \omega Q + c_1 \omega^2; \quad (1)$$

$$P = a_2 \omega Q^2 + b_2 \omega^2 Q + c_2 \omega^3; \quad (2)$$

$$\eta = \frac{QH}{P} = \frac{a_1 Q^3 + b_1 \omega Q^2 + c_1 \omega^2 Q}{a_2 \omega Q^2 + b_2 \omega^2 Q + c_2 \omega^3}, \quad (3)$$

где H – полное давление вентилятора, $Па$; Q – производительность, $м^3/с$; P – мощность на валу $Вт$; ω – скорость двигателя, $рад/с$; $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ – постоянные коэффициенты.

Данные аппроксимирующие функции позволяют проводить анализ работы вентилятора при дроссельном и частотном регулировании, но не учитывают зависимость характеристик вентилятора от угла поворота лопаток осевого направляющего аппарата.

Решением проблемы является представление коэффициентов $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ как функций угла поворота лопаток α . Часто такие зависимости существенно нелинейны и имеют несколько экстремумов, поэтому подбор аппроксимирующих функций может встретить определенные сложности.

В первом приближении, при невысоких требованиях к точности модели, можно воспользоваться полиномиальной аппроксимацией. К сожалению, этот путь не всегда может быть реализован, так как он не позволяет получить достаточной точности итогового результата вследствие низкого приближения аппроксимирующих полиномов к исходным зависимостям. Увеличение степени полиномов не приводит к повышению качества приближения в целом. Однако при анализе в узком диапазоне изменения угла поворота лопаток полиномиальная аппроксимация дает хорошие результаты, и выражения (1)-(3) превращаются в функции трех переменных – Q, ω и α .

Для повышения достоверности необходимо выбирать такой путь построения модели, который позволит обеспечить требуемую точность во всем диапазоне изменения угла поворота. Один из таких путей приведен в работе [2], где для задания коэффициентов $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$ используются методы сплайновой интерполяции данных. Сплайн-интерполяция может быть реализована программно, либо с использованием встроенных функций таких широко распространенных математических пакетов как, Mathcad, Matlab, Maple.

Таким образом, применение выражений (1)-(3) в сочетании с программными средствами интерполяции данных позволяет создать математическую модель с достаточной для инженерных расчетов точностью, описывающую работу центробежного вентилятора.

Моделирование вентиляционной сети

При моделирования разветвленных вентиляционных сетей используются различные методы: графический, электрического моделирования, теории графов.

Для целей сравнительного анализа наилучшим является метод электрического моделирования. Метод основан на использовании аналогии между прохождением тока в электрической цепи и движением воздуха в магистрали воздухопровода [3].

Математическое описание эквивалентной электрической модели основано на двух условиях:

1. **Баланс расходов в узлах** – алгебраическая сумма расходов воздуха в любом узле сети равна нулю, так как количество воздуха, поступающее к какому-либо узлу сети, равно количеству воздуха, отходящему от него.

2. **Баланс потерь напора по замкнутым контурам** – алгебраическая сумма потерь давления по любому замкнутому контуру должна быть равна нулю, так как должны быть равны между собой потери давления по любому возможному пути движения воздуха от точки разветвления потоков до точки их встречи.

В соответствии с этими условиями распределение воздуха в сети можно описать с помощью следующих уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n Q_i = 0; \\ \sum_{j=1}^m H_j + H_0 = \sum_{k=1}^l R_k Q_k^n, \end{cases} \quad (4)$$

где H_j – давление, создаваемое вентилятором в замкнутом контуре, Па; Q – расход воздуха через участок, $\text{м}^3/\text{с}$; H_0 – противодавление (естественная тяга), Па; R – аэродинамическое сопротивление участка сети, $\text{кг}/\text{м}^7$; n – показатель степени, зависящий от характера движения воздуха через участок.

Метод электрического моделирования имеет следующие очевидные преимущества:

- наглядное представление сколь угодно сложной вентиляционной сети в виде эквивалентной электрической схемы;
- аналитическое описание сети уравнениями, сходными по форме с законами Кирхгофа;
- простота задания и изменения исходных параметров модели;
- возможность использования программных математических пакетов для быстрого поиска решений.

Реализация данного способа применительно к сложной разветвленной сети с несколькими потребителями, имеющими различный расход воздуха, показана в работе [4].

Методика сравнительного анализа

Сущность методики заключается в реализации следующих пунктов:

1. По известным аэродинамическим характеристикам вентиляторов составляется математическая модель с использованием аналитических функций (1)-(3) и средств компьютерной интерполяции данных.

2. По чертежам сети воздуховодов определяется вид электрической схемы замещения. Рассчитываются параметры каждого элемента схемы.

3. Составляется система уравнений, описывающая электрическую схему замещения, согласно правилам (4).

4. Задаются значения расхода воздуха каждого потребителя исходя из реальных потребностей производства.

5. Находится решение системы уравнений численными методами. Неизвестными в системе являются полное давление и производительность вентиляторов (рабочие точки).

6. Для рабочих точек находятся соответствующие им кривые на расходно-напорных характеристиках вентиляторов: а) при дроссельном регулировании; б) при частотном регулировании; в) при регулировании осевым направляющим аппаратом.

7. Рассчитываются соответствующие рабочим точкам параметры регуляторов производительности: а) сопротивление дроссельной заслонки; б) частота вращения двигателя (как положительный корень уравнения (1); в) угол поворота лопаток осевого направляющего аппарата.

8. По известным рабочим точкам вентиляторов и параметрам регуляторов рассчитываются потребляемая мощность (2) и КПД (3) для каждого способа регулирования производительности.

9. Пункты 5-8 повторяются для различных значений производительности в пределах рабочего диапазона расхода воздуха потребителями.

10. По результатам расчетов строятся: а) график зависимости мощности, потребляемой вентиляторами от суммарного расхода воздуха; б) график зависимости КПД вентилятора от суммарного расхода воздуха.

11. Производится сравнительная оценка потребляемой мощности и КПД для рабочих режимов вентиляторов, делается вывод о пре-

имуществе того или иного способа регулирования с точки зрения энергоэффективности, оцениваются границы рабочих диапазонов вентиляторов.

Примеры реализации методики

Описанная методика была применена для анализа работы дутьевых вентиляторов ВВН-20, широко используемых в металлургической и химической промышленности.

Результаты анализа работы одиночного вентилятора приведен на рис. 1. Для каждой расчетной точки на зависимостях потребляемой из сети мощности P от расхода Q (рис. 1а) показаны значения регулируемых параметров: сопротивление дроссельной заслонки, угол поворота лопаток и скорость двигателя (об/мин) соответственно для дросселирования, регулирования осевым направляющим аппаратом и частотного регулирования. Расчет потребляемой из сети мощности велся с учетом КПД частотного преобразователя для частотного регулирования и КПД приводного асинхронного двигателя во всех случаях.

На зависимости КПД от расхода Q (рис. 1б) видно, что при частотном регулировании КПД вентилятора имеет максимальное значение во всем диапазоне расхода.

Таким образом, для одиночного вентилятора частотное регулирование по энергоэффективности превосходит другие способы регулирования в широком диапазоне расхода воздуха, что подтверждается многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями.

Однако такой вывод не является общим. Так, при работе нескольких вентиляторов в составе вентиляторных станций частотное регулирование может не иметь преимущества.

На рис. 2а показана зависимость мощности P одного вентилятора от расхода Q при работе группы из 5-ти вентиляторов, работающих на общую магистраль и обеспечивающих подачу воздуха в методические печи листопрокатного цеха. Графики построены для случая одновременного регулирования производительности всех вентиляторов при условии равенства расхода воздуха каждым из них. Рис. 2б иллюстрирует зависимость КПД от расхода для этого режима работы.

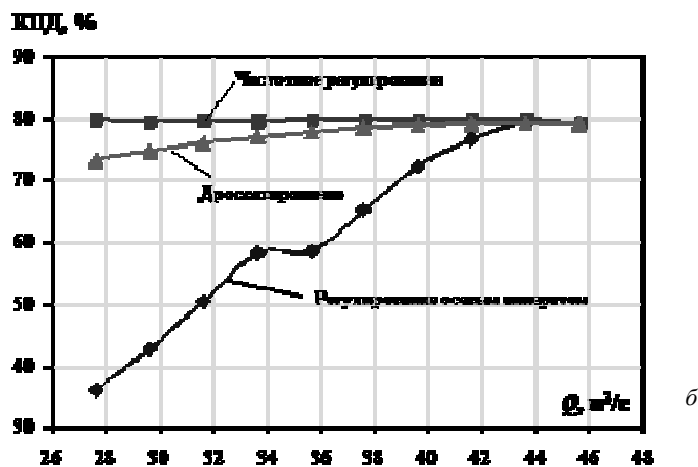
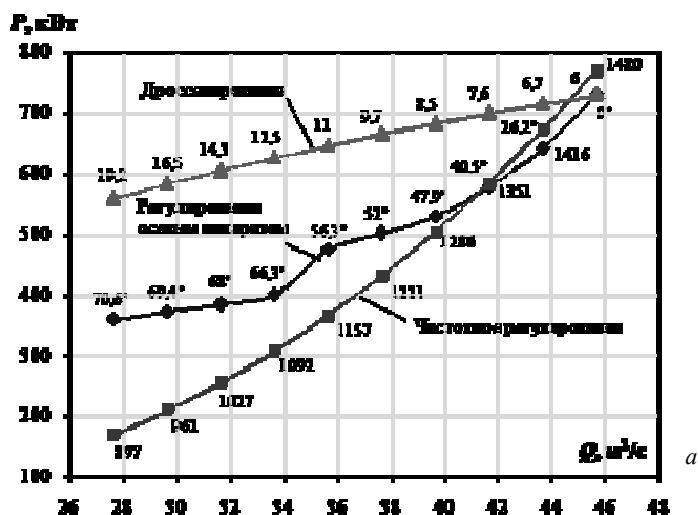


Рис. 1. Расчетные энергетические характеристики при работе одиночного вентилятора BBH-20

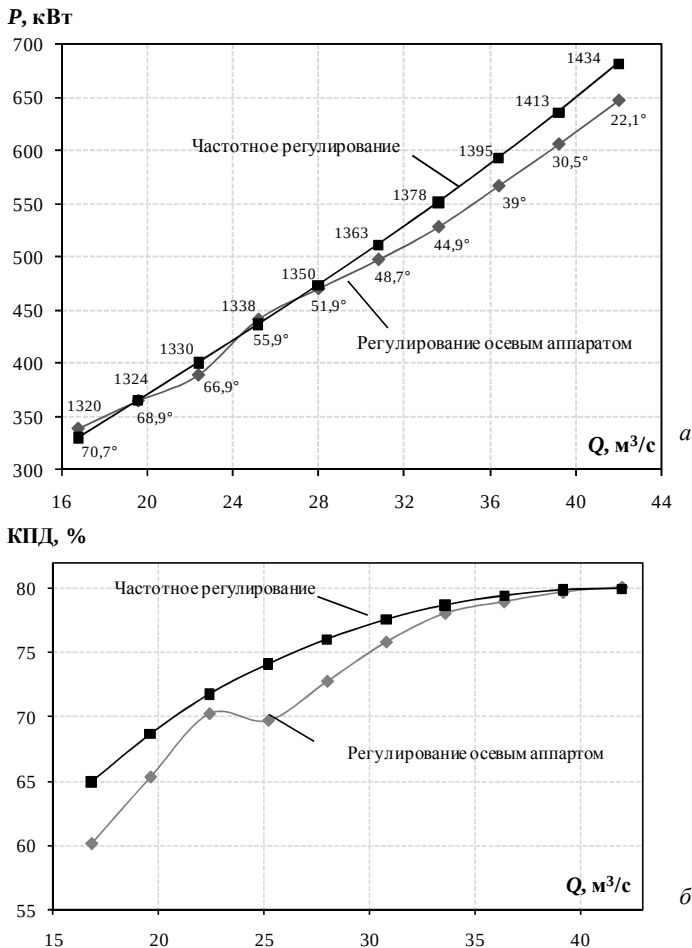


Рис. 2. Расчетные энергетические характеристики при работе ВВН-20 в составе станции из 5 вентиляторов

Очевидно, что в данном случае более рациональным по энергоэффективности и объемам капитальных затрат является регулирование осевым направляющим аппаратом.

Аналогичным образом могут быть исследованы и другие способы регулирования производительности, например ступенчатое, которое реализуется изменением числа одновременно работающих вентиляторов [4].

Заключение

Приведенная методика моделирования позволяет решать широкий спектр задач, связанных с работой вентиляторов в разветвленных сетях: анализ энергоэффективности различных способов производительности; выбор вентиляторов для сети с заданными параметрами; определение значений давления и расхода в отдельных участках; оптимизация работы вентиляционной сети и т.д.

Методика может быть адаптирована и для других турбомеханизмов – насосов и компрессоров, с учетом особенностей данных агрегатов.

Список литературы

1. Онищенко Г.Б., Юньков М.Г. Электропривод турбомеханизмов. М.: Энергия, 1972.
2. Вечеркин М.В., Сарваров А.С., Петушков М.Ю. Моделирование аэродинамических характеристик центробежных вентиляторов // Электротехнические системы и комплексы: Межвуз. сб. науч. тр. / под ред. С.И. Лукьянова. – Магнитогорск : ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. – Вып. 14. – С. 11-15.
3. Абрамов Ф.А., Фролов Н.А., Электрическое моделирование вентиляционных сетей угольных шахт. – М.: Углетехиздат, 1957.
4. Вечеркин М.В., Сарваров А.С. Исследование способов регулирования производительности вентиляторной станции ЛПЦ-10 ОАО «ММК» // Изв. вузов. Электромеханика. – 2006, №4. – С. 63-67.

*Работа представлена д. т. н., действительным членом Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, профессором кафедры вычислительной техники и прикладной математики ГОУ ВПО «МГТУ» Логуновой О.С.
Дата представления работы: 18.04.2011.*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ СТЕНКИ КРИСТАЛЛИЗАТОРА С ЩЕЛЕВЫМИ КАНАЛАМИ ОХЛАЖДЕНИЯ

М.Н. Суханова, Т.П. Ларина, И.М. Ячиков

*ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»,*

*Россия, 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38
mary.n.suhanova@gmail.com*

Научно-технический прогресс не стоит на месте, и в производство приходят новые технологии. Так, в современных МНЛЗ все чаще используются кристаллизаторы не со сверленными каналами охлаждения, а сборные кристаллизаторы. Актуальной проблемой становится определение теплового состояния сборных кристаллизаторов с каналами различной формы, чтобы выявить, насколько эффективно данный тип кристаллизатора охлаждает рабочую поверхность по сравнению с кристаллизаторами со сверленными каналами и какая форма каналов будет оптимальной.

THERMAL STATE SIMULATION OF CRYSTALLIZER WALL WITH SLOTTED COOLING CHANNELS

M.N. Suhanova, I.M. Yachikov

Science-technical progress does not stand still and new technology come to production. Today modern slab caster more often start using precast crystallizers instead crystallizers with drilled channels. Defining thermal state of precast crystallizers with different shapes cooling channels becoming an actual problem. Such researches will allow to understand how effective this type of crystallizers cools working surface compared with crystallizers with drilled channels and what channels shape is optimal.

Актуальность работы

Кристаллизатор является наиболее ответственным узлом машины непрерывного литья заготовок, определяющим ее технико-экономические показатели. От эксплуатационной стойкости кристаллизатора зависит длительность межремонтных периодов, производительность машины и другие технико-экономические показатели.

Наиболее частыми причинами выхода из строя кристаллизатора являются износ рабочих стенок и их коробление, а также раскрытие стыка между стенками сборных кристаллизаторов. Все эти факторы во многом определяются тепловой работой кристаллизатора, поэтому знание температурного поля в кристаллизаторе является важной научно-технической задачей.

С целью экономии меди и улучшения охлаждения рабочей поверхности многие фирмы применяют кристаллизаторы со сборными стенками, которые просты в техническом обслуживании и эксплуатации. Например, сборные узкие стенки используются в кристаллизаторах МНЛЗ №2 и 4 ОАО «ММК», так же в кристаллизаторе МНЛЗ №6 ККЦ ОАО «ММК» сборными являются как узкие, так и широкие стенки.

Цель работы

Форма каналов охлаждения сборных стенок кристаллизаторов может быть различной: трапециевидной, прямоугольной или наклонной.

Таким образом, актуальной проблемой становится определение теплового состояния сборных кристаллизаторов с каналами различной формы, чтобы выявить, насколько эффективно данный тип кристаллизатора охлаждает рабочую поверхность по сравнению с кристаллизаторами со сверленными каналами и какая форма каналов будет оптимальной. Целью данной работы являлось создание математической модели и программного продукта по определению нестационарного температурного поля в кристаллизаторе с наклонными щелевыми каналами.

Постановка задачи

В стенке кристаллизатора наблюдается практически периодическое расположение каналов охлаждения. Можно выделить два семейства вертикальных плоскостей симметрии – проходящие по центру и между щелей [1]. Эти плоскости симметрии могут рассматриваться как теплонепроницаемые границы.

Считаем, что температура по оси водоохлаждающих каналов меняется незначительно по сравнению с другими направлениями, поэтому можно принять $\frac{\partial t}{\partial z} = 0$. Тепловое состояние стенок кристаллизатора описываем уравнением нестационарной теплопроводности Фурье для элементарного объема (рис. 1).

$$a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) = \frac{\partial T}{\partial \tau}. \quad (1)$$

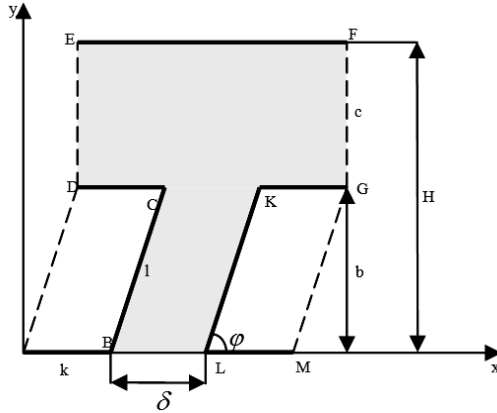


Рис. 1. Элемент стенки кристаллизатора с наклонными щелевыми каналами

Для решения этого уравнения необходимо задать краевые условия. Для начального момента времени $\tau = 0$ задаем $t(x,y)=t_0$.

На рабочей поверхности (DE) имеем граничные условия второго рода:

$$q \Big|_{DE} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}, \quad (2)$$

где q - тепловой поток от горячего металла к рабочей поверхности.

В работе [2] предлагается эмпирическая зависимость для расчета теплового потока по высоте кристаллизатора в зависимости от скорости разливки металла.

На осях симметрии (DE, FG) принимаем:

$$\frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{DE \atop FG} = 0. \quad (3)$$

На поверхности контакта стальной и медной пластины (BL) мы имеем граничные условия 4 рода: $t_m = t_{cm}$,

$$\lambda_{cm} \frac{\partial t_{cm}}{\partial y} \Big|_{BL} = \lambda \frac{\partial t_m}{\partial y} \Big|_{BL}; \quad \lambda_{cm} \frac{\partial t_{cm}}{\partial y} = \lambda_{cm} \frac{t_m - t_{нов}}{h_{cm}}, \quad (4)$$

где $t_{нов}$ - заданная температура наружной поверхности стальной пластины.

На поверхности каналов охлаждения (DC), (CB), (GK), (KL) мы имеем граничное условие третьего рода:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial \bar{n}} \Big|_{\substack{DC \\ CB \\ GK \\ KL}} = \alpha_{\epsilon} (t_n - t_{\epsilon}), \quad (5)$$

где t_n - температура поверхности канала; t_{ϵ} - средняя температура охлаждающей воды; α_{ϵ} - коэффициент теплоотдачи на поверхности канала охлаждения.

Коэффициент теплопередачи от стенки нагрева до охлаждающей воды можно оценить как:

$$K = \frac{q}{(\bar{t}_p - t_{\epsilon})}, \quad (6)$$

где $\bar{t}_p$ - средняя температура рабочей стенки.

Для решения поставленной краевой задачи использовали метод конечных разностей и расщепления по координатам. При решении уравнения (1) получили системы линейных алгебраических уравнений в виде трехдиагональной матрицы:

$$t_{i-1}^{k+\frac{1}{2}} \cdot A - t_i^{k+\frac{1}{2}} \cdot B + t_{i+1}^{k+\frac{1}{2}} \cdot C = D;$$

$$t_{i-1}^{k+1} A - t_i^{k+1} B + t_{i+1}^{k+1} C = D,$$

где $A = Fo_x$, $B = 1 + 2Fo_x$, $C = Fo_x$, $D = -t_i^k$, $A = Fo_y$,

$$B = 1 + 2Fo_y, C = Fo_y, D = -t_i^{k+\frac{1}{2}}.$$

Каждая из полученных систем уравнений последовательно решалась методом прогонки.

Результаты

По данной математической модели (1)-(6) была создана компьютерная программа «Тепловое состояние стенки кристаллизатора МНЛЗ с наклонными охлаждающими каналами», позволяющая в удобном для пользователя виде вводить исходные данные и отображать результаты в виде таблиц и графиков.

На рис 2 приведены результаты компьютерных расчетов коэффициента теплопередачи в зависимости от скорости воды в каналах при разных углах наклона каналов. Величина K возрастает по квадратичной функции, например, для вертикальных щелевых каналов охлаждения зависимость коэффициента теплопередачи от скорости воды

можно описать как: $K = -48.469W_B^2 + 1123.7W_B + 2238.4$ (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,998$).

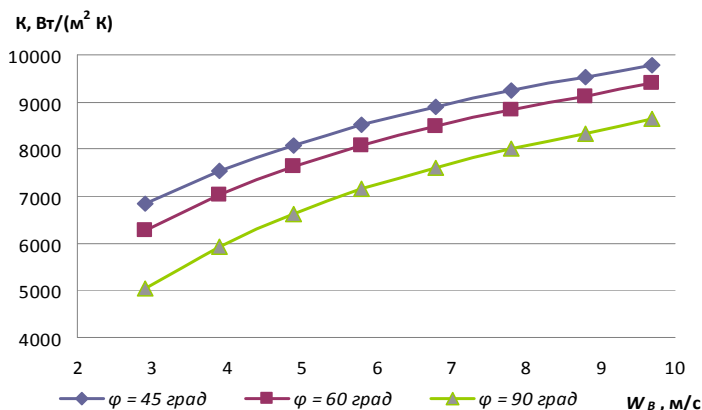


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопередачи от расхода воды при разных углах наклона каналов

На рис. 3 приведена зависимость коэффициента теплопередачи от угла наклона каналов охлаждения. Наблюдается уменьшение коэффициента теплопередачи на 20% при увеличении угла наклона канала с 45° до 90° при постоянных площадях охлаждающих каналов и скорости воды. Наименее эффективными являются вертикальные щелевые каналы охлаждения ($\varphi = 90^\circ$).

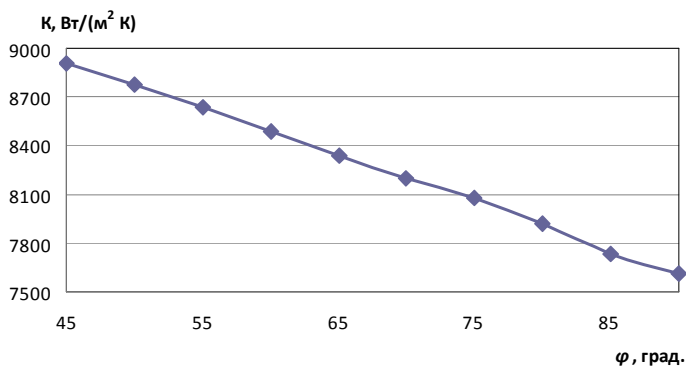


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопередачи от угла наклона каналов охлаждения

Заключение

Таким образом, создана математическая модель теплового состояния элемента стенки кристаллизатора с наклонными щелевыми каналами охлаждения. Установлено повышение эффективности теплопередачи медной стенки с увеличением скорости воды и уменьшением угла наклона каналов – охлаждения при их одинаковых площадях поперечного сечения.

Список литературы

1. Кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок. Свидетельство на полезную модель № 20476 / Вдовин, К.Н., Карпов Е.В., Фоменко А.Р., Подосян А.А. Оpub. в Б.И. №31, 2001.
2. Повышение эксплуатационной стойкости кристаллизатора МНЛЗ / Т.Д. Ермолюк, А.П. Лях, А.А. Целиков // Сталь. – 1985. – № 6. – С. 33-36.

Работа представлена д. т. н., действительным членом Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, профессором кафедры вычислительной техники и прикладной математики ГОУ ВПО «МГТУ» Логуновой О.С.

Дата представления работы: 18.04.2011.

АНАЛИЗ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА РАСКРОЯ ЛЕНТЫ ХОЛОДНОГО ПРОКАТА

К.А. Денисова, Е.Г. Филиппов, О.С. Логунова

*ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»,*

***Россия, 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38
Kseniya_denisova@inbox.ru***

Значительный экономический потенциал, присущий задачам рационального раскроя, их неотъемлемая связь с реальным производством, а также стремительное развитие вычислительной техники объясняет наличие внушительной библиографии, насчитывающей несколько тысяч источников. В статье представлен обзор источников периодической печати, результаты патентного поиска и зарегистрированных программ для ЭВМ по раскрою материала, дана характеристика программного обеспечения раскроя на рынке России.

ANALYSIS OF THE THEORETICAL AND PRACTICAL ELABORATION IN MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF COLD ROLLING CUTTING STRIP PROCESS

K.A. Denisova, O.S. Logunova, E.G. Filipov

Significant economic potential, which is inherent in the problem of rational cutting and their close relationships with the real production, as well as the rapid development of computer technology's, explains the sufficient bibliography, which has over several thousands of sources. The article provides the overview of the periodical press, the results of patent researchers and registered computer programs for cutting the material, the characteristic of the cutting programming software on the Russian market was given.

Актуальность работы

Современный период развития производственных технологических процессов характеризуется оптимизацией этапов жизненного цикла продукции, обусловленной динамически изменяющимся ассортиментом и номенклатурой изделий при ужесточении требований к себестоимости продукции. Современное производство характеризуется необходимостью тщательного анализа и экономии требуемого расхода материала на этапе проектирования изделия, а также разнообразным ассортиментом деталей и изделий. В этих условиях актуальным является решение задачи оптимального раскроя.

В течение последних шестидесяти лет эта проблема привлекает внимание ученых и производителей. Причина интереса к задачам раскроя состоит в их принадлежности к NP-трудным проблемам, в широкой применимости к их решению математического программирования и комбинаторных методов, в сложности многих задач реального мира.

Задача рационального раскроя относится к классу NP-полных дискретных оптимизационных задач комбинаторного типа. Значительный экономический потенциал и практическая применимость стимулируют активные исследования по разработке и апробации методов решения таких задач.

Цель и задачи работы

Целью работы является поиск, изучение и обзор научно-практических разработок в области оптимизации процесса раскроя материала.

Для выполнения цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) поиск научных и практических работ в области разработки моделей и методов раскроя материала;
- 2) патентный поиск способов и методов раскроя;

3) поиск зарегистрированных программ для ЭВМ по раскрою материала.

Характеристика программного обеспечения раскроя на рынке России.

Результаты аналитического исследования

Задача о рациональном раскрое впервые была сформулирована выдающимся советским математиком и экономистом Л. В. Канторовичем в 1939 году в работе «Математические методы организации и планирования производства» [7]. Рассмотренная проблема заключалась в нахождении такого способа раскроя материала на комплекты заготовок, при котором отходы производства были бы минимальными. Он отметил, что задача формирования такого плана раскроя является типичной задачей линейного программирования. Существенный вклад в разработку теории и методов решения задач рационального раскроя внесли американские ученые Гилмор и Гомори [2], которые занимались изучением раскроев на предприятиях по производству бумаги и стекла в первой половине 1960-х годов. Проблеме оптимизации раскроя посвящены работы С.И. Вдовина [4, 5]. В статье [4] рассмотрена задача оптимизации одномерного раскроя листов и рулонов и алгоритмы ее решения, а также обсуждены способы корректировки систем уравнений с целью получения целочисленных решений и минимизации отходов. В работе [5] рассмотрено решение задачи оптимизации раскроя на одинаковые прямоугольные заготовки методом динамического программирования. Приведены примеры алгоритмов проектирования оптимальных планов гильотинного и негильотинного раскроев.

В работе К.С. Кульги рассмотрена обратная задача оптимального одномерного раскроя штангового проката, змеевиков и сварных труб [8]. И.В. Молочников и В.В. Прейс рассмотрели постановку задачи оптимизации гильотинного раскроя листового материала с учетом возможности дальнейшего использования отходов раскроя, т. е. по критерию «рационального» остатка [9].

В работе Ю.А. Зака [6] рассмотрена задача раскроя бумажного полотна с учетом ограничений на максимальную ширину продольно-резательных станков и число установленных на них ножей. Эта задача сформулирована в виде задачи линейного программирования большой размерности. Предложены методы автоматического формирования матриц допустимых способов раскроя. Рассмотрено их компактное представление на основе использования векторов заменяемости в совокупности с различными основными способами раскроя, что позволило существенно сократить число переменных и размерность оптимизационной задачи.

Решение задачи рационального раскроя материала рассматривается в работах авторов МГТУ им. Г.И. Носова. Так, в работе Е.Г. Филиппова и Ю.А. Черятьевой рассматриваются примеры решения задачи максимизации числа комплектов и задачи минимизации остатков [11]. Задача продольного раскроя полосы рулонного материала на полосы заданного размера при минимизации боковых остатков обрезки и незаказанного металла рассмотрена в работах В.П. Обломец, Е.Г. Филиппова, В.В. Баранкова, В.В. Королева. Этой теме также посвящена работа И.В. Необутова и Е.Г. Филиппова.

Задача оптимального раскроя материала на заготовки заданного размера также рассматривалась зарубежными исследователями.

На Украине В.Н. Балабанов рассмотрел задачу рационального раскроя в многокритериальной постановке. В работе [3] предложен векторный критерий, который позволяет учитывать ряд производственных и технологических ограничений. Обсуждаются общие вопросы эффективной организации эволюционного поиска рациональных планов продольного раскроя рулонных материалов. Разработан и программно реализован генетический алгоритм для решения задачи рационального раскроя, приведены результаты вычислительного эксперимента.

Китайские исследователи CuiYaodong и YuHongfang рассмотрели двумерную задачу оптимального раскроя материала при вырезке деталей сложной конфигурации. Ими предложен алгоритм программирования раскроя, согласно которому детали вначале группируются в прямоугольные модули, которые далее располагаются в пределах разрезаемого материала с учетом минимума отходов [1].

Испанской компанией ManufacturasAlfe разработана программа автоматизированной подготовки производства для линий продольной резки рулонной стали. Программа называется системой PAC-L и преследует цель оптимизации процесса резки с улучшением качества, точности (в пределах 0,01 мм) и уменьшением производственных затрат [10].

Результаты анализа по патентному поиску

Результаты патентного поиска представлены в таблице. Среди зарегистрированных программ для ЭВМ по раскрою материала были найдены:

1. Программа «Оптимальная сегментация исходного прямоугольного материала» (регистрационный номер 2009615398, 28.09.2009). Программа предназначена для решения задачи оптимального распределения исходного материала. Программа автоматически определяет оптимальное расположение требуемых сегментов и прори-

совывает это на экране. Программа может применяться во многих отраслях производства, где требуется в качестве исходного материала использовать листы прямоугольной формы. К примеру: оптимальная раскройка ткани, сегментирование исходного куска стекла на более мелкие и в других областях.

Таблица

Регламент поиска

<i>Страна поиска</i>	<i>Индекс МПК</i>	<i>Глубина поиска</i>	<i>Выявленные аналоги</i>	<i>Авторы</i>
<i>Россия</i>	<i>A 41 H 3/00</i>	<i>15 лет</i>	<i>Патент РФ № 2390286. Способ подготовки к раскрою рулонных и листовых материалов</i>	<i>Сизова Р.И. Сизова О.В.</i>
	<i>B23D19/04</i>		<i>Патент РФ № 2235624. Способ продольной резки металлической полосы</i>	<i>Урмацких А.В. Урцев В.Н. Хабибулин Д.М. Капцан А.В.</i>
<i>Россия</i>	<i>B 23 D 19/04</i>	<i>15 лет</i>	<i>Патент РФ № 1243240. Способ продольной резки</i>	<i>Корчмарь Ф.Я. Фисенко Б.Л. Кучкин Ю.М. Семенов Н.Н.</i>

2. Программа «Линейный раскрой материала» (регистрационный номер 2010614769, 21.07.2010). Программа предназначена для автоматизированного составления экономичного раскройного плана линейного материала. Программа реализована по алгоритму метода последовательного уточнения оценок и обеспечивает нахождение эффективного плана раскроя труб, прутков и других линейных материалов на заготовки заданной длины.

Характеристика программного обеспечения раскроя на рынке России

В настоящее время по раскрою материала разработано достаточно большое количество алгоритмов и программных комплексов, основанных на них. Все эти программные продукты достаточно сильно различаются, начиная от данных, с которыми они оперируют, заканчивая графическим интерфейсом приложения. Рассмотрим некоторые из программных продуктов по раскрою материала.

ПС: «Управление предприятием» является типовым (универсальным) решением для комплексной автоматизации функций учета и управления на предприятиях различных сфер деятельности. Модуль «Раскрой» обеспечивает автоматизацию учета и управления производственными операциями, предполагающих раскрой и резку материалов. Интеграция с программами оптимизации раскроя (прямоугольный и фигурный раскрой) обеспечивает комплексную автоматизацию заготовительного производства.

Программа Астра Раскрой предназначена для оптимизации раскроя листовых материалов. Обеспечивает быстрый ввод информации о заказах и материалах; автоматическое и ручное формирование карт раскроя; полный учет мерных остатков и их раскрой в последующих заказах; печать карт раскроя и спецификаций.

Программа ТЕХТРАН® Раскрой листового материала предназначена для комплексного решения задач прямоугольного раскроя листовых материалов. Она сочетает возможности системы подготовки управляющих программ с функциями организации производственного процесса. Может использоваться применительно к резке металла гильотинными ножницами, резке стекла, распиловке листового материала из дерева и пластика.

Программы семейства Cutting (Cutting 3, Cutting 3 GlassUnit, CuttingLine) предназначены для оптимального раскроя материала на прямоугольные или линейные детали. Программы могут быть использованы в деревообрабатывающем производстве, производстве мебели, рубки металла, резки стекла и т.д. В основу программ положен алгоритм, позволяющий быстро произвести раскрой с минимальными отходами. Основным критерием выбран принцип минимизации отходов.

Программа eCutout предназначена для автоматизации раскроя листовых материалов. Использование программы делает раскрой эффективным и экономит рабочее время технолога. Программа позволяет создавать и редактировать задание на раскрой, назначать технологические ограничения, формировать и распечатывать карты раскроя и статистическую информацию о задании. Поддерживается также ручное редактирование карт раскроя.

Заключение

Таким образом, по результатам работы можно утверждать, что проблема рационального раскроя является весьма актуальной и требует своего решения, что позволит существенно повысить эффективность производства, а также снизить затраты на это производство.

Изучение имеющейся информации, как в России, так и за рубежом показало, что приемлемое решения пока не найдено.

Список литературы

1. Cui Yaodong, Yu Hongfang. Оптимизация раскроя металла // Nanjinghang konghang tiandexu exuebao. NanjingUniv. Aeron. And Astronaut. – 1999. – № 6. – С. 712 – 715.
2. A linear programming approach to the cutting-stock problem / P. C. Gilmore, R. E. Gomory // Operations Research. – 1961. – №9. – P. 849–859.
3. Балабанов В.Н. Многокритериальная задача рационального планирования продольного раскроя рулонного материала // Проблемы информационных технологий. – 2009. – № 2 (006). –URL: http://www.nbuu.gov.ua/portal/natural/pit/2009_2/balab.htm.
4. Вдовин С.И. Оптимизация одномерного раскроя материала // Заготовительные производства в машиностроении. – 2003. – № 3. – С. 42 – 45.
5. Вдовин С.И. Оптимизация прямоугольного раскроя // Заготовительные производства в машиностроении. – 2003. – № 4. – С. 23 – 26.
6. Зак Ю.А. Математические модели многоступенчатого оптимального раскроя бумажного полотна // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 8. – С. 7 – 10.
7. Канторович Л.В. Математические методы в организации и планировании производства. – Л. : Изд-во ЛГУ, 1939. – 68 с.
8. Кульга К.С. Автоматизация оптимального одномерного раскроя штангового проката // Автоматизация и современные технологии. – 2009. – № 6. – С. 40 – 45.
9. Задача оптимизации гильотинного раскроя листового материала по критерию «рационального» остатка / И.В. Молочников, В.В. Прейс // Изв. Тульск. ун-та. Сер. Технология машиностроения. – 2004. – № 1. – С. 181 – 187.
10. Программа автоматизированной подготовки производства на линии продольной резки рулонной стали. Programa de asistencia para corte longitudinal bobinas metalicas // Met. y elec. – 1999. – № 772. – С. 51 – Исп.
11. Рациональный раскрой материалов / Е.Г. Филиппов, Ю.А. Черятева // Вестник МГТУ. – 2005. – № 4. – С. 40 – 41.

Работа представлена д.т.н., членом-корреспондентом Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, профессором кафедры вычислительной техники и прикладной математики ГОУ ВПО «МГТУ» Ячиковым И.М.

Дата представления работы: 05.04.2011.

АДАПТИВНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ЗАДАЧ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЛИСТОПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

С.И. Файнштейн

***ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»,
Россия, 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38
swetlana@mgn.ru***

В работе рассматриваются вопросы оперативного планирования листопрокатного производства. Задачи планирования ставятся как задачи распределения работ в одностадийных системах с многокритериальными ограничениями специального вида. Для их решения предлагается адаптивная оптимизационная модель, включающая целевую функцию, зависящую от настроечных штрафных констант, и эффективный эвристический пороговый алгоритм.

AN ADAPTIVE MODEL FOR OPERATIONAL PLANNING OF METALLURGICAL WORKS PLATE ROLLING PROBLEMS

S.I. Fainshtein

Points of operational planning of Metallurgical works plate rolling have been considered. Planning problem is posed as a single-stage system with some multi-objective constraints. For these problems an adaptive optimization model has been developed. The model includes an objective function with penalty setting constants and an efficient heuristic threshold algorithm.

Актуальность работы.

Реальные NP-трудные задачи, возникающие при оперативном планировании листопрокатного производства, обычно имеют сверхбольшой размер пространства поиска и большое количество ограничений, которое зачастую делает невозможным построение даже одного допустимого решения.

Кроме того, допустимые переналадки оборудования задаются большим количеством многокритериальных ограничений, ранжированных по степени «тяжести» нарушений. В силу большого количества взаимоисключающих ограничений поиск решения осуществляется на области недопустимых решений. В то же время нарушение этих ограничений влечёт за собой брак товарной продукции, пропорциональной степени «тяжести» допущенных нарушений.

Традиционный подход к решению подобных задач заключается в замене ограничений на штрафные функции с последующей свёрткой

отдельных частных критериев исходной многокритериальной задачи и получением обобщённого целевого критерия. Затем производится либо минимизация полученного обобщённого критерия, например [1], либо минимизация отдельных частных критериев методом последовательных уступок Е.С. Вентцель [2]. Для рассматриваемых задач это приводит к генерации решений с грубыми технологическими нарушениями. Для того чтобы отличать решения с «лёгкими» нарушениями от решений, содержащих «тяжкие» нарушения технологии, необходимо контролировать распределение штрафных сумм не только между отдельными частными критериями, но и между отдельными элементами (работами).

Общая математическая модель. Задача упорядоченного разбиения с ограничениями (I)

Условие. Дано конечное множество A , целое положительное m , $m \geq 1$, целое положительное ограничение на суммарную длину L_0 . Каждый элемент $a \in A$ имеет целую положительную длину $l(a)$; диапазон $[L_1(a), L_2(a)]$, где $L_1(a), L_2(a) \in Z^+$, $1 \leq L_1(a) < L_1(a) + l(a) \leq L_2(a) \leq L_0$; k целых положительных характеристик $\langle g_1(a), g_2(a), \dots, g_k(a) \rangle$ и два вектора целых положительных ограничений $\langle D_1^1, \dots, D_k^1 \rangle, \langle D_1^2, \dots, D_k^2 \rangle$, $k \geq 2$. Также для каждого a задано множество $Q(a)$ допустимых номеров последовательностей, $Q(a) \subseteq 1 \dots m$, и целая положительная стоимость $c(a_i^j)$ выполнения i -й работы в j -й последовательности. На множестве A заданы несимметричные бинарные отношения β и $prec$. Отношение β задаёт несовместимость последовательного соединения двух элементов $\beta(a_i, a_j) = 0$, если a_i и a_j совместимы, и единице в противном случае. Отношение $prec$ задаёт отношение строгого предшествования двух элементов: если $a_i \in O(a_j)$ – множеству элементов, предшествующих a_j , то $prec(a_i, a_j) = 1$ и нулю в противном случае.

Вопрос. Существует ли разбиение множества A на m попарно непересекающихся упорядоченных множеств $A_1, A_2, \dots, A_m$ со следующими ограничениями:

1. с ограничением на суммарную длину последовательности A_j :

$$\sum_{i=1}^{count(j)} l(a_i^j) \leq L_0, \text{ где } j = 1 \dots m, \text{ count}(j) - \text{количество элементов } A_j;$$
2. с ограничением на диапазон длины:

$$\sum_{i=1}^{p-1} l(a_i^j) \geq L_1(a_p^j), \sum_{i=1}^{p-1} l(a_i^j) + l(a_p^j) \leq L_2(a_p^j), \text{ где } j = 1...m, p =$$

1...count(j);

3. с ограничениями на порядок следования элементов:

$$-D_r^2 \leq g_r(a_{i+1}^j) - g_r(a_i^j) \leq D_r^1, \text{ где } j = 1...m, i = 1...count(j)-1, r = 1...k;$$

$$\beta(a_i^j, a_{i+1}^j) = 0, \text{ где } j = 1...m, i = 1...count(j)-1;$$

4. с ограничением на размещение элемента в j -ю последовательность:

для $a_i^j : j \in Q(a_i^j)$, где $j = 1...m, i = 1...count(j)$;

5. с ограничением на предшествования элементов:

$$\sum_{k=1}^m \sum_{p=1}^{count(k)} prec(a_p^k, a_i^j) \times sg(\sum_{r=1}^p l(a_r^k) - \sum_{r=1}^{i-1} l(a_r^j)) = 0,$$

где $j = 1...m, i = 1...count(j)$, $sg(x) = 1$ при $x > 0$, $sg(x) = 0$ при $x \leq 0$;

7. со специальными ограничениями, зависящими от конкретных технологических условий: например, с ограничениями на суммарные длины подпоследовательностей элементов, «близких» в каком-то смысле по характеристикам $g_i, i = 1...k$, и при критерии минимизации суммарной стоимости выполнения всех работ:

$$\sum_{k=1}^m \sum_{p=1}^{count(k)} c(a_p^k) \rightarrow \min.$$

Задача (I) заключается в составлении расписания для одностадийной обслуживающей системы с m параллельными неидентичными приборами с учётом последствий системы при критерии минимизации суммарной стоимости выполнения всех работ [3]. Кроме того, искомое расписание должно удовлетворять ограничениям специального вида, задающим допустимость/недопустимость переналадки приборов. Все важные частные случаи этой задачи являются NP-полными [3].

Целевая функция стоимости

Пусть ограничениям (1-6) соответствует система целых положительных штрафов

$$\{F_0, F_r^i (i = 1, 2; r = 1...k), F_1...F_5\} \quad (1)$$

где F_0 – штраф за превышение допустимой суммарной длины последовательности; F_1 – штраф за единицу длины вне диапазона; F_r^i – штрафы за превышение допустимой разности характеристик соседних эле-

ментов; F_2 – штраф за несовместимость соседних элементов; F_3 – штраф за размещение в недопустимую последовательность; F_4 – штраф за нарушение отношения предшествования между двумя элементами; F_5 – штраф за единицу стоимости, превышающей минимальную стоимость выполнения i -го требования:

$$h_i = \min_{j \in Q(a_i^j)} \{c(a_i^j)\}$$

Суть стоимостной формы ограничений (1-6) – величины штрафов являются настроечными константами, подбираемыми во время прогона программы на реальных данных, градация штрафов соответствует степени «тяжести» нарушений ограничений.

Припишем любому разбиению задачи (I) стоимость, которая является аддитивной функцией штрафов, начисленных за нарушения ограничений (1-6) и за превышение минимальной стоимости выполнения всех требований. Таким образом, на всём множестве разбиений U задачи (I) будет определена целевая функция стоимости, отражающая количество и «тяжесть» допущенных нарушений ограничений. Для этого припишем операции размещения элемента в последовательность «вещественная стоимость» как аддитивную функцию от положительных штрафов, начисленных по всем параметрам операции. Тогда стоимость операции размещения элемента a в j -ю последовательность можно определить следующим образом:

$Cost(a, j, 1) = 0$ при размещении a в пустую последовательность;
 $Cost(a, j, p)$ при размещении a в p -ю позицию последовательности длины $p-1$:

$$\begin{aligned} & \sum_{r=1}^k (F_r^1 \times sg(g_r(a_p^j) - g_r(a_{p-1}^j) - D_r^1) + F_r^2 \times sg(g_r(a_{p-1}^j) - g_r(a_p^j) - D_r^2)) + \\ & F_0 \times sg(\sum_{i=1}^p l(a_i^j) - L_0) + F_1 \times sg(L_1(a_p^j) - \sum_{i=1}^{p-1} l(a_i^j)) \times (L_1(a_p^j) - \sum_{i=1}^{p-1} l(a_i^j)) + \\ & F_1 \times sg(\sum_{i=1}^{p-1} l(a_i^j) + l(a_p^j) - L_2(a_p^j)) \times (\sum_{i=1}^{p-1} l(a_i^j) + l(a_p^j) - L_2(a_p^j)) + \\ & F_2 \times \beta(a_{p-1}^j, a_p^j) + F_3 \times \chi("j \notin Q(a_p^j)") + \\ & F_4 \times \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^{count(k)} prec(a_i^k, a_p^j) \times sg(\sum_{r=1}^i l(a_r^k) - \sum_{r=1}^{p-1} l(a_r^j)) + F_5 \times (c(a_p^j) - h_i), \end{aligned} \quad (2)$$

где χ – характеристическая функция предиката, равная 1, если предикат имеет значение «истина», и нулю в противном случае; sg – функция знака, $sg(x) = 1$ при $x > 0$ и 0 при $x \leq 0$,

$$h_i = \min_{j \in Q(a_i^j)} \{c(a_i^j)\}$$

Определим стоимость последовательности

$$A_j: \text{Cost}(A_j) = \sum_{p=1}^{\text{count}(j)} \text{Cost}(a, j, p),$$

и стоимость полного разбиения u

$$f(u) = \sum_{j=1}^m \text{Cost}(A_j).$$

(3)

Таким образом, на всем пространстве разбиений U задачи (I) определена штрафная оценочная функция $f(u) = \sum_{j=1}^m \text{Cost}(A_j)$ и задача с ограничениями (I) сводится к задаче безусловной оптимизации (II): $f(u) \rightarrow \min$, где $u \in U$.

Задача условной оптимизации (III)

Заметим, что стоимость (2) размещения элемента a в j -ю последовательность является вкладом $\text{Cost}(a)$ элемента a в стоимость полного разбиения и равна сумме штрафов, начисленных за нарушения ограничений, имевших место при размещении элемента a . При решении задачи безусловной оптимизации (II) невозможно отличить решения с большим количеством «дешёвых» нарушений (приемлемых с точки зрения технологии) от решений с грубыми нарушениями (брак), в которых велики штрафные вклады отдельных элементов. Заранее ограничить сверху функцию $\text{Cost}(a)$ нельзя, так как в области недопустимых решений она ограничена сверху только значением $+\infty$.

Сгруппировав слагаемые в (3) относительно штрафных констант, можно представить обобщённый критерий (3) в виде суммы ранжированных по важности частных критериев, каждый из которых связан со своим типом ограничений. Если воспользоваться для решения этой задачи методом последовательных уступок [2], то минимизации частных критериев будет происходить без учёта распределения штрафных сумм между отдельными элементами разбиения, что на практике приводит к решениям с грубыми технологическими нарушениями.

Чтобы контролировать величину суммарного штрафа, начисляемого на каждый отдельный элемент, введём в задачу (II) дискретный параметр t , принимающий конечный набор значений: $t = 1..s+1$,

где s – суммарное количество ограничений (1-7) и частных критериев оптимизации задачи (I).

Также определим дискретную функцию $p(t)$ такую, что $p(t) = F_t$ при $t = 1..s$ и $p(s+1) = +\infty$, где $\{F_1, ..., F_s\}$ – система штрафов (1), отсортированных в порядке возрастания. Параметр t имеет смысл номера итерации порогового алгоритма; штрафы, упорядоченные в порядке возрастания, играют роль естественных энергетических уровней для порогового алгоритма; $u(t)$ – текущее разбиение, построенное на t -й итерации, $u(s+1)$ – полное решение.

Сформулируем новую **задачу условной оптимизации (III)**:

$f(u) \rightarrow \min$, при $Cost(a, t) < p(t)$ для любых $a \in A$, $t = 1..s+1$, $u \in U$, где $Cost(a, t)$ – стоимость размещения элемента a в разбиении $u(t)$, вычисленная согласно (2), $p(t) = F_t$ при $t \leq s$ и $p(s+1) = +\infty$, $\{F_1, ..., F_s\}$ – система штрафов (1), отсортированных в порядке возрастания.

Для решения этой задачи автором был разработан **эвристический пороговый SF-алгоритм (Sorted Fines - algorithm)**, подробно описанный в [4].

Заключение

Создана адаптируемая оптимизационная модель и эффективный эвристический алгоритм для решения задач оперативного планирования листопрокатного производства. Предложенная модель обладает следующими достоинствами.

1. Разработан унифицированный метод сведения задачи с ограничениями (I) к задаче условной оптимизации (III), позволяющий генерировать решения с некоторым количеством нарушений ограничений.

2. Гибкая система настроечных штрафов позволяет адаптировать алгоритм к реальным данным и оперативно менять критерии оптимизации.

3. Контроль за стоимостью размещения отдельного элемента позволяет строить решения с минимальным количеством грубых технологических нарушений.

4. Генерация решения происходит за полиномиальное время, что позволяет осуществлять оперативное управление производством.

Благодарности

Автор благодарит профессора Уфимского государственного авиационного технического университета Загидуллина Р.Р. за полезное обсуждение рассмотренной в работе задачи.

Список литературы

1. Метод комбинирования эвристик для решения комбинаторных задач упорядочения и распределения ресурсов / Д.И. Батищев, Э.Д. Гудман, И.П. Норенков, М.Х. Прилуцкий // Информационные технологии. – 1997. – №2. – С. 29—32.
2. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М. : Сов. радио, 1972. – 552 с.
3. Теория расписаний. Одностадийные системы / В.С. Танаев, В.С. Гордон, Я.Н. Шафранский. – М.: Наука, 1984. – 384 с.
4. Файнштейн С.И. Адаптивная оптимизационная модель для задач оперативного планирования листопрокатного производства // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2010. – №1. – С. 92-98.

*Работа представлена заведующим кафедрой
вычислительной техники и прикладной мате-
матики ГОУ ВПО «МГТУ», д. т. н., профес-
сором Девятовым Д.Х.*

Дата представления работы: 15.04.2011.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

С.Н. Сергиенко, Е.А. Ильина

*Орский гуманитарно-технологический институт
филиал ГОУ ВПО «Оренбургский государственный университет»*

Россия, 462403, Оренбургская обл., г. Орск, пр. Мира, д. 15А

*ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический
университет им. Г.И. Носова»,*

*Россия, 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, д. 38
sergienkoorsksw@mail.ru*

Разработанный программный продукт позволяет выбирать и рассчитывать параметры деталей при механической обработке. Результаты работы помогут в разработке курсовых и дипломных проектов. Программа может быть использована организациями и учебными заведениями, занимающимися проектированием и составлением технологических процессов механической обработки тел вращения.

MODEL OF MACHINING THE BODIES ROTATION

C.N. Sergienko, E.A. Ilyina

Our software product allows you to select and calculate parameters for machining parts of bodies. The results will help in the course projects. It can be

used by organizations and educational institutions which involved in designing and drafting process of machining bodies of rotation.

Технология подготовки исходных данных модели

Проектирование детали начинается с набора поверхностей для тел вращения типа вал, втулка, крышка, диск и другие, которые подбирают по типу, виду и размерам с учетом наличия или отсутствия припуска (цилиндрические, конические, с отверстием различного вида, с выточками справа, слева и симметрично расположенными по поверхностям цилиндрическим и коническим).

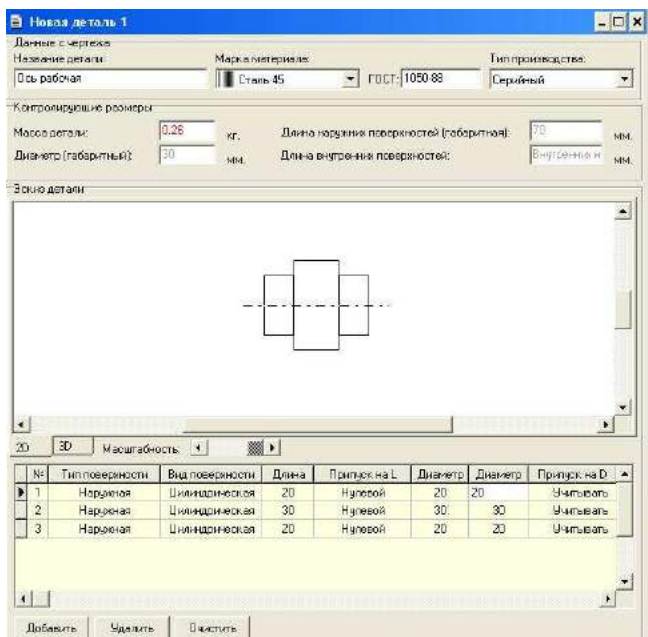
Анализ и контроль наименьших, наибольших и габаритных размеров детали, расчет ее массы, марка материала выбирается из справочных данных, представленных в библиотеке. Набор составляющих поверхностей происходит в строго определенной последовательности слева направо, при этом выполняется построение и расчет составляющих программы (рис. 1).

Студент самостоятельно назначает рекомендуемый метод получения заготовки из предлагаемых. Это поковка, полученная свободной ковкой, с использованием автоматической ковочной машины с манипулятором, оснащенный ЧПУ, штамповки различного вида и проката. Выбирается из библиотеки стоимость заготовки и отходов, а далее идет автоматический расчет размеров с отклонениями, массы и коэффициента использования металла и себестоимости.

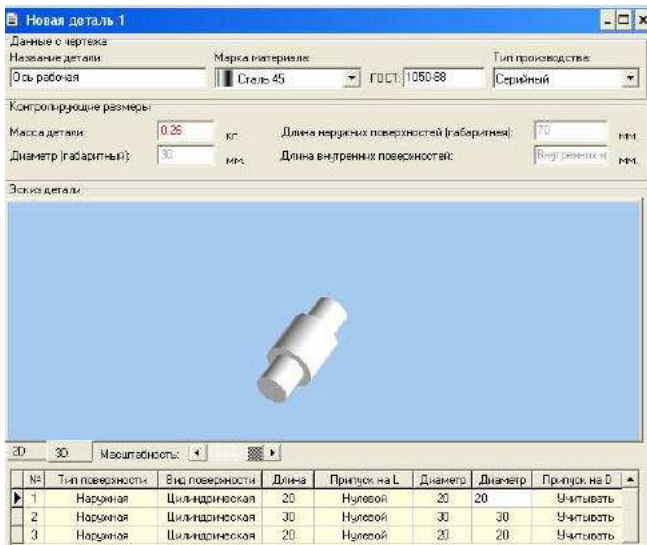
При изменении методов получения заготовки порядок действий повторяется, и в результате аналитического заключения делается вывод о выборе наиболее перспективного метода для заданной детали.

Разработанная программа предусматривает принятие самостоятельного решения, что позволяет вырабатывать у студентов навыки по развитию творческого мышления, необходимого при работе на производстве.

Заготовкой в машиностроении называется предмет труда, из которого изменением формы, размеров, свойств поверхностей и материала изготавливается деталь. Заготовительное производство является неотъемлемой начальной фазой любого машиностроительного производства, образуя первый технологический передел.



a



б

Рис. 1. Определение параметров заготовки и получение эскиза детали в формате 2D (a) и 3D (б)

Выделяют следующие виды заготовок:

- 1) получаемые литьем (отливки);
- 2) получаемые обработкой давлением (кованные и штампованные заготовки);
- 3) заготовки из проката;
- 4) сварные и комбинированные заготовки;
- 5) получаемые методом порошковой металлургии.

Заготовка каждого вида может быть изготовлена одним или несколькими родственными способами. В разработанной программе рассматриваются только заготовки, получаемые обработкой давлением – кованые, штампованные и из проката.

Ковка применяется в единичном, мелкосерийном производстве, а также при изготовлении очень крупных, уникальных заготовок и заготовок с особо высокими требованиями к объемным свойствам материала.

Штамповка позволяет получить заготовки близкие по конфигурации к готовой детали. Механические свойства заготовок, полученных обработкой давлением, выше, чем у литых.

Заготовки из проката применяют в единичном и серийном производствах. Совершенство заготовки определяется близостью выбранного профиля проката поперечному сечению детали (с учетом припусков на обработку).

Поступающие на обработку заготовки должны соответствовать утвержденным техническим условиям. Поэтому заготовки подвергаются техническому контролю по соответствующей инструкции, устанавливающей метод контроля, периодичность, количество проверяемых заготовок. Проверке подвергают химический состав и механические свойства материала, структуру, наличие внутренних дефектов, размеры, массу заготовки (рис.2).

Первым этапом проектирования с использованием разработанной программы является создание и анализ заготовок, получаемых методом давления, с использованием всех современных стандартов, предлагаемых литературой для теоретического обоснования и практического изготовления.

Дальнейшим этапом подробного аналитического расчета является определение припусков и межоперационных размеров для каждой из диаметральных поверхностей.

Установка последовательной обработки и соответствующей точности и шероховатости поверхности может осуществляться в «ручном» или автоматическом режиме. При этом выполняется схема рас-

положения припусков, допусков и межоперационных размеров, а также подробный расчет составляющих элементов.

Расчет заготовки [Новая деталь 1]

Наименование детали:

Новая деталь 1

Рекомендуемый метод получения:

Сравнительный

Сравнить

Результат расчета

Деталь: Ось рабочая

Марка: Сталь 45 ГОСТ 1050-88

Тип производства: Серийный

Масса детали: 0.26 кг.

Поковка (свободная ковка).

1. I группа точности.

2. Расчетные размерыковки:

Для диаметров:

20 = 11 * 1 = 31 ± 4 = 35 ± 4

30 = 11 * 1 = 41 ± 4 = 45 ± 4 объединились 2 поверхности

Для длин:

20 = 20 ± 4 = 20 ± 4

30 = 30 ± 4 = 30 ± 4

20 = 20 ± 4 = 20 ± 4

3. Масса заготовки: 0.89 кг.

4. Коэффициент использования металла: 0.29

5. Себестоимость: 16.38 руб.

Аналитическое заключение

№	Наименование метода	Коэффициент использование металла	Себестоимость
1	Ковка с ЧПУ	0.37	17.68
2	Поковка (свободная ковка)	0.29	16.38

Вывод:

Ковка с ЧПУ

Рис. 2. Расчет заготовки для заданной детали

Модель припусков, допусков и межоперационных размеров

В итоге по результатам уточненного окончательного расчета заготовки строится схема расположения припусков, допусков и межоперационных размеров (рис. 3).

Выполняемые расчеты невозможны без создания эскизов. Поэтому нами предлагается создавать чертежи в системе «КОМПАС-ГРАФИК», что дает студентам навыки работ с другими программами.

Программой предусмотрена обширная библиотека, которая снабжена справочниками, включающими основные станки машиностроительного производства с описанием общих и индивидуальных характеристик, конструкцией и геометрией разнообразного режущего инструмента, материалов, используемых для изготовления деталей и инструментов и их себестоимость.

214

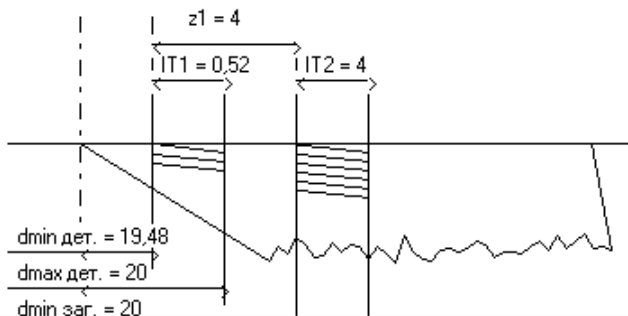


Рис. 3. Схема расположения припусков, допусков и межоперационных размеров

Практическим применением программы явилось ее внедрение для расчета заготовки, припусков и межоперационных размеров при выполнении курсового проекта по предмету «Технология машиностроения», а также технологической части дипломного проекта. Возможно реальное использование программы в решении производственных задач.

Дальнейшим этапом программы является ее применение по назначению режимов резания. Они рассчитаны на применение инструментов с оптимальными значениями геометрических параметров режущей части, с режущими элементами из твердого сплава и быстрорежущей стали.

При назначении элементов режимов резания учитывается характер обработки, тип и размеры инструмента, материал его режущей части, материал и состояние заготовки, тип и состояние оборудования. Элементы режимов резания устанавливаются в следующем порядке:

1. Назначается глубина резания исходя из припусков, рассчитанных при определении заготовки (первая часть программы).

2. Подача при черновой обработке назначается максимально возможная, исходя из жесткости и прочности технологической системы (СПИЗ), мощности станка, прочности твердосплавной пластинки и других ограничивающих факторов; при чистовой обработке – в зависимости от требований точности размеров и шероховатости обработанной поверхности.

3. Скорость резания рассчитывается по эмпирическим формулам, установленным для каждого вида обработки. Последующие расчеты соответствуют обычному алгоритму определения скорости обработки:

- скорость резания, рассчитанная по эмпирической формуле;
- частота вращения детали;

- коррекция частоты вращения детали по паспортным данным принятого станка;
- определение действительной скорости резания.

4. Проверка правильности назначения элементов режимов резания. Определяются силовые зависимости, которые учитывают конкретные технологические параметры и действительны при определенных значениях ряда технологических факторов.

Расчет основного или машинного времени завершает поставленную задачу.

Результаты внедрения модели в учебный процесс

Данная методика апробирована на базе Орского машиностроительного колледжа при выполнении курсовых и дипломных проектов. Использование программы обеспечивает индивидуальность расчета, требующую анализа последовательности и особенности обработки детали по поверхностям и операциям в зависимости от строения, точности и параметров шероховатости рассматриваемых элементов. Сведение к минимуму механических расчетов позволяет снизить продолжительность этих действий с 12 часов до нескольких минут, оставляя время для моделирования и анализа технологического процесса. Подробность и наглядность выполняемых действий представлена по всем разделам.

Работа представлена д.т.н., членом-корреспондентом Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, профессором кафедры вычислительной техники и прикладной математики ГОУ ВПО «МГТУ» Ячиковым И.М.

Дата представления работы: 15.04.2011.

РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С. А. Муртазина

Сибайский институт (филиал)

ГОУ ВПО «Башкирский государственный университет»,

Россия, 453837, Башкортостан, г. Сибай, ул. Белова, д. 21

sariamurtaz@mail.ru

Рассматривается задача о локальных бифуркациях вынужденных колебаний двухпараметрических динамических систем. Предлагается теорема об устойчивости возникающих периодических решений.

THE CALCULATION OF STABILITY OF MANY-PARAMETRIC DYNAMIC SYSTEMS' FORCED OSCILLATIONS

S.A. Murtazina

The local bifurcation problem of two-parametric forced oscillations dynamic systems was considered. The theorem on the stability of periodic solutions was proposed in the article.

Постановка задачи

Рассмотрим систему, динамика которой описывается дифференциальным уравнением, зависящим от двумерного параметра $\mu = (\alpha, \beta)$ и T -периодической по t правой частью:

$$x' = (A + (\alpha - \alpha_0)A_1(t) + (\beta - \beta_0)A_2(t))x + a(x, t, \mu). \quad (1)$$

Здесь $x \in R^N$. Положим, что система (1) при всех значениях μ имеет точку равновесия $x = 0$; правая часть непрерывна по t и непрерывно дифференцируема по x и μ ; каждое начальное условие $x(t_0) = x_0$ однозначно задает решение $x(t)$ уравнения (1), определенное при всех t ; $a(x, t, \mu)$ равномерно по t и μ удовлетворяет соотношению $\|a(x, t, \mu)\| = o(\|x\|)$ при $\|x\| \rightarrow 0$.

При изменении характера устойчивости нулевого решения в системе (1) возможны различные локальные бифуркации в окрестности решения $x = 0$, в частности, возможно возникновение ненулевых T -периодических решений (бифуркация вынужденных колебаний), ненулевых периодических решений периода qT , $q > 1$ (бифуркация субгармонических колебаний) и др. Задача о таких бифуркациях изучается во многих работах [1,2]. В данной работе рассматривается бифуркация субгармонических колебаний, приводится теорема об устойчивости возникающих периодических решений. Положим $\mu_0 = (\alpha_0, \beta_0)$

Построение бифурцирующих решений

Будем предполагать, что выполнены условия: U1 А имеет пару простых собственных значений $\pm \frac{2\pi i \varphi}{T}$, $\varphi \in [0,1]$, φ рационально,

$\varphi = \frac{p}{q}$ несократимая дробь, и не имеет других собственных значений на мнимой оси.

$$U2 \det Q \neq 0, \quad Q = \begin{pmatrix} (\psi_1, e^*) & (\psi_2, e^*) \\ (\psi_1, g^*) & (\psi_2, g^*) \end{pmatrix}.$$

Здесь $e \pm ig$ и $e^* \pm ig^*$ собственные векторы матрицы A и транспонированной матрицы A^* соответственно, отвечающие собственным значениям $\pm \frac{2\pi\varphi i}{T}$, которых можно выбрать из соотношений $(e, e^*) = (g, g^*) = 1, (e, g^*) = (g, e^*) = 0$;

$$\psi_1 = \int_0^{qT} (Ax(t) + A_1 e(t)) dt, \quad \psi_2 = \int_0^{qT} (Ay(t) + A_2 e(t)) dt,$$

$$e(t) = e^{At} e, \quad x(t) = \int_0^t e^{A(t-s)} A_1(s) e(s) ds,$$

$$y(t) = \int_0^t e^{A(t-s)} A_2(s) e(s) ds.$$

Значение μ_0 параметра μ назовем бифуркацией субгармонических колебаний периода qT системы (1), если каждому $\varepsilon > 0$ соответствует такое $\mu = \mu(\varepsilon)$, при котором система (1) имеет ненулевое qT -периодическое решение $x(t, \varepsilon)$, причем $\mu(\varepsilon) \rightarrow \mu_0$ и $\max_t \|x(t, \varepsilon)\| \rightarrow 0$ при $\varepsilon \rightarrow 0$.

Пусть нелинейность $\dot{a}(x, t, \mu)$ в уравнении (1) имеет вид

$$\dot{a}(x, t, \mu) = a_2(x, t, \mu) + a_3(x, t, \mu), \quad (2)$$

где $a_2(x, t, \mu)$ содержит квадратичные по x слагаемые, а $a_3(x, t, \mu)$

удовлетворяет соотношению $\|a_3(x, t, \mu)\| = o(\|x^2\|)$ при $x \rightarrow 0$ равномерно по t и μ . Положим $\hat{A}(t) = \alpha_1 A_1(t) + \beta_1 A_2(t)$.

Теорема 1. Пусть выполнены условия U1-U2 и нелинейность $\dot{a}(x, t, \mu)$ имеет вид (2). Тогда у системы (1) при $\mu(\varepsilon) = (\alpha(\varepsilon), \beta(\varepsilon))$ существуют бифурцирующие решения $x(t, \varepsilon)$; $x(t, \varepsilon)$, $\alpha(\varepsilon)$, $\beta(\varepsilon)$ вычисляются по формулам:

$$x(t, \varepsilon) = \varepsilon e(t) + \varepsilon^2 e_1(t) + o(\varepsilon^2), \quad (3)$$

$$\alpha(\varepsilon) = \alpha_0 + \varepsilon \alpha_1 + o(\varepsilon), \quad \beta(\varepsilon) = \beta_0 + \varepsilon \beta_1 + o(\varepsilon). \quad (4)$$

Здесь $e(t) = e^{At} e$, $e_1(t)$ решение задачи Коши

$$\begin{cases} x' = \hat{A}e(t) + a_2(e(t), t, \mu_0) \\ x(0) = e_1 \end{cases}, \text{ где } e_1 = \Gamma_0 v_2, \alpha_1 = J_\alpha(v_2),$$

$$\beta_1 = J_\beta(v_2), \quad v_2 = e^{AqT} \int_0^{qT} e^{-At} a_2(e(t), t, \mu_0) dt.$$

Γ_0 действующий в R^N оператор:

$$\begin{aligned} \Gamma_0 v_2 &= J_\alpha(v_2) e + J_\beta(v_2) g + \\ &+ (I - e^{AqT})^{-1} (v_2 + J_\alpha(v_2) x(t) + J_\beta(v_2) y(t)). \end{aligned}$$

Здесь $J_\alpha(v_2)$ и $J_\beta(v_2)$ определяются из формулы

$$(J_\alpha(v_2), J_\beta(v_2))^T = -Q^{-1}((v_2, e^*), (v_2, g^*))^T,$$

где Q - матрица из U2.

Исследование устойчивости бифурцирующих решений

Рассмотрим вопрос об устойчивости бифурцирующих решений $x(t, \varepsilon)$ системы (1). Требуется исследовать устойчивость периодического решения $x(t, \varepsilon)$ системы (1) при $\mu = \mu(\varepsilon)$.

Известно, что если хотя бы одно собственное значение A имеет положительную вещественную часть, то бифурцирующие решения системы (1) неустойчивы при всех $\varepsilon > 0$. Пусть выполнено U1. Предположим, что все остальные собственные значения матрицы A

имеют отрицательные вещественные части. Пусть нелинейность $\hat{a}(x, t, \mu)$ имеет вид (2). Обозначим: $D = P_0 A P_0$,

$$B = A - D, Q(t) = e^{-Dt} (\hat{A}(t) + a'_{2x}(e(t), t, \mu_0)) e^{Dt}, \quad (5)$$

где P_0 - оператор проектирования в собственное подпространство E_0

отвечающее собственным значениям $\pm \frac{2\pi\varphi i}{T}$, $Q(t)$ - ограниченная и

qT - периодическая по t матрица, $a'_{2x}(x, t, \mu)$ - матрица Якоби вектор-функции $a_2(x, t, \mu)$. Пусть S - постоянная матрица, удовлетворяющая равенству

$$\int_0^{qT} e^{-B\tau} S e^{B\tau} d\tau = \int_0^{qT} e^{-B\tau} Q(\tau) e^{B\tau} d\tau. \quad (6)$$

Обозначим через λ_1 и λ_2 собственные значения матрицы $P_0 S P_0$.

Теорема 2. Пусть $\lambda_1 < 0$ и $\lambda_2 < 0$; тогда при всех малых $\varepsilon > 0$ бифурцирующие решения (3) системы (1) устойчивы. Если же хотя бы один из чисел λ_1 и λ_2 является положительным, то эти решения при всех малых $\varepsilon > 0$ неустойчивы.

Приведем схему доказательства теоремы 2. Полагая $h = x(t) - x(t, \varepsilon)$, где $x(t)$ некоторое решение системы (1) при $\mu = \mu(\varepsilon)$, получим систему

$$h' = [A + (\alpha(\varepsilon) - \alpha_0)A_1(t) + (\beta(\varepsilon) - \beta_0)A_2(t) + a'_x(x(t, \varepsilon), t, \mu(\varepsilon))]h + o(h).$$

Здесь $a'_x(x, t, \mu)$ - матрица Якоби вектор-функции $a(x, t, \mu)$, а $\mu(\varepsilon)$, $x(t, \varepsilon)$ - асимптотические формулы (3), (4). Учитывая (2) и подставляя (3), (4) в последнюю систему получим

$$h' = [A + \varepsilon(\hat{A}(t) + a'_{2x}(e(t), t, \mu_0))]h + \tilde{A}(t, \varepsilon)h + o(h). \quad (7)$$

Здесь для периодической матрицы $\tilde{A}(t, \varepsilon)$ справедлива оценка $\|\tilde{A}(t, \varepsilon)\| = o(\varepsilon)$ при $\varepsilon \rightarrow 0$. Свойства устойчивости бифурцирующего решения (3) и нулевого решения уравнения (7) равносильны.

Воспользуемся схемой М. Розо [3]. Осуществим переход к системе вида

$$x' = [B + \varepsilon S]x + O(t, \varepsilon)x, \quad (8)$$

где B и S постоянные матрицы. Данный переход возможен при ус-

ловии $p_j - p_i \neq \frac{2\pi i}{qT} m$, $i \neq j$, где $p_1, p_2, \dots, p_k$, $k \leq n$ - отличные

друг от друга собственные значения матрицы $\hat{A}$ (m - целое число). В данном случае этот переход невозможен, т.к. разность собственных

значений $\pm \frac{2\pi i}{T}$ дает число $\frac{2\pi i}{qT} p$, где p - целое число. Применим

метод, указанный в [3]. Произведем замену переменных в системе (7):

$y = e^{-Dt}h$, $D = P_0 A P_0$. Учитывая, что e^{-Dt} и P_0 перестановочны получим:

$$y' = [B + \varepsilon Q(t)]y + \tilde{Q}(t, \varepsilon)y, \quad (9)$$

где B , $Q(t)$ матрицы из (5), $\tilde{Q}(t, \varepsilon) = e^{-Dt} \tilde{A}(t, \varepsilon) e^{Dt}$. Для системы (9) переход к системе (8) возможен, т.е. при малых ε существует замена $x = Ky$, $K = I - \varepsilon H(t)$, где $H(t)$ - некоторая ограниченная qT -периодическая матрица, приводящая систему (9) к виду (8), где $O(t, \varepsilon)$ - ограниченная qT -периодическая матрица и для нее справедлива оценка $\|O(t, \varepsilon)\| = o(\varepsilon)$ при $\varepsilon \rightarrow 0$, S - постоянная матрица, удовлетворяющая равенству (6). Условия устойчивости нулевых решений систем (7), (8) и (9) равносильны.

Так как матрица B имеет полупростое собственное значение 0 кратности два, а остальные ее собственные значения имеют отрицательные вещественные части, то при малых $\varepsilon > 0$ матрица $T(\varepsilon) = B + \varepsilon S$ имеет два собственных значения $\lambda_1(\varepsilon)$ и $\lambda_2(\varepsilon)$ близкие к 0 так, что $\lambda_1(0) = \lambda_2(0) = 0$, а остальные собственные значения имеют отрицательные вещественные части. Поэтому характер устойчивости решения $x = 0$ системы (8), определяется собственными значениями $\lambda_1(\varepsilon)$ и $\lambda_2(\varepsilon)$. Обозначим через $e_1(\varepsilon)$ и $e_2(\varepsilon)$ соответственно собственные векторы отвечающие простым собственным значениям $\lambda_1(\varepsilon)$ и $\lambda_2(\varepsilon)$. Пусть $E_0(\varepsilon)$ - линейная оболочка

линейно независимых векторов $e_1(\varepsilon)$ и $e_2(\varepsilon)$, $P_0(\varepsilon)$ - оператор спектрального проектирования в собственное подпространство $E_0(\varepsilon)$, который представим в виде $P_0(\varepsilon) = P_0 + \varepsilon P_1 + o(\varepsilon)$, где P_0 - вышеуказанный оператор проектирования в подпространство E_0 . Собственные значения $\lambda_1(\varepsilon)$ и $\lambda_2(\varepsilon)$ представимы в виде $\lambda_1(\varepsilon) = \lambda_1 \varepsilon + o(\varepsilon)$, $\lambda_2(\varepsilon) = \lambda_2 \varepsilon + o(\varepsilon)$, где λ_1 и λ_2 собственные значения матрицы $P_0 T(0) P_0 = P_0 S P_0$. Следовательно, для завершения доказательства теоремы остается воспользоваться тем фактом, что свойство устойчивости бифурцирующих решений (3) системы (1) определяются знаками чисел λ_1 и λ_2 .

Список литературы

1. Нелинейные колебания, динамические системы и бифуркации векторных полей. Д. Гукенхеймер, Ф. Холмс. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 560 с.
2. Красносельский, М.А. Оператор сдвига по траекториям дифференциальных уравнений. – М.: Наука, 1966.
3. Розо М. Нелинейные колебания и теория устойчивости. – М.: Наука, 1971. – 288с.

*Работа представлена д. ф.-м.н., профессором
кафедры дифференциальных уравнений ГОУ
ВПО БГУ Юмагуловым М.Г.*

Дата представления работы: 09.04.2011.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЛОТАЦИОННОГО ПРОЦЕССА С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ МАТЕРИАЛА ПО ФЛОТИРУЕМОСТИ

Хисаметдинов Ф.З., Суюндуков А.Р.

Сибайский институт (филиал)

*ГОУ ВПО «Башкирский государственный университет»,
Россия, 453837, Башкортостан, г. Сибай, ул. Белова, д. 21
KhisametdinovFZ@mail.ru*

Одной из основных проблем кинетики флотации является изучение механизма процесса флотации и получение точного его математического описания. В данной работе рассматривается подход к моделированию процесса флотации с учетом неоднородности материала по флотирруемости.

MODELING OF THE FLOTATION PROCESS WITH THE VIEW OF THE HETEROGENEITY OF THE MATERIAL ON FLOTABILITY

Khisametdinov F.Z., Suyundukov A.R.

One of the main problems of the kinetics of flotation is the study of the mechanism of flotation process and to getting a exact mathematical description. In this work we consider an approach to the modeling of flotation process with the view of the heterogeneity of the material on floatability.

Моделирование процесса флотации и уравнение Белоглазова

Флотацией называется метод обогащения полезных ископаемых, основанный на различии в смачиваемости минералов водой. Одной из основных задач кинетики флотации является проникновение в механизм процесса и создание общего количественного описания процесса флотации.

Классический метод описания кинетики флотации основывается на общем законе действия масс и приводит к дифференциальному уравнению

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = K(1 - \varepsilon(t)), \quad (1)$$

где $\varepsilon(t)$ - извлечение ценного компонента в долях, K - кинетическая константа флотации. Интегрируя это уравнение при начальном условии $\varepsilon(0) = 0$, получим

$$\varepsilon(t) = 1 - \exp(-Kt). \quad (2)$$

Соотношение (2) в специальной литературе принято называть уравнением Белоглазова. Константа K характеризует протекание флотационного процесса для конкретного минерала в конкретных условиях и учитывает как свойства аппарата, так и характеристики частиц и пузырьков.

Кинетическая константа флотации K в сущности не является константой в общепринятом смысле этого слова. Ее можно считать постоянной величиной для определенной руды, реагентного режима и аппарата, в котором проводится флотация.

При выводе уравнения Белоглазова предполагается, что пульпа мономинеральная и монодисперсная, флотируемость зерен не изменяется в течение флотации, а объем пульпы, скорость подачи и дисперсность воздуха, а также пребывание пузырьков в пульпе постоянны, т.е. оно основано на предположении о тождественности минеральных частиц по флотируемости. Однако реальная пульпа всегда содержит частицы, отличающиеся размером, формой, содержанием ценного компо-

нента, поверхностными свойствами и в итоге – флотуируемостью, которая является некоторой суммарной характеристикой свойств частиц.

Учет неоднородности материала по флотуируемости

Одним из способов более точного описания кинетики флотации является способ, основанный на учете неоднородности материала по флотуируемости. Предположим, что флотуируемые частицы делятся на дискретное множество классов, каждый из которых удовлетворяет допущениям, принятым при выводе уравнения Белоглазова. Допустим также, что между частицами разных классов нет взаимодействия. Для каждого класса справедливо уравнение

$$\varepsilon_i(t) = 1 - \exp(-K_i t), i = 1..m, \quad (3)$$

где m — число классов. Пусть доля i -го класса в исходном сырье равна a_i , тогда очевидно

$$\sum_{i=1}^m a_i = 1,$$

и суммарное извлечение по всем классам

$$\varepsilon(t) = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i = \sum_{i=1}^m a_i (1 - \exp(-K_i t)). \quad (4)$$

Определенные таким образом классы образуют спектр, или дискретное распределение по флотуируемости. Обобщая данную ситуацию, можно считать, что частицы образуют непрерывное распределение. Вероятность $P(K_a \leq K \leq K_b)$ того, что некоторая характеристика (например, флотуируемость частицы) находится в пределах от K_a до K_b , назовем плотностью распределения по флотуируемости:

$$P(K_a \leq K \leq K_b) = \int_{K_a}^{K_b} \varphi(K) dK.$$

При этом очевидно, что

$$\int_0^{\infty} \varphi(K) dK = 1.$$

Тогда уравнение (3) можно записать в виде

$$\varepsilon(t) = \int_0^{\infty} \varphi(K)(1 - e^{-Kt}) dK = 1 - \left(\int_0^{\infty} \varphi(K) e^{-Kt} dK \right). \quad (5)$$

Выбор вида функции распределения

Функция распределения $\varphi(K)$ характеризует флотируемость конкретного материала и может быть найдена на основе экспериментальных данных. В различных работах исследователями предлагаются разнообразные виды представления функции распределения. В работах японских ученых Имайцуми и Инуэ предлагается следующий вид функции распределения на основе гамма-функции Эйлера

$$\varphi(K) = \frac{\lambda^{p+1}}{\Gamma(p)} K^p e^{-\lambda K}, \quad (6)$$

где λ и p – параметры функции распределения, характеризующие конкретный материал. Подставляя (6) в (5) и применяя обратное преобразование Лапласа, получим

$$\varepsilon(t) = 1 - p \left(\frac{\lambda}{\lambda + t} \right)^{p+1}. \quad (7)$$

Значения параметров λ и p для конкретного материала могут быть найдены на основе экспериментальных данных о величине извлечения ε_j в дискретные моменты времени t_j ($j = 1..n$) с использованием метода наименьших квадратов

$$z = \sum_{j=1}^n [\varepsilon_j - 1 + p \left(\frac{\lambda}{\lambda + t_j} \right)^{p+1}]^2 \rightarrow \min.$$

При этом получим систему нелинейных уравнений относительно неизвестных параметров λ и p :

$$\begin{cases} \left(\frac{\lambda}{\lambda + t_j} \right)^{2(p+1)} p (1 + p \ln(\frac{\lambda}{\lambda + t_j})) - \varepsilon_j \left(\frac{\lambda}{\lambda + t_j} \right)^{(p+1)} (1 + p \ln(\frac{\lambda}{\lambda + t_j})) = 0 \\ p(p^2 + p) \left(\frac{\lambda}{\lambda + t_j} \right)^{2p+1} \frac{t_j}{(\lambda + t_j)^2} - \varepsilon_j [(p^2 + p) \left(\frac{\lambda}{\lambda + t_j} \right)^p \frac{t_j}{(\lambda + t_j)^2}] = 0 \end{cases}. \quad (8)$$

Система (8) может быть приближенно решена с помощью какого-либо численного метода. Подставляя в (7) решения λ^* и p^* системы (8) получим функцию извлечения ценного компонента в зависимости от времени, учитывающую неоднородность материала по флотируемости.

Заключение

На основе предложенной схемы разработаны алгоритм и программа в среде MATLAB.

В уравнении Белоглазова кинетическая константа флотации характеризует свойства однокомпонентной (в смысле флотируемости) пульпы применительно к неоднородному материалу дает усредненную оценку.

Введение функции распределения материала по флотируемости позволяет точнее оценивать свойства материала, раскрывая при этом его неоднородность, и позволяет достовернее описать механизм процесса флотации.

Список литературы

1. Абрамов А. А. Флотационные методы обогащения: учебник для вузов / А. А. Абрамов. – М.: Недра, 1984. – 383 с.
2. Физико-химические основы теории флотации / О. С. Богданов, В. И. Классен. – М.: Наука, 1983. – 264 с.
3. Кинетика флотации / Ю. Б. Рубинштейн, Ю. А. Филиппов. – М.: Недра, 1980. – 375 с.
4. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин - М.: Наука, 1979.
5. Шупов Л. П. Моделирование и расчет на ЭВМ схем обогащения. – М.: Недра, 1980. – С. 288.

*Работа представлена профессором кафедры
математического анализа ГОУ ВПО «БГУ»,
д. т. н., профессором Физуллиным З.Ю.*

Дата представления работы: 15.04.2011.

ОПЕРАТОРНЫЕ УРАВНЕНИЯ В ЗАДАЧАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ БИФУРКАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Г.Р. Абушахмина

*ГОУ ВПО «Сибайский институт (филиал) БашГУ»
Россия, 453640, Башкортостан, г. Сибай, ул. Белова, 21
abushahmina_g@mail.ru*

Настоящая работа посвящена исследованию теоремы о неявной функции для функции, заданной в виде $x = A(\mu)x + \varepsilon(x)$ относительно параметра μ ; т.е. сначала излагается случай, когда параметр $\mu \in R^1$,

далее – когда $\mu \in R^2$. Метод позволяет обнаруживать бифуркационные значения параметров; процедуру построения решений, позволяющую провести приближенное исследование задач, зависящих от одного и двух параметров.

THE OPERATIONAL EQUATIONS IN MODELING PROBLEMS BIFURCATION PHENOMENA IN DYNAMIC SYSTEM

G.R. Abushahmina

The present work is devoted research of the theorem of implicit function for the function set in a kind concerning parameter; i.e. at first the case, when parameter, further – when is stated. The method allows to find out bifurcation values of parameters; procedure of construction of the decisions, allowing to conduct the approached research of the problems depending on one and two parameters.

Введение

Задачи математического и компьютерного моделирования многих сложных динамических систем приводит к необходимости решению операторных уравнений, зависящих от параметров. Многие такие задачи приводят к уравнениям вида:

$$x = A(\mu)x + \mathcal{E}(x), \quad x \in R^N, \quad (1)$$

где μ - скалярный или векторный параметр, $A(\mu)$ - квадратная матрица, непрерывно зависящая от параметра μ , а вектор-функция $\mathcal{E}(x)$ удовлетворяет соотношению: $\mathcal{E}(x) = o(x)$ при $x \rightarrow 0$.

Уравнение (1) имеет решение $x = 0$ при всех значениях параметра μ ; этому решению обычно соответствует некое стационарное решение функциональной расширенной динамической системы.

При изменении характера устойчивости решения $x = 0$ у уравнения (1) могут появиться новые ненулевые решения в окрестности решения $x = 0$. В математической постановке такому явлению отвечают точки бифуркации динамической системы.

Значение μ_0 параметра μ является правильной точкой бифуркации уравнения (1) по направлению вектора e , где e - некоторый ненулевой вектор из R^N . Тогда вектор e будет собственным для матрицы $A(\mu_0)$, отвечающий собственному значению 1.

Одним из основных вопросов при изучении точек бифуркации является вопрос об условиях, при которых возникают бифуркацион-

ные явления. В настоящей работе приводится схема получения таких условий на основе классической теоремы о неявной функции. Приведем в краткой форме эту теорему.

Рассмотрим уравнение

$$F(x, \mu) = 0. \quad (2)$$

Пусть $F(x_0, \mu_0) = 0$ и $F'(x_0, \mu)_0 \neq 0$. Тогда существует единственное решение $\mu = \mu(x)$ уравнения (2), определенное в окрестности точки x_0 и такие, что $\mu(x_0) = \mu_0$.

Одномерный случай

Рассмотрим сначала скалярное уравнение

$$x = a(\mu)x + \varepsilon(x), \quad x \in R^1, \quad \mu \in R^1, \quad (3)$$

функция $a(\mu)$ гладко (непрерывно дифференцируемо) зависит от скалярного параметра μ и имеет простое собственное значение 1.

Уравнение (3) имеет решение $x = 0$ при всех μ расположенных на интервале ненулевых решений, близких к нулю. Если $a(\mu_0) \neq 1$, то при всех μ близких к μ_0 уравнение (3) в некоторой окрестности числа $x = 0$ не имеет ненулевого решения.

Для уравнения (3) условие теоремы о неявной функции не выполнено, т.к. если $f(x, \mu) = x - a(\mu)x - \varepsilon(x)$, то $f'_\mu(0, \mu_0) = 0$.

Поэтому перейдем к другому уравнению $G(x, \mu) = 0$, где

$$G(x, \mu) = \begin{cases} 1 - a(\mu) - \frac{\varepsilon(x)}{x}, & x \neq 0, \\ 1 - a(\mu), & x = 0. \end{cases}$$

Для уравнения $G(x, \mu) = 0$ выполнены условия теоремы о неявной функции, т.к. $G(0, \mu_0) = 0$ и $G'_\mu(0, \mu_0) = -a'(\mu_0) \neq 0$. Поэтому существует $\mu = \mu(x)$, определенный в окрестности решения $x = 0$: $\mu(0) = \mu_0$. Другими словами существует последовательность $x_n \rightarrow 0$, $x_n \neq 0$: $\mu_n = \mu(x_n) \rightarrow \mu_0$, т.е. μ_0 - точка бифуркации уравнения (3).

Двумерный случай

Рассмотрим также случай

$$x = A(\alpha, \beta)x + \varepsilon(x), \quad x \in R^2 \quad (4)$$

где матрица $A(\alpha_0, \beta_0)$ - имеет полупростое собственное значение 1 кратности 2.

Пусть e и g - линейно независимые собственные векторы оператора $A(\alpha_0, \beta_0)$, соответствующие собственному значению 1:

$$A(\alpha_0, \beta_0)e = e \text{ и } A(\alpha_0, \beta_0)g = g.$$

Аналогично $G(x, \alpha, \beta) = 0$, где

$$G(x, \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{x}{\|x\|} - A(\alpha, \beta) \frac{x}{\|x\|} - \frac{\varepsilon(x)}{\|x\|}, & x \neq 0, \\ (I - A(\alpha, \beta))e, & x = 0. \end{cases}$$

Функция $G(x, \alpha, \beta)$ непрерывна везде, при этом $G(0, \alpha_0, \beta_0) = 0$, т.е. для нее выполнены условия теоремы о неявной функции.

Имеет место

Лемма 1.

$$G'_{(\alpha, \beta)}(0, \alpha, \beta) = \begin{pmatrix} (A'_\alpha e, e^*) & (A'_\beta e, e^*) \\ (A'_\alpha e, g^*) & (A'_\beta e, g^*) \end{pmatrix}.$$

Пусть $\det \begin{vmatrix} (A'_\alpha e, e^*) & (A'_\beta e, e^*) \\ (A'_\alpha e, g^*) & (A'_\beta e, g^*) \end{vmatrix} \neq 0$, тогда выполнены все

условия теоремы о неявной функции. Следовательно существуют функции $\alpha = \alpha(x)$ и $\beta = \beta(x)$, определенные в окрестности решения $x = 0$, $\alpha(0) = \alpha_0$, $\beta(0) = \beta_0$.

Список литературы

1. Юмагулов М.Г. Операторный метод исследования правильной бифуркации в многопараметрических задачах / М.Г. Юмагулов // Доклады академии наук, 2009. – Т. 424. – № 2. – С. 177 – 180.

2. Юмагулов М.Г. Обыкновенные дифференциальные уравнения: теория и приложения / М.Г. Юмагулов. – М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2008. – 182 с.

3. Введение в теорию динамических систем с дискретным временем: пер. с польск. Ю.Н. Сирота / Под ред. В.П. Оди́нца. – М.: Институт компьютерных исследований, 2006. – 360 с.

Работа представлена д. ф.-м. н., профессором кафедры Дифференциальных уравнений ГОУ ВПО БГУ Юмагуловым М.Г.

Дата представления работы: 25.04.2011.

ЛОКАЛЬНЫЕ БИФУРКАЦИИ В КОНСЕРВАТИВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Л.С.Ибрагимова

*ГОУ ВПО «Башкирский государственный аграрный университет»,
Россия, 450001, г. Уфа, ул. 50 лет Октября, 34
lilibr@mail.ru*

Консервативные системы занимают важное место в теории динамических систем и ее многочисленных приложениях. Статья посвящена вопросам исследования задач о локальных бифуркациях в консервативных динамических системах. Получены признаки бифуркаций для дискретных динамических систем.

LOCAL BIFURCATIONS IN THE CONSERVATIVE DYNAMIC SYSTEMS

L.S.Ibragimova

Conservative systems take an important position in the theory of dynamic systems and its numerous applications. The present article is devoted to the solution of the problems about local bifurcations in the conservative dynamic systems. Criteria of bifurcations for discrete dynamic systems are received.

Постановка задачи

Многие задачи естествознания приводят к консервативным динамическим системам, которые характеризуются неизменным во времени запасом энергии. Консервативные системы занимают важное место в теории динамических систем и ее многочисленных приложениях в механике, биологии, экономике и др.

Изучение вопросов о признаках консервативности позволяет эффективно описывать классы таких систем, исследовать зависимость от параметров, рассматривать различные приложения. В настоящей работе изучаются некоторые из указанных вопросов применительно к дискретным динамическим системам.

Дискретную динамическую систему, определяемую уравнением

$$x_{k+1} = f(x_k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad x_k \in R^N, \quad (1)$$

где $f: R^N \rightarrow R^N$ - гладкое отображение, назовем консервативной, если $|\det f'(x)| = 1, \quad \forall x \in R^N$.

Наряду с (1) будем рассматривать также систему

$$x_{k+1} = f(x_k, \mu), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad x_k \in R^N, \quad (2)$$

где $f(x, \mu)$ гладко зависит от x и скалярного или векторного параметра μ . Пусть $f(0, \mu) \equiv 0$, т.е. система (2) при всех значениях μ имеет стационарное состояние $x = 0$. Тогда систему (2) можно представить в виде

$$x_{k+1} = A(\mu)x_k + a(x_k, \mu), \quad (3)$$

где $A(\mu) = f'_x(0, \mu)$, а нелинейность $a(x, \mu)$ удовлетворяет соотношению $a(x, \mu) = O(\|x\|^2)$ при $\|x\| \rightarrow 0$.

Значение $\mu = \mu_0$ параметра μ назовем точкой локальной бифуркации системы (3) (в окрестности стационарного состояния $x = 0$), если матрица $A(\mu_0)$ имеет одно или несколько собственных значений, модуль которых равен 1.

Пусть $\mu = \mu_0$ - точка локальной бифуркации системы (3). Здесь основными являются следующие случаи.

S1) $A(\mu_0)$ имеет собственное значение 1 кратности 2;

S2) $A(\mu_0)$ имеет собственное значение -1 кратности 2;

S3) $A(\mu_0)$ имеет простые собственные значения 1 и -1 ;

S4) $A(\mu_0)$ имеет простые собственные значения $e^{\pm 2\pi\theta i}$,

где $0 < \theta < 1$ и $\theta \neq \frac{1}{2}$.

Известно (см., например, [1]), что коразмерность указанных бифуркаций равна 1. При этом случай S1 может привести к бифуркации

возникновения малых ненулевых неподвижных точек, случай S2 – к бифуркации возникновения циклов периода 2, случай S3 – к сценариям, указанным в случаях S1 и S2, а случай S4 – к бифуркации возникновения длиннопериодических циклов. Отметим также, что достаточные признаки бифуркаций системы (3) обычно формулируются в виде соотношения $\psi \neq 0$, где ψ – некоторая числовая характеристика, определяемая только по линейной части уравнения (3). При этом бифуркация является «правильной» в том смысле, что решения возникают вдоль некоторого собственного вектора матрицы $A(\mu_0)$. Представляет интерес изучить аналогичные вопросы для консервативных систем вида (3).

Основные результаты

Пусть система (2) консервативна при всех значениях μ , т.е. $|\det f'_x(x, \mu)| \equiv 1, \forall x \in R^N$. Отметим, что тогда, в частности, выполнено тождество $|\det A(\mu)| \equiv 1$.

Указанные выше вопросы для простоты будем изучать для ситуации, когда матрица $A(\mu)$ имеет вид

$$A(\mu) = \begin{pmatrix} 1 + \alpha_1(\mu) & 0 \\ 0 & 1 + \alpha_2(\mu) \end{pmatrix},$$

а нелинейность $a(x, \mu)$ является квадратичной, т.е. имеет вид

$$a(x, \mu) = \begin{pmatrix} a_1 x_1^2 + 2a_2 x_1 x_2 + a_3 x_2^2 \\ b_1 x_1^2 + 2b_2 x_1 x_2 + b_3 x_2^2 \end{pmatrix}.$$

Требование консервативности этой системы означает выполнение тождества

$$\det(A(\mu) + a'_x(x, \mu)) = 1, \quad (4)$$

верного при всех μ .

Лемма. Условие (4) имеет место тогда и только тогда, когда выполнены равенства

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{a_1}{b_1} = \frac{a_2}{b_2} = \frac{a_3}{b_3} \\ (1 + \alpha_1(\mu))b_2 + (1 + \alpha_2(\mu))a_1 = 0 \\ (1 + \alpha_1(\mu))b_3 + (1 + \alpha_2(\mu))a_2 = 0 \end{array} \right. \quad (5)$$

Отметим, что исследование бифуркации в рассматриваемой консервативной системе невозможно общими методами, так как указанные выше числовые характеристики, определяющие достаточные признаки бифуркации, для этой системы, как правило, равны нулю. Тем не менее, здесь явление бифуркации имеет место. Ограничимся приведением соответствующего примера.

Пусть $\alpha_1(\mu) = \mu$, а $\alpha_2(\mu) = -\frac{\mu}{1+\mu}$. Положим

$a_3 = b_3 = 1$. Тогда $a_2 = b_2 = -(1+\mu)^2$ и $a_1 = b_1 = (1+\mu)^4$. В этом случае система имеет ненулевые решения

$$\left\{ \begin{array}{l} x_1 = -\frac{\mu}{(\mu+2)^2(1+\mu)^2}; \\ x_2 = \frac{\mu}{(\mu+2)^2(1+\mu)}, \end{array} \right.$$

которые при $\mu \rightarrow 0$ стремятся к нулевому решению рассматриваемой системы. Следовательно, значение $\mu_0 = 0$ является точкой бифуркации системы.

Заключение

Автором описаны основные сценарии бифуркаций консервативных динамических систем вида (3), рассмотрены также ситуации, когда матрица $A(\mu_0)$ является ортогональной, получены признаки соответствующих бифуркаций, предложены схемы приближенного исследования соответствующих бифуркаций.

Список литературы

1. Нелинейные колебания, динамические системы и бифуркации векторных полей / Дж. Гукенхеймер, Ф. Холмс. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 560 с.
2. Введение в теорию динамических систем / Каток А.Б., Хасселблат Б. – М.: МЦНМО, 2005. – 464 с.

3. Методы качественной теории в нелинейной динамике / Л.П. Шильников [и др.]. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. – 416 с.

Работа представлена д-ром ф.-м.н., профессором кафедры дифференциальных уравнений ГОУ ВПОБГУ Юмагуловым М.Г.

Дата представления работы: 16.04.2011.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫМЫВАНИЯ ГАЗА ИЗ ГИДРАТНЫХ ВАЛУНОВ

А.С. Чиглинцева¹, Г.А. Кунсбаева²

¹ *ГОУ ВПО «Бирская государственная социально-педагогическая академия»,*

Россия, Башкортостан, 452453 г. Бирск,

ул. Интернациональная, 10

changelina@rambler.ru

² *ГОУ ВПО «Сибайский институт (филиал) Башкирского государственного университета»,*

Россия, Башкортостан, 453830 г. Сибай, ул. Белова, д. 21

Kun_gulnaz@mail.ru

Работа посвящена проблеме извлечения газа из подводных газогидратных массивов. «Шахтный» способ добычи газа из подводных газогидратных массивов, предполагает выработку газогидратов в виде валунов, их подъем в контейнерах и последующее извлечение газа из состава гидратов при воздействии тепловыми полями.

THEORETICAL MODEL OF LEACHING OF GAS FROM BOULDER HYDRATED

A.S. Chiglintseva, G.A.Kunsbaeva

This work is devoted to the extraction of gas from the underwater gas hydrate arrays. "Mine" method of gas production from submarine gas hydrate arrays, involves the production of gas hydrates in the form of boulders, their rise in the containers and the subsequent extraction of gas from the hydrates under the influence of thermal fields.

Актуальность работы

Согласно современным геологическим данным огромные запасы углеводородного газа находятся в донных осадках морей и океанов в виде твердых газогидратных отложений. Около 98% мировых запасов газогидратов находятся в океане и только 2% – на суше в зоне вечной мерзлоты [5, 6]. При этом запасы газогидратов составляют от 2800 до 25000 трлн.м³ [4, 5]. Потенциальные запасы метана в газогидратах

оцениваются специалистами до $2 \cdot 10^{16}$ м³ [3–5]. При этом в одном кубометре природного газогидрата содержится до 180 м³ газа и 0,78 м³ воды [4]. В океанах и морях газогидраты встречаются на глубинах от 300–400 м до 1000–1200 м и более [2, 4]. Они насыщают верхний слой донных осадков и составляют 10–20% от общего объема осадков [4, 5]. Скопления газогидратов найдены во многих уголках Мирового океана. Газогидраты присутствуют также на значительной территории дна Байкала [6]. Проблема бурения скважин в газогидратном массиве затрагивается в работе [7]. Представляется, что извлечение газа из состава таких газогидратных массивов возможно их растоплением. При этом в качестве источника тепла можно использовать, например, более теплую воду, из приповерхностных слоев океана.

Цели и задачи работы

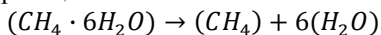
В работе рассматривается математическая модель, которая описывает извлечение газа из состава газогидрата при воздействии тепловыми полями. Модель получена на основе закона сохранения масс и энергии с учетом кинетики физико-химических превращений и представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений. При известных геометрических параметров реактора, задавая условия на ее входе и на выходе, то есть граничные условия, решая краевую задачу, можно определить термохимическую и гидродинамическую обстановку в реакторе. В частности, представленная модель позволяет получить распределение массовых расходов твердой, газообразной и жидкой фазы, температур жидкой фазы по длине реактора в зависимости от интенсивности подачи гидрата, газа и воды, их начальной температуры, а также дисперсности гидрата.

Проблематика работы

На рис. 1 представлена возможная технологическая схема извлечения газа из гидратных валунов. Согласно предполагаемой схеме, реактор сверху постоянно загружается гидратом, а снизу в реактор подается теплая вода некоторым постоянным расходом. Продукты разложения (вода и газ) самотеком удаляются из реактора, при котором уровень воды поддерживается на постоянной высоте.

Результаты реализации решения задачи

Для получения дифференциальных уравнений в одномерном приближении рассмотрим установившийся режим функционирования реактора. Примем, что частицы гидрата представляют собой шарик с радиусом a . Для процесса разложения гидрата примем следующую схему химической реакции:



Считаем, что теплая вода подается в количестве достаточном до полного разложения гидрата. Ось z направляем по оси реактора вниз. Давление воды в реакторе считаем постоянным. Частицы гидрата, разлагаясь на газ и воду, сохраняют свою геометрическую конфигурацию. Тогда можно записать уравнения сохранения их числа:

$$\frac{d}{dz}(S n_h v_h) = 0, \quad S = \pi R^2 \quad (1)$$

Здесь и в дальнейшем нижние индексы h, w, g соответственно относятся к параметрам гидрата, воды и газа; n_h - число частиц гидрата в единице объема; R и S – радиус и площадь сечения реактора.

Уравнения сохранения масс для гидрата, воды и газа запишутся в виде:

$$\frac{dm_h}{dz} = -J_h, \quad \frac{dm_w}{dz} = -J_w, \quad \frac{dm_g}{dz} = -J_g. \quad (2)$$

$$m_h = S \rho_h^0 \alpha_h v_h, \quad m_w = S \rho_w^0 \alpha_w v_w, \quad m_g = S \rho_g^0 \alpha_g v_g, \quad \alpha_h + \alpha_w + \alpha_g = 1$$

где m_h, m_w, m_g ; $\rho_h^0, \rho_w^0, \rho_g^0$; $\alpha_h, \alpha_w, \alpha_g$ – массовые расходы, истинные плотности, объемные содержания гидрата, воды и газа соответственно; J_h, J_w, J_g – интенсивности разложения гидрата и образования воды и газа, отнесенные на единицу длины реактора.

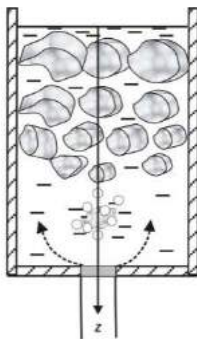


Рис. 1. Технологическая схема

Для параметров, определяющих интенсивности массопереноса между составляющими системы, из закона сохранения массы имеем следующие зависимости:

$$J_h = J_w + J_g$$

Из условий стехиометрии имеем следующие зависимости между параметрами, описывающими интенсивности химических превращений:

$$J_g = G J_h, \quad J_w = (1 - G) J_h \quad (3)$$

где G – массовое содержание газа в гидрате.

Из уравнений масс (2), учитывая (3), можно получить следующее выражение:

$$\frac{d}{dz}((1-G)m_h - m_w) = 0 \quad \frac{d}{dz}(Gm_h - m_g) = 0 \quad (4)$$

Из этого уравнения следует интеграл масс:

$$(1-G)m_h - m_w = \text{const} \quad Gm_h - m_g = \text{const} \quad (5)$$

Известным параметром при эксплуатации реактора является массовый расход гидрата m_{h0} на входе ($z = 0$) реактора. Если принять, что в реакторе происходит полное разложение гидрата ($m_{he} = 0$), а также полный расход газа ($m_{ge} = 0$), то на основе интеграла (5) следует соотношение, связывающее расходы воды, газа и гидрата на входном и выходном сечениях реактора:

$$\begin{aligned} m_{w0} &= (1-G)m_{h0} + m_{we} \\ m_{g0} &= Gm_{h0} \\ m_{we} &= \frac{m_{h0}l_h}{c_w(T_{we}-T_h)} \end{aligned} \quad (6)$$

где l_h – удельная теплота разложения гидрата, T_{we} – температура воды на выходе из реактора, T_h – температура гидрата.

Приведенные выше уравнения необходимо дополнить следующим кинематическим соотношением:

$$\alpha_h = \frac{4}{3}\pi a_h^3 n_h$$

При движении гидрата в реакторе полагаем, что реализуется плотная упаковка, согласно которой объемное содержание гидрата в реакторе составляет $\alpha_h = 0.64$ [8]. Давление газа в реакторе будем считать постоянным. Принимая, что для газовой смеси выполняется закон Дальтона, запишем уравнение Клайперона-Менделеева:

$$P = \rho_g^0 R_g T_g$$

где $R_g = 520 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ – приведенная газовая постоянная для газа.

Уравнение теплового баланса для воды запишем в виде:

$$\frac{d}{dz}(m_w c_w T_w) = Q_w - J_h(1-G)c_w T_h \quad (7)$$

где c_w – удельная теплоемкость воды, Q_w – тепловой поток от жидкости к гидрату, который тратится только на разложение гидрата.

Уравнение (7) с учетом уравнений масс может быть проинтегрировано. На основе этого интеграла и полагая, что при прохождении гидрата через реактор происходит полное его разложение, получим уравнение для температуры воды:

$$T_w = \frac{m_{w0}}{m_{we}} T_{w0} + \frac{m_{h0}(l_h - (1-G)c_w T_h)}{m_{we} c_w} \quad (8)$$

Тепловой поток представим в виде [8]:

$$Q_w = J_h l_h = S n_h q, \quad q = 4\pi a_h^2 \lambda Nu \frac{(T - T_h)}{2a_h}$$

$$Nu = 2 + 0.65\sqrt{Pe}, \quad Pe = \frac{2a_h(v_w + v_h)}{\chi_w}, \quad \chi_w = \frac{\lambda_w}{\rho_w c_w}$$

Здесь $\lambda_w, \chi_w, Nu, Pe$ – коэффициенты теплопроводности, температуропроводности воды и числа Нуссельта и Пекле.

На основе полученной системы уравнений проводились численные расчеты. На рис. 2 и 3 представлены распределения температур, массовых расходов гидрата, воды и газа, а также радиуса частиц гидрата от длины цилиндрического реактора с геометрическими параметрами $R=1$ м при начальном массовым расходе гидрата 100 кг/с. Для параметров определяющих температуру воды в реакторе приняты следующие значения: $T_h=277\text{K}$, $T_{we}=300\text{K}$, $a_0=0,05$ м, а для параметров, отвечающих за теплофизические свойства, межфазный тепломассообмен и химическую кинетику использованы: $\rho_h^0 = 913 \text{ кг/м}^3$, $\rho_w^0 = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_g^0 = 6,4 \text{ кг/м}^3$, $c_w = 4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$, $l_h = 5 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$, $\lambda_w = 0,58 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$.

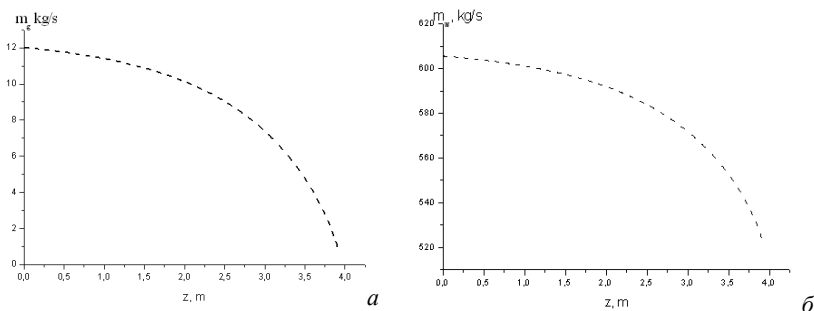


Рис. 2. Распределение массовых расходов а) газа б) воды вдоль реактора

Заключение

В данной работе предложена технологическая схема и теоретическая модель для процесса вымывания газа из состава гидрата тепловой водой в противоточном вертикальном трубчатом реакторе непрерывного действия.

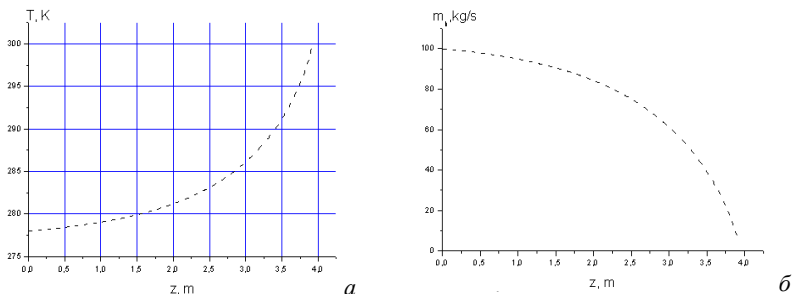


Рис. 3. Распределение а) температуры воды б) массового расхода гидрата вдоль реактора

Список литературы

1. Yuri F. Makogon Natural gas hydrates – A promising source of energy // Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2010. №2 – P. 49 – 59.
2. Газовые гидраты. / С.Ш. Бык, Ю.Ф. Макогон, В.И. Фомина. – М.: Химия, 1980. – 296 с.
3. Дучков А.Д. Газогидраты метана в осадках озера Байкал // Росс. хим. журн., 2003. Т. 43. – №3. – С. 91-100.
4. Газовые гидраты / Ю.А. Дядин, А.Л. Гущин. // Соросовский образовательный журнал, 1998. – №3. – С. 55-64.
5. Газовые гидраты в природных условиях. / В.С. Истомин, В.С. Якушев. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
6. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. – М.: Недра, 1974.
7. Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред. –М.: Наука, 1987. – Т. 1. – 464 с.
8. К расчету обжига известняка в кокосовой печи / В.Ш. Шагапов, М.В. Буркин, А.В. Воронин, А.А. Шатов // Теоретические основы химической технологии, 2004. – Т. 38. – № 4. – С. 467–474.

Работа представлена д.т.н., членом-корреспондентом Академии инженерных наук м. А.М. Прохорова, профессором кафедры вычислительной техники и прикладной математики Ячиковым И.М.

Дата представления работы: 02.04.2011.

АЛГОРИТМЫ ПРИБЛИЖЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАДАЧ О СУБФУРКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

М.Г. Юмагулов

*ГОУ ВПО «Бакирский государственный университет»,
Россия, 450074, г. Уфа, ул. З. Валиди, д. 32
yum_tmg@mail.com*

Статья посвящена вопросам приближенного исследования задач о субфуркации динамических систем. Предлагается схема численного расчета таких задач. Метод использует переход к эквивалентным операторным уравнениям, для анализа которых предлагается новая схема исследования, основанная на конструировании асимптотических формул и применении методов теории возмущения линейных операторов.

ALGORITHM OF THE APPROACHED RESEARCH OF PROBLEM ABOUT SUBFURCATION DYNAMIC SYSTEM

M.G. Yumagulov

The article is devoted to research approximate subfurkacion problems of dynamical systems. A scheme for numerical calculation of such problems. The method uses a transition to the equivalent operator equations for the analysis which we propose a new scheme of studies, based on the construction of the asymptotic formulas and application of perturbation theory for linear operators.

Постановка задачи

Исследование сложных бифуркационных явлений в динамических системах требует эффективного сочетания теоретических и вычислительных методов. В настоящей статье предлагается схема приближенного построения так называемых языков Арнольда [1] в задаче о субфуркации динамических систем.

Рассматривается дискретная динамическая система

$$x_{k+1} = A(\lambda)x_k + a(x_k, \lambda), k = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

где $A(\lambda): R^2 \rightarrow R^2$ – линейный оператор, непрерывно дифференцируемо зависящий от параметра λ ; $a(x, \lambda) = o(x)$ при $x \rightarrow 0$. Система (1) при любом значении параметра λ имеет неподвижную точку $x = 0$.

Пусть при $\lambda = \lambda_0$ матрица $A(\lambda_0)$ имеет собственное значение по модулю равное 1, т.е. $\chi = 0$ – негиперболическая неподвижная точка. Тогда при переходе λ через λ_0 характер устойчивости неподвижной точки $\chi = 0$ системы (1) меняется. Это влечет за собой качественное изменение поведения системы (1) в окрестности неподвижной точки $\chi = 0$. Здесь возможны различные сценарии: возникновение новых неподвижных точек, циклов различных периодов и т.п. Другими словами, возможны различные бифуркации. Сценарии бифуркаций определяются свойствами собственных значений матрицы Якоби $A(\lambda)$ при $\lambda = \lambda_0$.

Пусть матрица $A(\lambda_0)$ имеет собственное значение $e^{i\varphi}$, где $\varphi \in (0, 2\pi)$, $\varphi \neq \pi$. Пусть $\varphi = \frac{2\pi m}{n}$, где m, n – целые. В этом случае, как правило, бифуркация в системе (1) сопровождается возникновением циклов периода n . Для того, чтобы такие циклы возникли, собственные значения матрицы $A(\lambda)$ должны принимать значения из некоторого клювообразного множества U_φ , называемого также языком Арнольда. Каждый такой клюв упирается в точку $e^{i\varphi}$. Типичный язык Арнольда U_φ заключен между двумя гладкими соприкасающимися в точке $e^{i\varphi}$ кривыми. На единичной окружности существует бесконечно много точек вида $e^{i\frac{2\pi m}{n}}$, причем они плотно расположены на окружности. И каждому такому числу соответствует свой клюв.

Основные результаты

Рассмотрим дискретную динамическую систему

$$x_{k+1} = A(\alpha, \beta)x_k + a(x_k, \alpha, \beta), k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2)$$

где $A(\alpha, \beta): R^2 \rightarrow R^2$ – линейный оператор, непрерывно дифференцируемо зависящий от параметра $\lambda = (\alpha, \beta)$; $a(x, \alpha, \beta) = o(x)$ при $x \rightarrow 0$.

Пусть при некотором $\lambda_0 = (\alpha_0, \beta_0)$ матрица $A(\alpha_0, \beta_0)$ имеет

собственное значение $e^{i\frac{2\pi m}{n}}$, где $0 < \frac{m}{n} < 1, \frac{m}{n} \neq \frac{1}{2}$.

На первом этапе предлагаемой схемы определим значения параметров (α, β) , при которых система (2) имеет периодическое решение периода n . С этой целью удобно перейти к операторному уравнению. Например, если матрица A_0 имеет собственное значение

$e^{i\frac{\pi}{2}}$, то соответствующее операторное уравнение примет вид

$$x = A^4(\alpha, \beta)x + \tilde{a}(x, \alpha, \beta),$$

На втором этапе предлагаемой схемы используются установленные в [2] асимптотические формулы, из которых следует, что бифурцирующие решения $x(\delta)$ операторного уравнения и соответствующие значения параметров $\alpha(\delta), \beta(\delta)$ представимы в виде:

$$x(\delta) = \tilde{x} + \delta^2 e_1 + \delta^3 e_2 + o(\delta^3),$$

$$\alpha(\delta) = \alpha_0 + \delta \alpha_1 + \delta^2 \alpha_2 + o(\delta^2), \quad \beta(\delta) = \beta_0 + \delta \beta_1 + \delta^2 \beta_2 + o(\delta^2),$$

На третьем этапе решается задача построения спектра матрицы $A(\delta)$, имеющей непрерывную ветвь собственных значений $\mu(\delta) = \nu(\delta) + i\omega(\delta)$, которые могут быть вычислены как методами теории возмущения линейных операторов, так и с использованием программных продуктов. Автором предложены схемы с использованием каждого из подходов, на основе которых разработаны алгоритмы и программы численного построения языков Арнольда в задаче о суббифуркации динамических систем.

Список литературы

1. Арнольд В.И. Геометрические методы в теории обыкновенных дифференциальных уравнений / Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2000. – 400 с.
2. Вышинский А.А. Операторный метод приближенного исследования правильной бифуркации в многопараметрических динамических системах // Уфимский математический журнал, 2010. – Т. 2. – № 4. – С. 3 – 26.

Работа представлена д. ф.-м.н., профессором А.М.Красносельским, Институт проблем передачи информации РАН, г. Москва.

