

О.С. Волковский, Е.Р. Ковылин

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ЗАДАЧЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ ТЕКСТА НА ЕСТЕСТВЕННОМ ЯЗЫКЕ

Аннотация. Дана оценка существующим подходам к реализации систем автоматической генерации текстов на естественном языке. На основе проведенных исследований выбран наиболее перспективный из рассмотренных методов (с точки зрения осмысленности получаемых результатов).

Ключевые слова: автоматическая генерация текста, семантический анализ, генеративная грамматика, семантическая сеть, нейронная модель языка, теория «Смысл – Текст».

Введение. Направление обработки текстов на естественном языке включает в себя множество задач – от обычного синтаксического анализа до более сложных целей, вектор которых уходит глубоко в искусственный интеллект. Наиболее интересным, и, вместе с тем наименее реализованным на прикладном уровне (на данный момент) является процесс автоматической генерации текстов на естественном языке (ЕЯ). Сложности, которые возникают у разработчиков и исследователей систем, генерирующих текст, являются фундаментальными. Во-первых, ЕЯ не обладает постоянной структурой, необходимой для построения любой компьютерной системы. Во-вторых, возникает проблема описания смысловой составляющей текста. Понимание текста требует создания мощного компонента искусственного интеллекта, который мог бы работать с семантическими базами знаний, адаптировать систему для новых знаний и обучаться. Достаточно важной проблемой является неоднородность языка, как следствие большого разнообразия грамматических форм и правил, не позволяющих выделить некую единую структуру. Так, если мы имеем некий набор правил для языка с жестким порядком слов в предложении (как, например, английский язык), мы не сможем применить его для флективно богатого языка (языки славянской группы). Эти не-

сколько проблем прекрасно иллюстрируют основные вопросы в разработке системы понимания текста. Как описать алгоритм обработки текста, если нет конечного набора правил? Какими средствами описывать и представлять семантику текста? Как адаптировать систему под разные языковые группы? Ответов на эти вопросы мы не получили до сих пор – для подтверждения этого достаточно посмотреть на результаты работы систем автоматического перевода, явно далеких от идеала. Рынок систем синтеза текста представлен же по большей части западными англоязычными разработками, слабо применимыми для других языков. Поэтому исследования в области автоматической обработки текста не теряют свою актуальность до сих пор. В этой работе осуществлена попытка проанализировать состояние вопроса о генерации текстов в этой области на данный момент.

Постановка проблемы. Говоря именно об интеллектуальных системах автоматической обработки текста, мы сталкиваемся с несколькими научными вопросами. Алгоритмические проблемы связаны с необходимостью выбора аппарата описания и реализации ЕЯ на уровне и в форме, доступной машине. Лингвистические проблемы связаны напрямую со свойствами языка - его непостоянностью и неоднородностью правил его описания. Кроме того, говоря о языке как об объекте моделирования, встает вопрос об оценке полученных результатов - недостаточно просто получить текст, необходим глубокий оценочный анализ результатов работы системы. Ведь ЕЯ это не просто набор слов, связанный грамматическими правилами - приоритетной задачей является получение именно осмысленного текста, что, в свою очередь, приводит многих разработчиков к необходимости учета семантических связей не только между отдельными словами, но и между предложениями и даже между документами. С этой точки зрения, наиболее сложной и интересной является именно генерация новых текстов, реализация которой будет наиболее полно учитывать все важные смысловые связи в документе (или игнорировать не значимые). Менее очевидной сложностью является разрыв между лингвистическими описанием языка и его прикладной реализацией. Лингвистика ориентируется в первую очередь на описание природы языка как своего объекта, манипулируя, зачастую, понятиями из психологии, философии, антропологии и подобным, недостаточно формализованным наукам. При реализации систем автоматической

обработки текстов (АОТ) разработчики, используя инструменты компьютерной науки, вынуждены адаптировать их для работы сЕЯ, решая проблемы отнюдь не относящиеся к классической лингвистике. Это и породило такую гибридную область науки как компьютерную лингвистику, объектом которой является уже математическое моделирование ЕЯ.

Помимо всего вышесказанного, необходимо учитывать, что в понятие генерации текста могут входить весьма разнообразные системы. Так, к примеру, автоматическое составление некоторых шаблонных документов (типичный пример - автоматическая документизация программного кода) не может сравниться по сложности и семантическим свойствам с составлением аннотаций и квазирефератов к текстам на ЕЯ, хотя обе системы генерируют на выходе некоторый текст. Поэтому, в рамках этой работы будут рассмотрены, как подходы к созданию систем генерации осмысленных текстов, оперирующих флективно богатой текстовой информацией и некоторыми семантическими данными, так и прикладные разработки, реализующие этим модели.

Цель исследования: Провести анализ и оценку существующих подходов искусственного интеллекта и компьютерной лингвистики к созданию систем автоматической генерации текста с целью определения наилучшего из них по критериям степени реализуемости, адаптивности и интеллектуальности использующих их систем.

Основная часть: В качестве примера рассмотрим системы, подходами к созданию которых являлись три базовых концепции АОТ – генеративные грамматики Хомского, семантическая сеть и инструменты нейронных сетей. Основной проблемой при попытке проанализировать результаты работы и функциональные особенности выбранных методов является отсутствие возможности получить какие-либо их прикладные реализации для славянской группы языков – опираться мы можем только на описание систем их авторами и собственный теоретический анализ.

Первой мы рассмотрим систему синтеза учебных тестов на основе формальных грамматик Хомского, описанную в работе [1]. Несмотря на такие плюсы как возможность быстрой генерации текстов (тестов) и гибкость внедрения, система и подход, описанный Сорокиным С.И не решает проблем, поставленных нами в начале работы.

Для осознания этого, необходимо обратиться к теории и практическому применению генеративной грамматики в целом. Генеративная грамматика отталкивается от предположения о существовании явления языковой компетенции – врожденной способности человека к усвоению и пониманию человеческой речи, независимо от языка. Следуя этому, генеративная грамматика ставит перед собой цель смоделировать эту способность в рамках порождения правильных предложений, используя определенный конечный набор правил, алфавит и начальный символ предложения, из которого, с помощью правил, можно разворачивать бесконечное множество правильных схем построения предложения – непосредственные составляющие.

Границу применения генеративной грамматики подводит Мозговой М.М.: «...грамматики Хомского предназначены, прежде всего, для описания структуры предложения. Не менее важный вопрос описания смыслов отдельных слов остаётся за пределами их возможностей» [2]. Действительно, генеративная грамматика Хомского никогда не выходила за пределы уровня синтаксиса. Первоначальной целью является вывод грамматически правильных предложений из некоторого алфавита, используя цепочки глубинного уровня. И если теоретически мы можем выводить бесконечно большое количество таких цепочек, что, собственно и позволяет описать абсолютно любой ЕЯ, то на практике это не представляется возможным – даже если отбросить такое свойство языка как изменчивость, количество цепочек будет хоть и не бесконечно, но, безусловно, огромно. И чем более выражена флексия в языке – тем сложнее будет его описать.

Это еще одна проблема для грамматик Хомского. Флексия объясняется наличием определенного набора окончаний, которые морфологически и лексически меняют структуры слов, чаще всего – в зависимости от контекста. Чем флективно богаче язык, тем он сложнее, и тем свободнее порядок слов в предложении. Это нас приводит к проблеме языковой зависимости грамматик Хомского – реализация их для английского языка, языка с относительно бедной флексией и жестким порядком слов в предложении – не подходит для славяноязычных систем: «...в грамматиках Хомского порядок слов указывается непосредственно, поэтому проблема линеаризации вообще не возникает. Однако тем самым резко снижается выразительная мощь модели. Для английского языка с его строгим порядком слов в предложении

ограничения метода Хомского не являются критическими, однако при работе с русским языком их уже нельзя игнорировать» [2]. Наконец, взглянем на применение генеративных грамматик: «...задача анализа формального языка (возникающая, например, при компиляции программ на Паскале) не является тривиальной: она была полностью решена лишь в 60-70-е гг. после появления работ Н. Хомского...»[2]. Действительно, основная область использования порождающей грамматики – парсинг языка программирования, где глубинные структуры представлены цепочками формального языка, и грамматическая правильность стоит над смысловой семантикой. Тестовое множество, описанное в работе, задается заранее неким конечным набором правил, и имеет определенное сходство с языком программирования в плане семантических связей. Однако, к таким задачам как автоматический перевод, рубрикация, неограниченная генерация текстов – подход малоприменим: «Остается неясным, как в рамках какой-либо из ветвей генеративной теории превратить некую семантическую сеть в последовательность деревьев зависимостей или составляющих, отвечающих отдельным предложениям»[3].

Следующим шагом развития (или же вспомогательным подходом) АОТ стало появление технологии семантических сетей, применение которых к задаче генерации текста мы оценим на основе системы автоматического консультирования, описанной в работе [4]. Основной задачей, которую ставят перед собой авторы разработки, является генерация базы знаний (БЗ) конкретной предметной области для обеспечения диалога с пользователем по соответствующим ей вопросам. Семантическую сеть предлагается использовать для хранения извлекаемых знаний.

Несмотря на простоту реализации, такой подход имеет массу недостатков, наиболее значимыми из которых является слабая адаптивность системы и тяжелый процесс переопределения БЗ при смене предметной области – в этих случаях, заранее заданные шаблоны могут сработать во вред системы. Кроме того, отсутствует схема принятия решения при поступлении информации, не совпадающей с шаблоном. И это оправдано, поскольку подходы, базирующиеся на синтаксически-лексическом анализе вполне пригодны для относительно простых лингвистических задач, на подобии квазиреферирования или рубрикации с заранее известными рубриками. Однако для нашей за-

дачи автоматической генерации текста, (или ряда других, таких как автоматический перевод) методы остаются неприменимы. Очевидна необходимость наличия в системе некоторого интеллектуального компонента отвечающего за автоматический анализ семантической составляющей текста.

Выходом из этого тупика частично становятся инструменты искусственного интеллекта, а именно – реализация АОТ при помощи нейронных сетей. Искусственные нейронные сети сегодня повсеместно используются для решения различных прикладных задач, в том числе и задач автоматической обработки языка. Чаще всего используются 3 типа сетей: простая рекуррентная сеть для обработки последовательностей, таких как предложения; рекурсивная авто-ассоциативная память для обработки лингвистических структур, представленных в виде деревьев и самоорганизующаяся карта Кохонена для кластеризации таких представлений. Для оценки качества методов нейронных сетей в задаче автоматической генерации текстов обратимся к работе [5], где искусственная рекуррентная сеть используется для создания описаний о товарах некоторого интернет магазина. Результаты работы системы приведены в таблице:

Таблица 1

Результаты работы рекуррентной нейронной сети

Качество звука, удобный интерфейс, очень долго держит заряд. Отзывчивый экран, громкий звонок, крупный шрифт, рабочий день. Приятно лежит в руках, 2 симкарты выручают. Качество сборки, батарея, удобное меню, устойчив к воздействию воды. Явно лидируют, сочный дисплей, качество связи
Аккумулятор, скорость красивая. Дизайн, звук, функционал, масса разных дней хватает. Красив, несколько назад, процессор отзывчивый сенсор. Красивый экран, цветопередача. Дизайн, батарея, не тормозят, практичный.

Как видно, результаты получаются довольно неоднозначные. С одной стороны – безусловными плюсами такого подхода является полная автоматизация процесса генерации текста, высокая степень адаптивности системы, низкие затраты на ее настройку и внедрение. С другой – очевидны некоторые проблемы появления «смыслового мусора», на подобии «скорость красивая, отзывчивый экран, рабочий день». Загвоздка тут состоит в том, что несмотря на кажущееся наличие интеллектуальной обработки, система не понимает смысла того

что генерирует, отталкиваясь лишь от заранее заданных шаблонов. Преодолеть это ограничение можно двумя путями – это усложнение сети, что неизменно приведет нас к потерям в адаптивности и переносимости, или же внедрение дополнительных технологий представления текстовых данных – создание «совмещенных» систем.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Рассмотрев основные подходы к созданию систем АОТ в задаче генерации текста можно сказать, что наиболее перспективным направлением является именно искусственные интеллектуальные алгоритмы (нейронные сети и подобные им). Шаблонные семантические сети и генеративные грамматики применимы к определенному кругу задач (парсинг языка программирования, квазиреферирование), но для интеллектуальной генерации текста они слабо применимы. Однако на нейронные сети накладывается ограничение при попытке осознать и оценить обрабатываемую информацию, связанное с их ориентированностью на грамматическую структуру предложения или слова. Выходом из этой ситуации может стать соединение возможностей нейронных сетей (или иных алгоритмов, способных к автоматическому обучению и развитию) с инструментами альтернативной теории моделирования языка - моделью Мельчука – «Теория Смысл ↔ Текст» (ТСТ)[6]. ТСТ отделяет семантику от синтаксиса, настаивая при этом на ее научном описании. По разным причинам, (от политических до экономических) модель не получила широкого распространения на западе, оставшись в «информационном вакууме» постсоветского пространства. Тем не менее, многие ученые характеризуют ее как опередившую свое время. Все чаще звучат утверждения, что грамматикам составляющих только предстоит эволюционировать в некоторые парадигмы ТСТ[3]. Чтобы разобраться в проблематике ТСТ, нам необходимо оценить ее структуру, разработанную для автоматизации переводов с точки зрения задачи генерации текста, что даст нам основные плюсы и минусы модели в прикладной реализации.

Первым, безусловным полюсом, является высокая степень ориентированности на синтез текста. И.А. Большаков отмечает, что «...насколько нам известно, синтез текста по произвольно заданной семантической сети серьезно продумывался именно в рамках модели ТСТ...»[3]. Задача синтеза текста, в отличие от задачи его анализа, требует описание глубинных семантических отношений (сферхфразо-

вые отношения), которые, как отмечалось выше, в грамматиках Хомского просто не учитываются. Лексико-семантические правила расширенных генеративных теорий направлены на решения грамматических неоднозначностей, и не могут решать задачу синтеза. Особенно чувствуется несовершенство грамматики составляющих при попытке синтезировать язык со свободным порядком слов, где грамматика неоднозначна, а в качестве опоры используются смысловые единицы. Это приводит нас ко второму плюсу модели ТСТ – независимость от порядка следования слов в предложении. Действительно, зная семантику предложения, нам не обязательно опускаться до синтаксического уровня, что дает нам возможность обойти свободный порядок слов: «основное преимущество грамматик зависимостей усматривается в том, что именно связи между (полнозначными) словами сохраняются на семантическом уровне, а для грамматик составляющих их обычно приходится выявлять на семантическом уровне отдельным механизмом»[3]. Такой подход дает возможность реализовать формальную модель языка для всей индоевропейской группы, а не только для английского, где порядок следования отыгрывает ключевую роль. Эти факты говорят о преимуществе грамматик зависимостей перед грамматиками составляющих в задачах синтеза текста.

Главным минусом ТСТ является толково-комбинаторный словарь, базирующийся на механизме сем. Это подразумевает, что для каждой семы будет описан полный набор ее свойств (в специальной статье) – от лексических и морфологических до таких высоких семантических уровней как связанные идиомы. Необходимость составления полного словаря (в оригинальном виде) возможна только вручную – в случае анализа неизвестного слова мы не сможем выбрать сценарий поведения системы, основанной на ТСТ. Это связано с тем, что структура статьи является слишком сложной: при возможности автоматического выбора морфологических признаков с некоторой, допустимой ошибкой, остальные пункты, как например идиомы, заполнить автоматически без специальных семантических знаний невозможно. И даже если говорить о выявлении идиом как коллокативных сочетаний или N-грамм, то для описания всего ЕЯ придется использовать настолько большой корпус, механизмов навигации по которому еще просто не разработано. Эта проблема является следствием из свойства изменчивости ЕЯ – даже если подобный корпус со-

ставлен, то нам нужна система его непрерывного пополнения. Если же действовать на неразмеченном информационном пространстве, как например интернет, мы столкнёмся с ростом знаний в геометрической прогрессии, причем по большей части – с дублированной семантикой данных (из-за свойства вариативности такого пространства). Доверить же составление статей оператору-человеку является довольно сложной массовой задачей. «Технология составления толково-комбинаторных словарей осталась не разработанной. Их составление оказывается до сих пор под силу только тем, кто осваивал модель много лет, а по существу создавал и совершенствовал ее. Вероятно, именно отсутствие ясной и массовой технологии разработки словарей явилось одной из основных исторических причин отставания модели от западных «конкурентов»...»[3]. Однако, даже несмотря на вышеуказанные минусы, ТСТ является более удобной для разработки системы синтеза текста, чем грамматически-ориентированные модели. Используя механизмы искусственного компьютерного интеллекта, имеющие возможности оперировать не грамматическими единицами, а семантическими элементами, возможно добиться высоких результатов, как например, в системах Н.Н. Леонтьевой [7], ориентированных на компьютерный перевод. С точки зрения генерации текста, пока ТСТ не рассматривалась, хотя, как видно из вышесказанного, ее применение в этой области более чем оправдано.

ЛИТЕРАТУРА

1. Швецов А.Н., Сорокин С.И., Мамадкулов Ю.О. - Система синтеза учебных тестов на основе формальных грамматик // НИИ «Центр программистов» - журнал «Программные продукты и системы», №2(102), 2013, с 181-185.
2. Мозговой Максим Владимирович // Машинный семантический анализ русского языка и его применения // Санкт-Петербург – 2006г.
3. I.A. Bolshakov, A.F. Gelbukh. // The Meaning ↔ Text Model: Thirty Years After. J. // International Forum on Information and Documentation, FID 519, ISSN 0304-9701, N 1, 2000.
4. Гурин Н.И., Жук Я.А. - Семантическая сеть электронного учебника для диалога с виртуальным преподавателем // Материалы международной научно-технической интернет конференции "Информационные технологии в образовании, науке и производстве" // Белорусский государственный технологический университет, Минск, 2015 г.
5. Тарасов Д.С. - Генерация естественного языка, парафраз и автоматическое обобщение отзывов пользователей с помощью рекуррентных нейронных сетей // «Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии», №14(том 1), 2015, с 607-614 // Материалы международной конференции «Диалог», 2015 г.
6. Мельчук И.А. Опыт теории лингвистических моделей «Смысл ↔ Текст». – 2-е издание, доп. – М. 1999.
7. Н.Н. Леонтьева // Автоматическое понимание текстов: Системы, модели, ресурсы. // Москва – 2006 г.

Т.В. Шулькевич, Ю.М. Селін

ПРОБЛЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ НЕГАТИВНИХ ПРОЦЕСІВ РІЗНОЇ ПРИРОДИ

Анотація. В статті розглядається питання аналізу показника «якості життя» в якості основного критерію соціально-економічного розвитку суспільства та чинники що впливають на його формування. Аналізуються економічні та екологічні складники, що можуть негативно вплинути на рівень якості життя. Робиться висновок щодо необхідності розробки математичного апарату для одночасного прогнозування економічних та екологічних процесів для запобігання погіршення рівня життя.

У другій половині ХХ століття людство прийшло до розуміння про потужність економіки, яка перетворилася з творчої сили в руйнівну. Стало зрозуміло, що ресурси природи не безмежні, її здатність до самовідновлення найближчим часом може бути вичерпана, і людству загрожує глобальна криза – соціально-політична, економічна і екологічна.

Ще в 20 - 30-х роках ХХ століття видатний академік В.І. Вернадський прийшов до висновку, що люди повинні прийняти на себе відповідальність за майбутній розвиток природи. За його словами, під впливом наукової думки і людської праці біосфера переходить в новий стан - в ноосферу. Але тільки лише в 70-і роки ХХ століття, коли різко загострилися екологічні проблеми, постало завдання осмислення ситуації, що склалася і розробки принципово нових концепцій розвитку у всесвітньому масштабі.

Одночасно, сучасні відносини людини і природи можна було охарактеризувати як антропогенний екоцид - руйнування людьми природного місця існування, в тому числі і умов власного існування. Це і перетворення колись родючих ґрунтів в безплідні пустки. Це і забруднення Світового океану. Це і скорочення площ тропічних лісів, які поряд з північною тайгою є легеням планети. Все це призводить до незворотних змін середовища проживання, і в кінцевому підсумку

вона може виявитися непридатною для життя сучасної людини і подальшого розвитку цивілізації. До зміни і руйнування природних екосистем додалося сильне промислове забруднення.

Всі ці екологічні проблеми певною мірою були породжені відставанням економічної думки. Аж до середини ХХ століття вчені не надавали значення екологічним обмеженням в економічному розвитку. Природа розглядалася як якась нескінченна комора, багатства якої треба лише вчасно виявляти і експлуатувати. У світі панував техногенний тип розвитку, характерними рисами якого є швидке виснаження невідтворюваних видів природних ресурсів (корисних копалин) і експлуатація відтворюваних (ґрунт, ліси та ін.) зі швидкістю, яка перевищує можливості їх відновлення. У гонитві за кількісними показниками економіка не враховувала проблеми майбутнього, інтереси наступних поколінь людей.

Все це відбивається на якості життя суспільства.

Починаючи з 30-х років 20ст. економічна наука почала обраховувати конкретні макроекономічні показники, що відображали рівень розвитку держави. Так в 1937 році було введено термін «валовий внутрішній продукт»(ВВП). Пізніше – «ВВП перерахований на душу населення». Ще пізніше «з урахуванням паритету купівельної спроможності».

Але в 2009 році Нобелівські лауреати Джозеф Стиглиц та АмартияСен оприлюднили доповідь, в якому обґрунтовано використання показника якості життя в якості основного критерію економічного розвитку суспільства замість ВВП [1].

Доповідь підкреслювала «У багатьох випадках статистика ВВП створює враження, що економічне становище поліпшується, в той час як більшість громадян на своєму повсякденному досвіді цього не відчують. Крім того, зосередженість на зростанні ВВП призводить до протиріччя. Політичні лідери бачать своє завдання в стимулюванні економічного зростання. Але одночасно з цим громадяни вимагають від них і боротьби із забрудненістю повітря, говорять про необхідність зниження рівня шуму і підвищення якості води. Тим часом заходи, спрямовані на ці цілі, можуть призвести до зниження зростання ВВП.»

Таким чином можна стверджувати, що рівень ВВП не завжди впливає на якість життя.

Поняття «якість життя» визначають як узагальнюючу соціально-економічну категорію, що представляє узагальнення поняття "рівень життя", включає в себе не тільки рівень споживання матеріальних благ і послуг, але і задоволення духовних потреб, здоров'я, тривалість життя, умови середовища, що оточує людину, морально-психологічний клімат, душевний комфорт.[2]

Ключова думка доповіді – це необхідність впоратися відразу з двома кризами - економічною і кліматичною, які суттєво впливають на якість життя, і, як наслідок, ставить перед нами питання: чи дає наявна статистика правильні сигнали, що дозволяють приймати потрібні сьогодні рішення?

До цього часу і екологічна наука, так само як і економічна, вже активно використовували розвинений математичний апарат для прогнозування розвитку відповідних процесів.

Коротко оглянемо сучасні методи прогнозування відповідних процесів.

Економічна складова. Економікою людство займається останні кілька сотен років, За цей час економічна наука пройшла великий шлях в розвитку як власне наука, так и в розвитку математичного апарату щодо аналізу та прогнозування економічних процесів.

Не буде перебільшенням сказати, що понад 90% публікацій з прогнозування базуються на часових рядах економічних показників. Такі показники прогнозують на основі використання часових рядів однієї змінної – авторегресії, авторегресії з ковзним середнім (АРКС), АРКС з трендом й т. ін. Також прогнозують на основі використання часових рядів декількох змінних (векторні регресори), коли прогнозована змінна залежить від декількох регресорів або екзогенних змінних у правій частині рівняння. Однак практика засвідчує, що одного, навіть досить універсального методу недостатньо для досягнення повного аналізу процесу. Так, коректний аналіз гетероскедастичних процесів (процеси із змінною в часі дисперсією) вимагає застосування моделей спеціальної структури для описання умовної дисперсії, що не забезпечує метод групового врахування аргументів (МГВА), який, наряду з нечіткими нейромережами, можна назвати відносно «універсальним» методом моделювання та прогнозування.

У спеціальній літературі є класифікації математичних моделей за різними критеріями, в яких виділено багато класів та підкласів

моделей. Наприклад математичні моделі можна будувати на основі рівнянь різних типів: різницевих, алгебраїчних, диференціальних. Математичні моделі можна розділити на два широких класи: аналітичні, що описують вибрані зміни процесу (зазвичай такі моделі відтворюють один з аспектів функціонування процесу чи об'єкта, наприклад динаміку ВВП); імітаційні, що докладно відтворюють поточне функціонування процесу у вибраному масштабі часу. Такі моделі нагадують активний фізичний експеримент з використанням фактичних даних, отриманих безпосередньо з процесу. [3]

Самі по собі часові ряди економічних показників можуть бути стаціонарними та нестаціонарними, нелінійними.

Навіть з такого короткого, спрощеного аналізу часових рядів економічних показників стає зрозумілим різноманіття моделей для прогнозування процесів економічного виду.

Екологічна складова. З огляду літератури [4] можна виділити три основних напрямки і, відповідно, три методологічних підходи до математичного моделювання динаміки екологічних процесів різнотипної природи — напрямок, що складається із динаміко-чисельних підходів, які базуються на чисельних методах розв'язання різних видів диференціальних рівнянь, що описують фундаментальні фізичні залежності, а також атмосферних і гідродинамічних процесів. Вони орієнтовані на рішення таких основних задач найважливіших динамічних просторово-часових закономірностей поточних природних процесів:

- виявлення поточних просторово-часових взаємозв'язків між різними атмосферними процесами в динаміці спостережень;
- формування моделей природних процесів для прогнозування динаміки їхнього розвитку.

Другий напрямок, що містить емпіричні динаміко-статистичні підходи, які базуються на використанні багаторічних статистичних даних натурних вимірів, має міжнародна система аналізу і прогнозу складників екологічної системи. Вони орієнтовані на виявлення фундаментальних просторово-часових закономірностей, характерних для атмосферних процесів протягом десятиліть. Основною метою цих підходів є, власне кажучи, установлення на основі багаторічних статистичних даних глибоких просторово-часових кореляційних зв'язків між різними природними процесами. У залежності від цілей дослі-

дження побудову математичного апарату аналізу динаміки екологічно небезпечних процесів доцільно виконувати на основі ідей як динаміко-чисельних, так і динаміко-статистичних підходів, але з урахуванням специфічних особливостей і властивостей цих процесів.

Третій клас процесів неможливо моделювати за допомогою динаміко-чисельних методів, а через відсутність певної періодичності (добової, місячної, річної, або іншої сталої періодичності) їх важко описувати за допомогою емпірико-статистичних методів. Це, наприклад, так звані екологічно-небезпечні процеси. Процеси, що можуть швидко змінювати свій фазовий стан. Відзначимо, що з точки зору математики, такі процеси є нелінійними та нестаціонарними.

Дані властивості й особливості визначають практичну необхідність дослідження всього різноманіття властивостей, взаємозв'язків, взаємодій, взаємозалежностей різнорідних факторів і причин екологічно-небезпечних процесів (таких, що можуть різко погіршити якість життя) на основі єдиного підходу з позиції досягнення єдиної визначальної мети керування і контролю екологічної обстановки — своєчасного запобігання і (або) мінімізації небажаних наслідків. Разом з тим, аналіз показує, що в даний час різні види природних і техногенних екологічних процесів, їх причини, протікання, наслідки й область дії досліджуються окремо, без урахування взаємозв'язків, взаємозалежностей, взаємодії. Відзначимо, що з точки зору математики, такі процеси є нелінійними та нестаціонарними.

Сучасна наука визначає якість життя як сукупність показників, що відображають умови життя людини. [5]

Вони можуть бути класифіковані в такий спосіб:

- Вартісні показники: національний дохід; ВВП на душу населення; реальні доходи населення; оплата праці, пенсії, заощадження; рівень роздрібних цін; тарифи на платні послуги і т. п.;

- Натуральні показники: забезпеченість населення житлом, предметами тривалого користування;

- Показники, що характеризують розвиток галузей невиробничої сфери;

- Показники, що виражаються в тимчасовій формі: тривалість робочого дня, тижня; тривалість і використання позаробочого і вільного часу;

- Соціально-демографічні показники: народжуваність, тривалість життя, природний приріст, міграція і т. ін.;
- Показники, що характеризують стан і охорону навколишнього середовища;
- Показники і нормативи соціального обслуговування і соціального забезпечення населення.

Таким чином, в широкому розумінні якість життя - це сукупність об'єктивних і суб'єктивних умов та факторів, що впливають на людську діяльність у процесі функціонування певних соціально-економічних відносин. Ці відносини змінюються і удосконалюються в ході розвитку матеріального виробництва, перетворення соціального середовища.

Можна констатувати, що якість життя - це складна система взаємодії зовнішніх по відношенню до людини умов життя і суб'єктивних факторів, що характеризують людину і що виражаються в її економічній, соціальній і демографічній поведінці.

І, якщо показники росту якості життя мають консервативний, квазістаціонарний характер, то показники, що ведуть до погіршення, мають, зазвичай, цілком швидкоплинний характер. Бо повільне падіння об'єктивних значень негативних показників може не привести до падіння самого рівня якості життя, а термінове, швидке спадання тих самих показників приводить до суттєвого погіршення рівня якості життя.

До таких швидкоплинних процесів, що можуть негативно вплинути на рівень якості життя можна віднести несподівані природні лиха, швидке погіршення економічних показників, раптова зміна епідеміологічної ситуації, спалах криміногенної активності, різке погіршення соціальної ситуації тощо.

Загалом, небезпека — це негативна властивість матерії, яка проявляється у здатності її завдавати шкоди певним елементам Всесвіту, потенційне джерело шкоди. Якщо мова йде про небезпеку для людини, то це явища, процеси, об'єкти, властивості, здатні за певних умов завдавати шкоди здоров'ю чи життю людини або системам, що забезпечують життєдіяльність людей, і негативно впливають на якість життя.

З цього короткого огляду двох чинників, що можуть негативно вплинути на якість життя, стає зрозумілим необхідність розробки

уніфікованого математичного апарату для одночасного прогнозування цих процесів. І, якщо економічні та екологічні процеси мають об'єктивні часові числові показники, то квантифікування соціальних процесів, через їхню специфіку носить радше суб'єктивний характер.

В Україні система показників для оцінки рівня життя населення використовується при плануванні ісоціально-економічного розвитку. Серед офіційно прийнятих та найбільш використовуваних є методика, що заснована лише на системі соціально-економічних індикаторів без врахування екологічної складової [6].

Всі ці процеси мають різну природу, всі вони мають різні причини, всі вони мають різний механізм протікання. Всі вони можуть проявлятися як самостійно, окремо один від одного, так в ланцюзі з іншими процесами. У такому випадку, можна говорити, що вони тісно взаємопов'язані між собою. Але всі ці процеси мають однакові риси:

- різноманітність і різнотипність причин та факторів, а також дії, які призводять до їх виникнення;

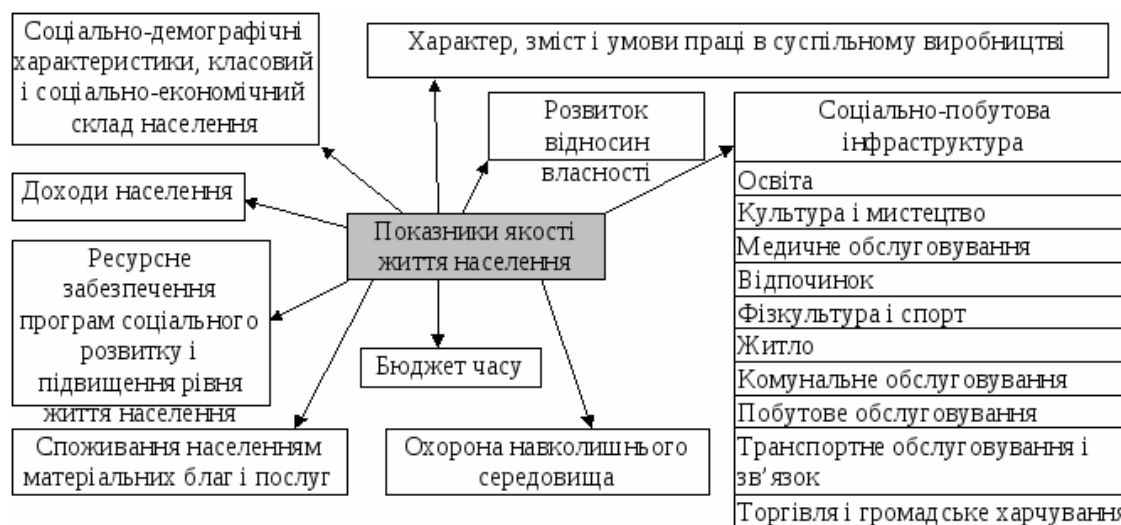


Рисунок 1 - Показники системи якості [7]

- просторова розподіленість умов виникнення, невизначеність у часі та просторі динаміки розвитку та регіонів їх впливу;
- нестационарність властивостей і невизначеність їх характеристик.

Але всі ці процеси тісно пов'язані. Економічні процеси (особливо негативні) можуть впливати на екологічні і соціальні, так само

соціальні процеси залежать від екологічних і навпаки, соціальні процеси можуть впливати як на екологічні, так і на соціальні [8].

На жаль фахівці з прогнозування економічних показників не прогнозують екологічні і навпаки, фахівці з прогнозування екологічних процесів не прогнозують економічні. Не в останню чергу це залежить від несхожого математичного апарату прогнозування відповідних процесів.

Висновки. Таким чином можна стверджувати, що прогнозування економічних та екологічних процесів може дати в результаті прогнозування негативних процесів, пов'язаних з якістю життя. Зі всього вищевикладеного стає зрозумілим необхідність розробки математичного апарату для одночасного прогнозування економічних та екологічних процесів для запобігання погіршення рівня життя. Нагадаємо, що мова йдеться про оперативний прогноз на короткий строк.

ЛІТЕРАТУРА

1. Documents dusitedela "Commissionsurla Mesuredela Performance conomi- queetdu Progris Social" [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://www.insee.fr/fr/publications-et-services>, вільний. – Загол. з екрана. – Мова франц.
2. Райзберг Б.А. Современный экономический словарь. [Текст]: Словарь/ Райзберг Б.А., Лозовский Л.Ш., Стародубцева Е.Б.— 2-е изд., испр., М.: ИНФРА-М, 1999.— 479 с..
3. Бідюк П.І. Аналіз часових рядів. [Текст] / П.І. Бідюк, В.Д. Романенко, О.Л. Тимошук.//Навчальний посібник –К. : НТУУ «КПІ», 2013. – 600с.
4. Селін Ю.М. Системний аналіз екологічно небезпечних процесів різної природи. [Текст] / Селін Ю.М. // Системні дослідження та інформаційні технології, 2007, № 2. – С. 22-32
5. Румянцева Е.Е. Новая экономическая энциклопедия. [Текст] / Румянцева Е.Е. — М. : Инфра-М, 2005. -- 826с.
6. Статистичний щорічник України за 2007 рік/Державний комітет статистики України ; під ред. О.Г. Осауленка — К.:Консультант, 2008. — 650 с.
7. Октябрьский, П. Я. Уровень жизни населения в показателях отечественной и зарубежной статистики / П. Я. Октябрьский // Компаративистика: альманах сравнительных социогуманитарных исследований. - СПб.: Социол. о-во им. М. М. Ковалевского, 2001
8. Pankratova N.D., Bidyuk P.I., Selin Y. M., Savchenko I.O., Malafeeva L.Y., Makukha M.P., Savastyanov V.V. Foresight and Forecast for Prevention, Mitigation and Recovering after Social, Technical and Environmental Disasters //Improving Disasters Resilience and Mitigation – IT Means and Tools. Springer, 2014. – P.119-134.

В.Я. Данилов, А.В. Слюсар, О.А. Гусев

ВЕЙВЛЕТ АНАЛІЗ РЯДІВ ВАЛЮТНИХ КОТИРУВАНЬ

Анотація. Належним чином спроектовані алгоритми для аналізу рядів валютних котирувань виявлення хвиль Елліотта і подальшого прогнозування поведінки фінансових ринків надають можливість передбачити стан економіки. Це приводить до підвищення якості розроблюваних моделей та оцінок прогнозів.

Головна мета дослідження: розробити індикатор на основі вейвлет перетворення, який дозволить виділяти та досліджувати хвилі Елліотта.

Основними результатами дослідження є такі: створення індикатора, який дозволяє виділяти хвилі Елліотта на часовому ряді; наведено алгоритм поетапного дослідження.

Ключові слова: Вейвлет-аналіз, хвилі Елліотта, показник Херста, показник MACD, кепстр.

Вступ. В глобальній економіці періоди рецесій і зростань переживаються, тому аналіз передвісників є важливою проблемою [1]. Тому аналіз часових рядів валютного котирування є актуальним. Однією з найбільш ґрунтовних праць в області аналізу економічних тенденцій є так званий хвильовий аналіз Елліотта.

В даний час використання вейвлет-перетворень для аналізу фінансового ринку є обмеженим. Першою спробою використання вейвлет-перетворення для аналізу фінансових часових рядів було дослідження вчених університету міста Орхус, Данія [3]. У цій статті запропоновано використання дискретного вейвлет-перетворення лише для фільтрації високих частот та згладжування графіку.

Метою даної роботи є створення нового індикатора на основі вейвлет-перетворень.

Аналіз структури хвиль Елліотта. Для теорії Елліотта було проведено дослідження стосовно виду та логічного опису структур хвиль [4]. Основою теорії хвиль Елліотта є три поняття: модель, співвідношення і час. В дещо спрощеному вигляді основний постулат

теорії свідчить: фондовий ринок підпорядковується повторюваному ритму - п'ять хвиль зростання, три хвилі падіння [4].

П'ять хвиль (рис. 1), що складають фазу зростання, на малюнку пронумеровані. Висхідні хвилі (1, 3, 5) називають імпульсними хвилями.

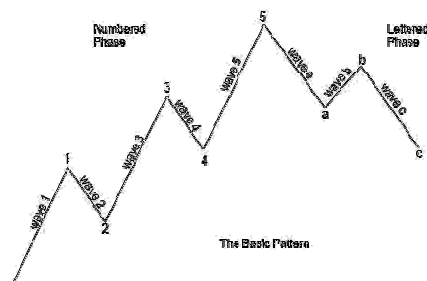


Рисунок 1 - Класичний приклад одного повного циклу хвилі Елліотта у фазі зростання

Спадні хвилі 2 і 4 розвиваються в протилежну тенденцію напрямку. Їх називають коригуючими хвилями, так як вони вносять поправки в рух хвиль 1 і 3. Після того як зростання, що складається з п'яти хвиль, завершується, починається трьоххвильове коригування. Три коригувальні хвилі позначені на малюнку буквами "a" "b" і "c". Також Елліоттом були задані наступні жорсткі правила щодо виявлення хвиль:

1. Хвиля 2 не може опуститися нижче початку хвилі 1
2. Хвиля 3 не може бути найменшою з імпульсних 1, 3 і 5
3. Хвиля 4 не може перетнутися з хвилею 1 по осі Y
4. Хвилі a, b, c не опускаються нижче початку хвилі 5

Крім того, хвилі Елліотта мають фрактальну структуру (рис. 2), а залежність наступної ланки від попередньої визначається за допомогою рівнів Фібоначчі [2].

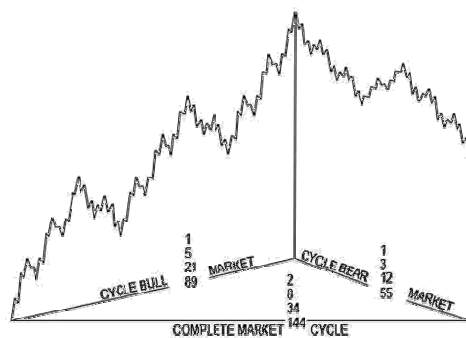


Рисунок 2 - Зразок повного цикл хвилі Елліотта до фондового ринку

Вейвлет-аналіз хвиль Елліотта. Усі вейвлет-перетворення розглядають функцію (взяту як функцією від часу) у термінах коливань, локалізованих за часом (простором) і частотою.

В нашому дослідженні використовувалися вейвлети Хаара, Добеши та Койфлет. Далі було застосовано вейвлети в двох випадків: після розбиття на інтервали зростання сталого тренду та без попередньої обробки. Оскільки вейвлети краще опрацьовують виділенні хвилі було виконане попереднє розбиття на основі показників Херста та MACD. Також було проведено порівняння результатів роботи вейвлетів для всього часового ряду.

Вейвлет Добеши краще фільтрує високі частоти та зберігає загальну поведінку хвилі при перетворенні менших хвиль, що взяті на основі показника Херста. Тому вейвлет Добеши краще використовувати при фільтрації хвиль Елліотта.

Приклад застосування методики для виділення хвиль Елліотта. Використовуючи класичний технічний аналіз [4], в часовому ряді валютного котирування виявлено класичну хвилю Елліотта. Як правило (рис. 3), хвиля Елліотта проявляється розмито(нечітко), тому для її виявлення запропоновано використання наступного алгоритму. До опису кроків алгоритму додано приклад його роботи на фінансовому ринку валютних котирувань американський долар/євро за 2003-2004 роки.

Крок 1. Для очищення часового ряду від “білого шуму”, використовується індикатор для первинного згладжування даних. У нашому дослідженні використано технічний індикатор MACD, що потрібен для знаходження сили і напрямку тренду. При цьому на часових рядах з поденною деталізацією даних рекомендується [5] користуватися різницею між 12-денним та 26-денним експоненційним ковзним середнім.

Крім того, досліджується можливість використання показника Херста, що є індикатором персистентності ряду [6].

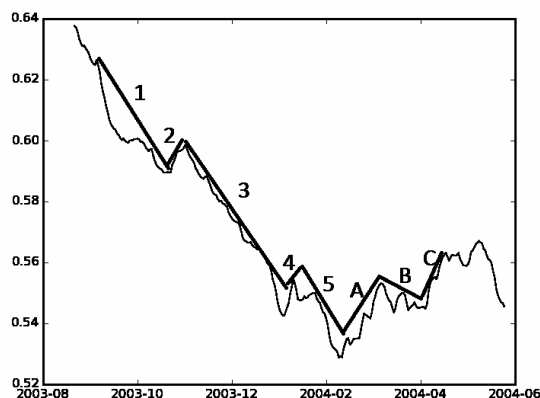


Рисунок 3 - Фактично виявлена хвиля Елліотта на графіку, де ланки 1-5 є імпульсом на спадання, а ланки а-с - їх корекцією

Крок 2. Після обробки часового ряду одним із індикаторів отримуємо згладжений ряд за показником MACD або Херста (рис. 4), на якому вже детальніше видно ланки хвиль Елліотта.

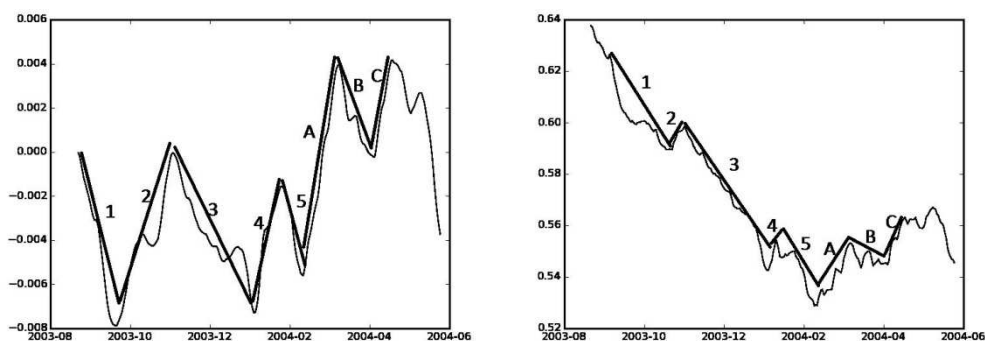


Рисунок 4 - Положення ланок хвилі Елліотта на графіку після застосування MACD та показника Херста

Оброблені за допомогою показників дані розбиваються на області зі зростаючою та спадаючою тенденцією. У контексті MACD зміна тенденції означала перетин індикатором нульового значення, у контексті показника Херста це означало перетин індикатором значення 0,5.

Крок 3. До кожної з виділених областей застосовується дискретне вейвлет-перетворення [7] із використанням одного із вейвлетів класичного набору (вейвлет Хаара(рис. 5), Добеші(рис. 6), Койфлет(рис. 7)).

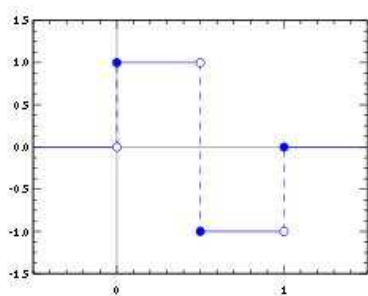


Рисунок 5 - Вейвлет Хаара



Рисунок 6 - Вейвлет Добеши

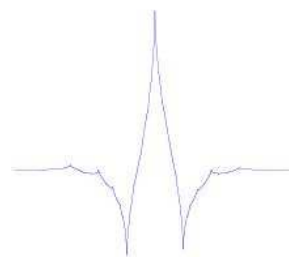


Рисунок 7 - Вейвлет Койфлет

Крок 4. Отримані за допомогою вейвлет-перетворення частоти пропускаються через фільтр (рис. 8) високих і низьких частот, вибираються лише низькі частоти. Побудований таким чином “низькочастотний” графік (рис. 9) і є новим індикатором, який дозволяє чітко виявлення хвиль Елліотта.

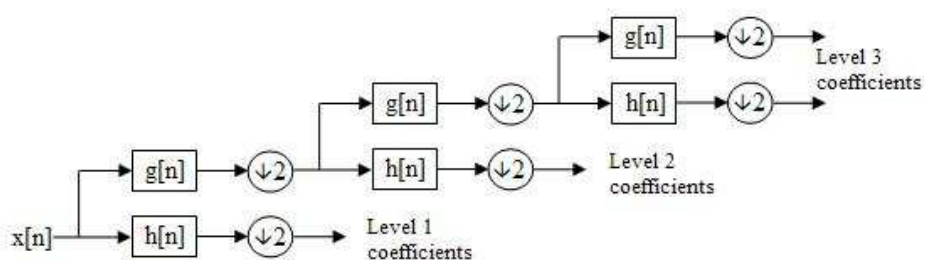


Рисунок 8 - Гребінка фільтрів високих і низьких частот

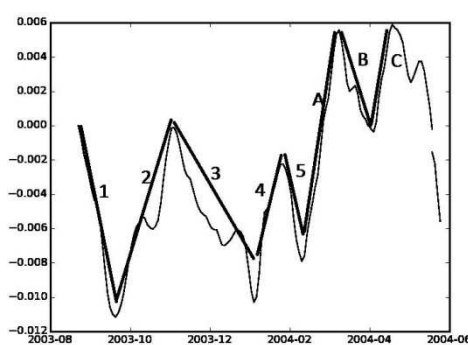
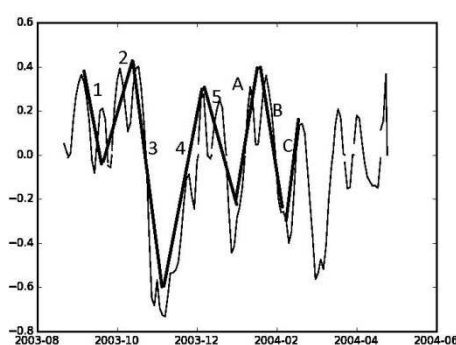


Рисунок 9 - Положення ланок хвилі Елліотта на графіку після застосування вейвлет-перетворення для показника MACD та Херста

Крок 5. До відфільтрованого графіка застосуємо неперервне вейвлет-перетворення. На отриманому спектрі (рис. 10) виділяються всі

функціональні складові з циклічним характером, що дозволяє виявити можливу хвилю Елліотта.

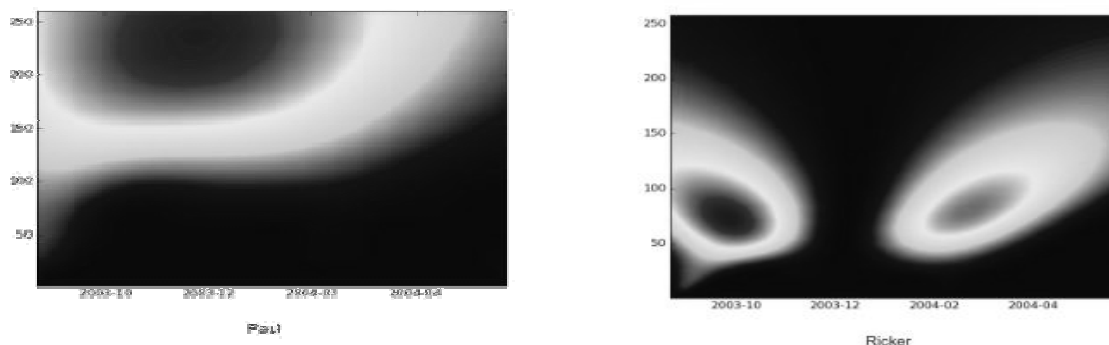


Рисунок 10 - Спектр вейвлет-перетворення вейвлета Pauli та вейвлета Ricker

Також для виділення хвиль Елліотта використовується Wave-вейвлет, який виходить як перша похідна від функції Гаусса. За допомогою цього вейвлета виділяється точний початок циклу хвиль Елліотта(рис. 11).

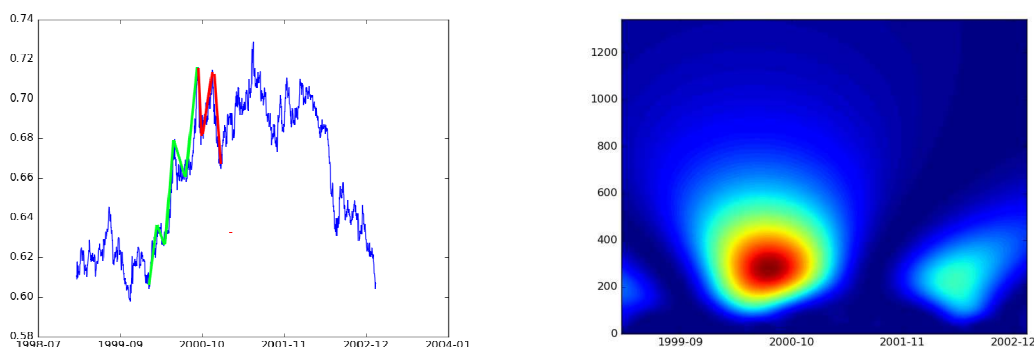


Рисунок 11 - Виділення хвилі Елліотта за допомогою Wave-вейвлета

Висновки. У роботі було розглянуто класичний підхід до аналізу часових рядів валютних котирувань, виявлення хвиль Елліотта та створено новий індикатор(кроки 1-5) чіткого виявлення хвиль Елліотта(у порівнянні з аналізом вихідного графіку котирувань). На прикладі валютних котирувань показано виділення історичної хвилі Елліотта на спектрі створеного індикатору. Запропонований індикатор в подальшому пропонується вдосконалити для використання у існуючих методах виділення хвиль Елліотта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тарабрина М.Е. Самоорганизация в сфере экономики // Вестник Бурятского государственного университета, 2010, № 6, с. 77-80.
2. Razaqzada F. The Ultimate Fibonacci Guide— London: Fxstreet, 2010. — 5 с.
3. C. Tan Financial Time Series Forecasting Using Improved Wavelet Neural Network: дис. ... канд. комп. наук: 6.050101. — Arhus, Denmark, 2009. — 113 с.
4. Джозеф Т. Упрощенный Анализ Волны Эллиота. — Санкт-Петербург: Литера, 2012. — 80 с.
5. S. B. Achelis. Technical Analysis from A to Z. — Probus: Probus Pub, 1995. — 80 с.
6. Калуж Ю. А., Логинов В. М. Показатель Хёрста и его скрытые свойства. // Сибирский журнал индустриальной математики, 2002, №5:4. с. 29-37.
7. Короновский А. А., Храмов А.Е. Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. — Москва: Физматлит, 2003. — 158 с.
8. H. J. Nussbaumer Fast Fourier Transform and Convolution Algorithms. — London: Springer, 1982. — 240 с.
9. Roads C. The computer music tutorial. — Boston: The MIT Press, 1996. — 1256 с.
10. P. Bloomfield Fourier Analysis of Time Series: An Introduction. — Boston: The MIT Press, 2014. — 288 с.

УДК 622.788

О.Ю. Худяков, М.М. Бойко, Н.В. Полякова, В.І. Петренко,

С.В. Ващенко, К.В. Баюл

РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОГРУДКУВАННЯ АГЛОМЕРАЦІЙНИХ ШИХТ

Анотація. У статті представлені результати дослідження сукупного впливу еквівалентного діаметра і коефіцієнта варіації крупності гранул шихти на порізність шару. Вперше запропоновано новий структурний показник, який може бути використаний при оцінці підготовленості шихт до спікання. Розроблено рекомендації щодо підвищення ефективності огрудкування агломераційних шихт.

Ключові слова: огрудкування агломераційної шихти, еквівалентний діаметр, коефіцієнт варіації крупності, порізність, структурний показник.

Проблема і її зв'язок з науковими і практичними задачами

На сьогоднішній день значна частина сировинної бази чорної металургії утворена концентратами збагачення і дрібнофракційними промисловими відходами, які потребують ефективного окускування [1].

З трьох промислово застосовуваних способів окускування залізорудної сировини (агломерація, виробництво обкотишів і брикетування) найбільшого поширення набув перший. Частка агломерату в шихті доменних печей становить 80% і більше [2]. Залізорудний агломерат в найбільшій мірі відповідає комплексу вимог, що пред'являються до доменної сировини [3], але, у зв'язку з обмеженою ефективністю процесу огрудкування аглошихти перед спіканням, даний спосіб не дозволяє переробляти шихту, залізорудна частина якої повністю складається з дрібнодисперсних матеріалів. Тому у сучасному агломераційному процесі широке застосування знаходять методи посиленої підготовки шихти до спікання [4]. Для вдосконалення цих

© Худяков О.Ю., Бойко М.М., Полякова Н.В., Петренко В.І.,
Ващенко С.В., Баюл К.В., 2016

методів суттєве значення має визначення та використання показників оцінки підготовленості огрудкованої шихти до спікання.

Аналіз досліджень і публікацій

Оскільки огрудкування формує гранулометричний склад шихти і таким чином впливає на структуру її шару, то для оцінки та підвищення ефективності огрудкування необхідне визначення і використання відповідних структурних показників. Детальний опис структури шару, з урахуванням всіх характеристик часток і порових каналів виправданий при вирішенні вузькоспеціалізованих завдань, наприклад, при визначенні сумарної площі контакту частинок в шарі і т.п. Використання коефіцієнтів газодинамічного опору, що входять в основні рівняння руху газів в шарі вимагає проведення значної кількості трудомістких експериментальних вимірювань [5,6].

Постановка завдання

Метою даного дослідження є визначення зручних у розрахунку показників оцінки підготовленості шихти до агломерації та застосування їх для підвищення ефективності процесу огрудкування.

Виклад матеріалу й результати

Для умов агломераційного виробництва доцільно вважати шар вихідної шихти насипним і розглядати його як однорідне ізотропне середовище, усередненою газодинамічною характеристикою якої є частка незайнятого гранулами об'єму шару, тобто його порізність. За винятком випадків, коли об'ємна частка дріб'язку фракції 0-2 мм перевищує 40%, збільшення порізності сприяє зростанню газопроникності шару [6] і свідчить про підвищення ефективності процесу огрудкування шихти.

Порізність реального шару огрудкованої агломераційної шихти залежить від величини структурних показників: еквівалентного діаметру гранул d_{eq} , мм та ступеня однорідності розподілу гранулометричного складу шихти. В якості характеристики однорідності розподілу гранулометричного складу прийняли коефіцієнт варіації крупності гранул V_d , мм/мм, який дозволяє оцінити розподіл фракцій різних діаметрів відносно d_{eq} . Зі збільшенням значення коефіцієнта V_d , зростає відносна величина розкиду значень діаметрів гранул. Для визначення d_{eq} і V_d використовували формули розрахунку середньозважених значень цих величин [7]:

$$d_{eq} = \sum_{i=1}^N q_i \cdot d_i, \quad (1)$$

$$V_d = \sqrt{\sigma_d^2 / d_{eq}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (d_i - d_{eq})^2 / d_{eq}}, \quad (2)$$

де: q_i – вміст гранул i -ої фракції, долі.од.; d_i – діаметр гранул i -ої фракції, мм; N – кількість фракцій; σ_d^2 – середньозважена дисперсія, мм².

Оскільки крупність огрудкованої агломераційної шихти знаходиться в межах від 0 мм до 10-12 мм, то для дослідження впливу d_{eq} та V_d на величину порізности шару використовували шихти, складені з відсіву обпалених залізородних обкотишів фракції 0-10 мм, а також дані експериментальних досліджень, наведені в роботі С.В.Кривенко [8]. Гранулометричний склад шихт, еквівалентний діаметр d_{eq} , коефіцієнт варіації крупності гранул V_d і порізність шару ε , представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики структури шару вихідної шихти

Вміст фракцій, долі од.						d_{eq} , мм	V_d , мм/мм	ε , %
0,5-1мм	1-2 мм	2-3 мм	3-5 мм	5-7 мм	7-10 мм			
0,6	0,4					1	0	41,8*
	1					1,5	0	42,9
		1				2,5	0	46,3
			1			4	0	47,75
				1		6	0	49,6
					1	8,5	0	46*
0,67	0,33					0,99	0,35	41,2
	0,5	0,5				2	0,25	39,9
		0,365	0,365	0,27		3,99	0,34	37,3
0,1	0,065		0,67		0,165	4,32	0,54	36*
		0,27	0,27	0,46		4,51	0,33	38,9
		0,18	0,18	0,64		5,01	0,28	38,8
		0,09	0,09	0,82		5,51	0,2	39,9
			0,67		0,33	5,67	0,42	38,4
			0,355	0,355	0,29	6,02	0,3	40,2
				0,6	0,4	7	0,17	40,9
			0,33		0,67	7,33	0,32	42,3*
				0,2	0,8	8	0,12	42,25
0,4	0,27		0,33			2,01	0,71	39*

0,4	0,27		0,165		0,165	2,78	1,06	33,8*
0,24	0,16		0,45		0,15	3,55	0,75	31*
0,4	0,27				0,33	3,67	1,03	32,4*
0,198	0,132		0,34		0,33	4,66	0,71	27,5*
0,27	0,18		0,15		0,4	4,65	0,79	29,2*
0,3	0,2				0,5	5	0,8	29,8*
0,24	0,16		0,15		0,45	5,05	0,73	28,7*
0,2	0,13				0,67	6,33	0,6	27,8*

* - дані експериментальних досліджень, наведені в роботі [8].

Аналіз отриманих даних дозволив виділити в діапазоні крупності огрудкованої агломераційної шихти від 0 мм до 10 мм три групи значень коефіцієнта варіації крупності гранул V_d , які відповідають різному ступеню полідисперсності шихти і відрізняються характером сукупного впливу d_{eq} та V_d на порізність шару (рис. 1). Отриманий аналітичний опис залежності порізності шару від d_{eq} і V_d для трьох груп значень коефіцієнта V_d :

$$\varepsilon_{0-0,2} = -0,3384 \cdot d_{eq}^2 - 3,8708 \cdot d_{eq} + 38,189 \cdot R^2 = 0,9709, (3)$$

$$\varepsilon_{0,2-0,7} = 0,3176 \cdot d_{eq}^2 - 2,6027 \cdot d_{eq} + 43,409 \cdot R^2 = 0,9709, (4)$$

$$\varepsilon_{0,7-1} = 0,7108 \cdot d_{eq}^2 - 8,3223 \cdot d_{eq} + 52,272 \cdot R^2 = 0,9709, (5)$$

де: $\varepsilon_{0-0,2}$, $\varepsilon_{0,2-0,7}$, $\varepsilon_{0,7-1,0}$ – порізність шару, складеного з шихт першої, другої і третьої груп значень коефіцієнта V_d , відповідно; R^2 – коефіцієнт достовірності апроксимації експериментальних даних.

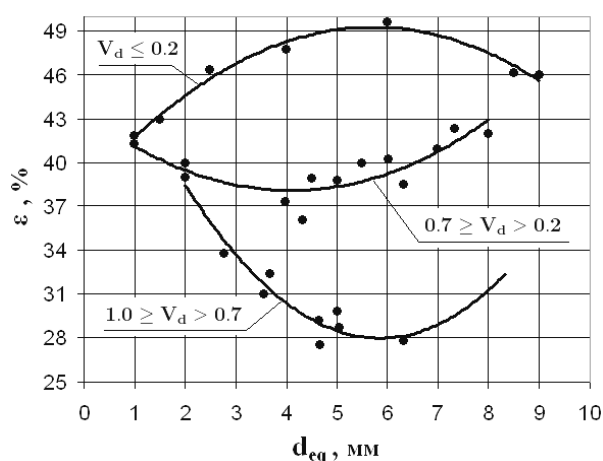


Рисунок 1 - Залежність порізності шару ε від еквівалентного діаметру d_{eq} та коефіцієнту варіації крупності гранул шихти V_d

Перша група: $V_d \leq 0,2$. Шихти характеризуються максимальним ступенем однорідності гранулометричного складу. Верхня межа діапазону ($V_d=0$) відповідає повністю монодисперсній шихті, тобто такий шихті, в якій розміри всіх гранул однакові.

Друга група $0,7 \geq V_d > 0,2$. Шихти з проміжним ступенем однорідності гранулометричного складу. Більшість шихт знаходяться саме в цьому діапазоні значень коефіцієнта V_d .

Третя група $1,0 \geq V_d > 0,7$. Максимально неоднорідні шихти. Нижня межа діапазону ($V_d = 1,0$) відповідає найбільшому, із досягнутих в даному дослідженні, ступеню полідисперсності шихти.

Проаналізувавши криві залежності порізности шару ε від еквівалентного діаметра d_{eq} для трьох груп значень коефіцієнта V_d (рис.1), прийшли до наступних висновків.

Для умовно монофракційних шихт першої групи ($V_d \leq 0,2$), крива порізности має вигляд випуклої параболи з максимумом в точці $\varepsilon = 49,6\%$, що відповідає $d_{eq} = 6$ мм. Зростання порізности на ділянці кривої від $d_{eq} = 1$ мм до $d_{eq} = 6$ мм, вочевидь, обумовлене закономірним зростанням об'єму порожнин між гранулами по мірі збільшення еквівалентного діаметру гранул. Подальше зниження порізности на ділянці кривої від $d_{eq} = 6$ мм до $d_{eq} = 9$ мм, ймовірно, викликано збільшенням щільності укладки гранул в шарі. Можлива причина цього явища може полягати в тому, що зі зростанням еквівалентного діаметру гранул зменшується площа їх поверхні, а значить, знижується сумарна площа контакту між гранулами і, отже, зменшується ефект дії сил зчеплення гранул між собою, що полегшує їх взаємне переміщення при формуванні шару і може сприяти більш щільній укладці.

Криві порізности для поліфракційних шихт другої ($0,7 \geq V_d > 0,2$) і третьої груп ($1,0 \geq V_d > 0,7$) мають вигляд увігнутих парабол. Область мінімальних значень порізности ($\varepsilon \approx 36-38\%$) для шихт другої групи відповідає еквівалентному діаметру гранул від 3 мм до 5 мм; аналогічна область найменших значень порізности ($\varepsilon \approx 27 - 29\%$) для шихт третьої групи припадає на діапазон d_{eq} від 5 мм до 7 мм.

Поведінка кривих порізности для розглянутих груп шихт ($0,7 \geq V_d > 0,2$ і $1,0 \geq V_d > 0,7$) збігається з наявними уявленнями про характер впливу вмісту дріб'язку фр. 0-2 мм в суміші на порізність ша-

ру [6]. Оскільки величина еквівалентного діаметру гранул d_{eq} , хоч і не однозначно, але відображає вміст дрібних фракцій в суміші, то можемо припустити наступне. При зниженні значень d_{eq} від 8 мм до 3-5мм (друга група) і 5 -7 мм (третья група) відбувається падіння порізності шару, що, ймовірно, пояснюється збільшенням об'ємної частки дріб'язку в суміші. Області найменших значень порізності на досліджуваних кривих відповідають найбільш несприятливому, з точки зору газодинаміки шару, вмісту дріб'язку, коли гранули меншого діаметра максимально розташовуються в порожнинах між гранулами більшого діаметру і таким чином суттєво зменшують вільний об'єм. Після проходження мінімуму на кривих порізності відбувається зменшення еквівалентного діаметру гранул до 1-2 мм і подальше збільшення об'ємної частки дріб'язку, яка стає домінуючою фракцією, що призводить тепер до підвищення однорідності суміші і зростання порізності шару до $\varepsilon = 41,2\%$ (друга група) і $\varepsilon = 39\%$ (третья група).

З наведених вище даних слідує, що найбільша порізність шару досягається при максимальній однорідності розподілу гранулометричного складу шихти ($V_d \leq 0,2$) і еквівалентному діаметрі гранул d_{eq} від 4,5 мм до 6 мм. Однак зазначені діапазони величин V_d і d_{eq} потребують деякого уточнення.

Встановлено, що зі збільшенням діаметру гранул і однорідності розподілу гранулометричного складу геометрична питома поверхня суміші S_{geom} , $\text{м}^2/\text{м}^3$ істотно знижується. Так, якщо для шихти третьої групи ($1,0 \geq V_d > 0,7$) з $d_{eq} = 4$ мм величина S_{geom} склала $1,05 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{м}^3$, то для шихти першої групи ($V_d \leq 0,2$) з $d_{eq} = 6$ мм величина S_{geom} знизилася до $0,5 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{м}^3$, тобто майже вдвічі (рис. 2). Розрахунок геометричній питомої поверхні суміші виконували за методикою визначення сумарної поверхні частинок [9], перетвореною для обчислення S_{geom} :

$$S_{geom} = S_{gran} \cdot N, \quad (6)$$

$$S_{gran} = 4\pi R_{eq}^2, \quad (7)$$

$$N = \frac{V(1-\varepsilon)}{V_{gran}} = \frac{3(1-\varepsilon)}{4\pi R_{eq}}, \quad (8)$$

$$S_{geom} = \frac{3(1-\varepsilon)}{R_{eq}} = \frac{6000(1-\varepsilon)}{d_{eq}}, \quad (9)$$

де: S_{geom} - геометрична питома поверхня суміші, $\text{м}^2/\text{м}^3$; S_{gran} - площа поверхні гранули, м^2 ; N - число гранул в шарі, шт.; V - об'єм шару, м^3 , $V=1 \text{ м}^3$; V_{gran} - об'єм гранули, м^3 ; ε - порізність шару, доли од.; R_{eq} - еквівалентний радіус гранули, м; d_{eq} - еквівалентний (середньозважений) діаметр гранули, мм.

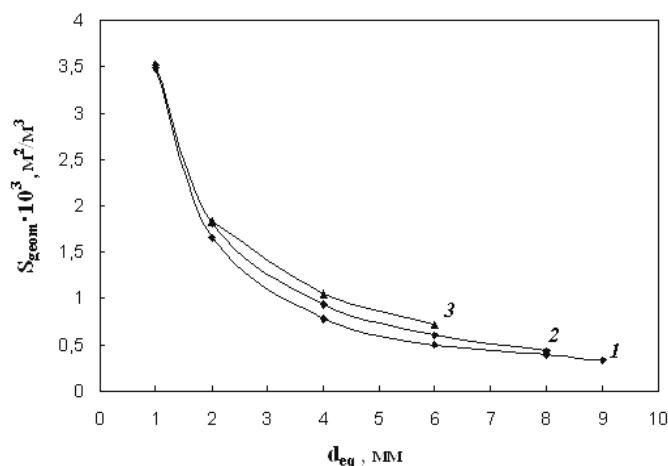


Рисунок 2 – Залежність геометричної питомої поверхні суміші S_{geom} від еквівалентного діаметру d_{eq} та коефіцієнту варіації крупності гранул V_d : 1 - $V_d \leq 0,2$; 2 - $0,7 \geq V_d > 0,2$; 3 - $1,0 \geq V_d > 0,7$

Зменшення питомої поверхні шихти призводить до погіршення умов конвективного теплообміну в шарі, знижує ефективність передачі тепла від газоподібних продуктів горіння твердого палива до шихти; крім того, розміри зон горіння палива і формування агломерату збільшуються, а температура в них падає. Спільна дія вказаних чинників негативно впливає на процеси мінералоутворення, призводить до зниження механічної міцності пирога агломерату та зменшення виходу придатного продукту [7]. Тому доцільно, прагнучи до збільшення ступеня однорідності розподілу гранулометричного складу, отримувати не повністю монодисперсну шихту ($V_d = 0$) з максимальним діаметром часток, а зупинитися на верхній межі групи значень коефіцієнту варіації крупності $V_d \leq 0,2$ і встановити величину $V_d = 0,1 - 0,2$, а $d_{eq} = 4,5 - 6$ мм. Завдяки цьому буде досягнуто компроміс між підвищенням порізності шару і одночасним зменшенням його питомої поверхні.

Практичне використання структурних показників V_d та d_{eq} ускладнене внаслідок необхідності проведення трудомістких вимірів

гранулометричного складу шихти і використання розрахункового апарату математичної статистики.

В науці і техніці часто використовується відношення максимального та мінімального діаметру гранул d_{max}/d_{min} , мм/мм, яке є одним з основних показників, що визначають фізичні властивості сумішей. У більшості випадків, при вивченні порізності сумішей або складають емпіричні рівняння для конкретних складів досліджених шихт, в яких величина ε є функцією від d_{max}/d_{min} [6], або встановлюють вплив на порізність комбінації з d_{max}/d_{min} і іншого показника, наприклад, співвідношення діаметрів окремих фракцій, масового або об'ємного співвідношення різних фракцій і т.п. [10]. Обравши останній підхід, ми прийшли до необхідності використання показника, який висловлює коефіцієнт варіації крупності гранул V_d . Для вирішення цього завдання нами запропоновано використовувати відношення середнього діаметру 1/3 маси гранул найменшої крупності до середнього діаметру решти гранул $d_{(1/3min)}/d_{(2/3)}$, мм/мм. Виходили з того, що при укладанні шару сипких матеріалів між умовно великими гранулами розташовуються гранули умовно малого діаметру. При цьому для полідисперсного шару в зазорах розташовується близько 1/3 маси матеріалів. Запропонований новий показник $d_{(1/3min)}/d_{(2/3)}$ потребує серйозного обґрунтування та подальшої перевірки. Між показником $d_{(1/3min)}/d_{(2/3)}$ і коефіцієнтом варіації крупності V_d встановлена лінійна залежність:

$$V_d = -1,11 \cdot d_{(1/3min)} / d_{(2/3)} + 1,1, \quad (10)$$

Використання комплексу запропонованих структурних показників дозволило відобразити вплив сукупної дії d_{eq} та V_d на порізність шару ε і сформулювати рекомендації по підвищенню ефективності процесу огрудкування. Для отримання шару огрудкованої агрегаційної шихти з найбільшою порізністю, а значить і газопроникністю, необхідно встановити відношення діаметрів гранул максимального і мінімального розмірів в межах $d_{max}/d_{min} = 1,25-2$, при цьому відношення середнього діаметру 1/3 маси гранул найменшою крупності до середнього діаметру решти гранул підтримувати рівним $d_{(1/3min)}/d_{(2/3)} = 0,8-0,95$.

Висновки

Досліджено сукупний вплив еквівалентного діаметру d_{eq} і коефіцієнту варіації крупності гранул шихти V_d на порізність шару ε . Встановлено наявність трьох груп коефіцієнта V_d , що відрізняються характером даного впливу. Проаналізовано залежність порізності шару шихти від d_{eq} і V_d для кожної з груп. Вперше запропоновано новий структурний показник (відношення середнього діаметру 1/3 маси гранул найменшою крупності до середнього діаметру решти гранул $d_{(1/3min)}/d_{(2/3)}$), який дозволяє відобразити коефіцієнт варіації крупності гранул шихти V_d і може бути використаний при оцінці ефективності процесу огрудкування та розробці рекомендацій по її підвищенню.

ЛІТЕРАТУРА

1. Брикетирование металлургического сырья. Актуальность и пути развития метода / [Б. Н. Маймур, А. Ю. Худяков, В. И. Петренко та ін.]. // Бюллетень научно-технической и экономической информации. Черная металлургия. – 2016. – №1. – С. 74–82.
2. Товаровский И. Г. Анализ показателей и процессов доменной плавки / И. Г. Товаровский, В. П. Севернюк, В. П. Лялюк. – Днепропетровск: «Пороги», 2000. – 420 с.
3. Металлургия чугуна: [учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп.] / под ред. Ю.С. Юсфина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с..
4. Пат. 36146 Україна, МПК⁶С22В 1/14. Барабанний огрудковувач / О.Ю. Худяков, С.Т. Войтаник; власник Національна металургійна академія України. – № 200807195; заявл. 23.05.2008 ; опублік. 10.10.2008, Бюл. № 19.
5. Аэров М.Е. Аппараты со стационарным зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы / М.Е. Аэров, О.М. Тодес, Д.А. Наринский. – Л.: «Химия», 1979. – 176 с.
6. Тарасов В. П. Газодинамика доменного процесса / В. П. Тарасов. – М.: «Металлургия», 1982. – 244 с.
7. Елисеева И. И. Общая теория статистики / И. И. Елисеева, М. М. Юзбашев. – М.: «Финансы и статистика», 2004. – 656 с.
8. Кривенко С. В. Коэффициент газодинамического сопротивления слоя окомкованной агломерационной шихты / С. В. Кривенко. // Сталь. – 2013. – №4. – С. 16–19.
9. Вегман Е.Ф. Теория и технология агломерации / Е.Ф. Вегман. – М.: «Металлургия». – 1974. – 288с.
10. Создание грунтовых смесей с заданными свойствами с помощью треугольных диаграмм. / Чжан Шенжун. // Материалы XI научно-практической конференции «Инженерные изыскания в строительстве». – М.: МГУ, 2015. – С. 51-57.

А.П. Егоров, В.Б. Зворыкин, А.И. Михалев,
М.Ю. Кузьменко, В.Ф. Балакин

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТНЫМ РЕЖИМОМ ПРОКАТКИ НА НЕПРЕРЫВНОМ МЕЛКОСОРТНОМ СТАНЕ

Аннотация. Работа направлена на снижение разноширинности сортового проката путем управления скоростным режимом прокатки в черновой группе клетей и оценки качества этого управления по изменению величины петли проката перед чистовой группой клетей. Предложен оригинальный алгоритм управления. Применение системы позволяет снизить практически к нулю разноширинность готового проката и стабилизировать работу контуров петлерегулирования в чистовой группе клетей.

При производстве проката мелкого сорта основными составляющими его себестоимости являются стоимость заготовки и энергетические затраты на нагрев заготовки, прокатку в главной линии, порезку готового проката на штанги и, окончательно, на мерные прутки. Все операции по прокатке в черновой и чистовой группах клетей, порезке проката на летучих ножницах связаны со скоростным режимом прокатки.

Под скоростным режимом прокатки понимают прокатку в черновой группе клетей с натяжением, а в чистовой с петлей или прогибом проката.

Прокатка с петлей проката или с прогибом (малым управляемым натяжением) является наилучшим технологическим режимом, так как обеспечивает стабильность геометрических параметров профиля проката по всей длине.

При прокатке с натяжением в черновой группе клетей возникает разноширинность проката, связанная с прокаткой передних и задних участков проката без натяжения, а среднего участка проката - с натяжением.

© Егоров А.П., Зворыкин В.Б., Михалев А.И., Кузьменко М.Ю., Балакин В.Ф. 2016

Проведенными в разное время исследованиями ИЧМ, НИИчермет, ДМетИ а также выполненные в рамках научно-исследовательской работы [1] исследования показали, что за счет прокатки с натяжением в черновой группе клетей разноширинность проката по длине может достигать 10%. Это приводит к колебаниям длины проката на выходе из последней клетки стана, а, соответственно, и к дополнительной обрезки при порезке на мерные прутки. Нестабильность геометрии профиля по длине вызывает необходимость частого отбора проб готового проката для предотвращения прокатки за полем допуска.

Настройка и поддержание заданного скоростного режима осуществляется с помощью систем управления скоростным режимом прокатки. Основными задачами этой системы являются.

- Расчет частот вращения валков клетей, в соответствии с калибровкой, для настройки стана на прокатку в черновой группе с минимальным натяжением, а в чистовой - с допустимой петлей проката.
- Контроль и поддержание удельного натяжения проката с минимально допустимым значением 9-10 Н/мм².
- Образование и поддержание заданных значений петель (прогиба) проката в чистовой группе.
- Согласованное изменение частот вращения приводов валков смежных клетей при разгонах и торможениях стана, либо коррекции режима прокатки в отдельной группе клетей.

Анализ современных систем управления скоростным режимом прокатки выполнен в работах [2].

Отдельные, сепаратные контуры управления скоростным режимом прокатки в межклетевых промежутках связаны между собой как через скоростные параметры режима обжатия в очаге деформации клетки, так и через частоты вращения смежных клетей. Основные выражения, характеризующие связь натяжения и петли проката:

$$T_{i,i+1} = T_{H(i,i+1)} + \frac{EQ_i}{l_{oi}} \int_0^t (V_{1i} - V_{o,i+1}) dt, \quad (1)$$

$$\Delta l_i = \int_0^t (V_{1i} - V_{o,i+1}) dt. \quad (2)$$

где Δl_i - натяжение проката в промежутке клеток i и $i + 1$; $T_{H(i,i+1)}$ - начальное натяжение проката в промежутке клеток i и $i + 1$; E - модуль упругости Юнга; Q_i - площадь поперечного сечения проката; l_{oi} - расстояние между валками смежных клеток; $V_{o,i+1}$, V_{1i} - соответственно скорость проката на входе в клетку и на выходе из нее; Δl_i - приращение величины петли проката.

Натяжение проката влияет не только на скоростной режим прокатки, но и на его геометрические параметры. При прокатке на сортовых станах изменение геометрических параметров сечения (высоты и ширины) возможно из-за упругой деформации конструкций клетки и натяжения проката. Изменение упругой деформации клетки связано с изменением усилия проката за счет изменения условий деформации (изменение толщины подката, температуры проката, натяжения). Перечисленные выше факторы на однокоточных станах не вызывают существенных изменений высоты профиля. Геометрические параметры профиля проката изменяются, в основном, за счет изменения уширения. Для учета влияния натяжения на геометрические параметры проката запишем формулу влияния натяжения на уширение [3]:

$$\Delta b = 0.5 C_b C_\sigma \left(\sqrt{R_\Delta h} - \frac{\Delta h}{2f} \right) \ln \frac{h_o}{h_1}, \quad (3)$$

$$C_\sigma = 1 - \frac{2q_o}{\sigma_m}. \quad (4)$$

где q_o - удельная сила заднего натяжения; σ_m - предел текучести металла.

Влиянием переднего натяжения на уширение можно пренебречь.

При возникновении натяжения проката изменяется уширение проката, а, следовательно, скорость входа проката в клетку, следующую за промежутком. Кроме этого, за счет изменения опережения, изменяется и скорость выхода проката из предыдущей клетки. Таким образом, через некоторый промежуток времени устанавливается новый скоростной режим

прокатки с новым значением величины натяжения проката. Структурная схема системы представлена на рис. 1.

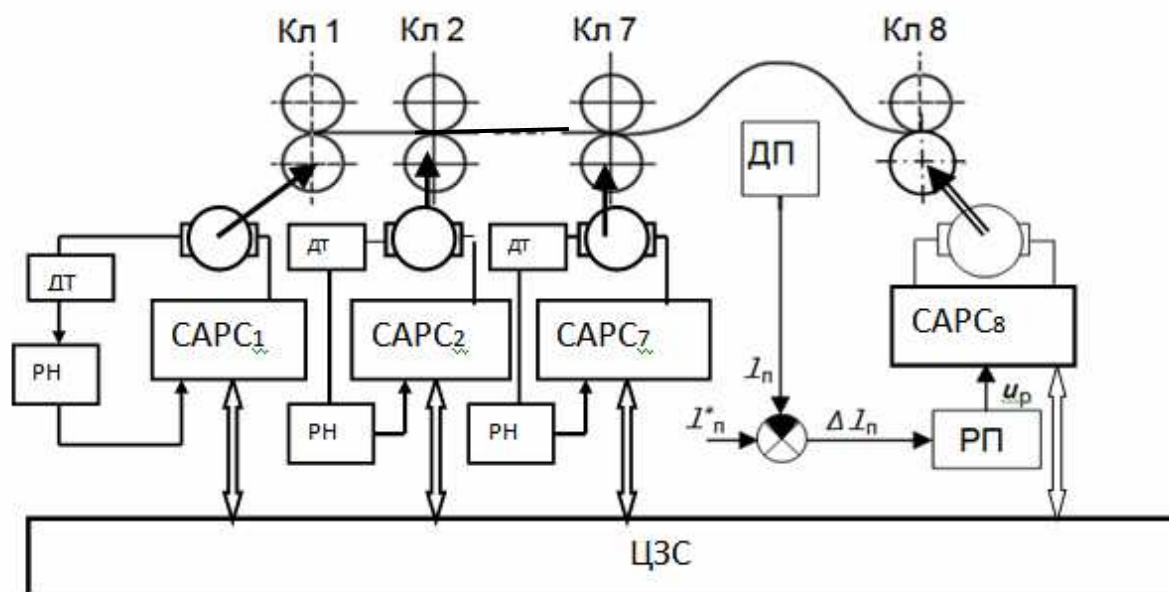


Рисунок 1 - Система управления скоростным режимом прокатки

По информации датчиков якорных токов (ДТ) цепей двигателей приводов валков клеток в черновой группе осуществляется подстройка режима натяжения проката при заходе переднего участка проката с помощью регуляторов натяжения (РН) и систем автоматического регулирования скорости (САРС) валков клеток. В чистовой группе клеток осуществляется регулирование величины петли проката.

Все системы работают независимо, благодаря системе цифрового задания скоростей [4], когда изменение частоты вращения валков клеток происходит без изменения соотношения частот вращения валков смежных клеток.

После прокатки в черновой группе клеток изменение коэффициента вытяжки проката за счет прокатки без натяжения передних, задних и с натяжением средних участков имеет лыжеобразный характер, что сказывается как на разноширинности проката на выходе из чистовой группы, так и на работе систем петлерегулирования и раскроя проката.

Для выравнивания коэффициента вытяжки проката, а соответственно и его уширения по длине предлагается система управления, работа ко-

торой основана на методе косвенной оценке изменения коэффициента вытяжки проката [5]. Этот метод можно пояснить, используя уравнение (2). Выразив скорость раската через частоту вращения приводов, рабочие радиусы и опережение получим:

$$\Delta l_i = \int_0^t \left[\omega_i R_i (1 + S_i) - \frac{\omega_{i+1} R_{i+1} (1 + S_{i+1})}{\lambda_{i+1}} \right] dt. \quad (5)$$

где R_i , R_{i+1} - рабочие радиусы валков i -ой и $i+1$ -ой клеток; S_i , S_{i+1} - опережение в i -ой и $i+1$ -ой клетях; ω_i , ω_{i+1} - частота вращения приводов i -ой и $i+1$ -ой клеток; λ_{i+1} - коэффициент вытяжки раската в $i+1$ -ой клетки.

Из формулы (5) видно, что при неизменяющихся радиусах валков и условно постоянных опережениях изменение величины петли проката зависит, в основном от коэффициента вытяжки в первой клетки чистовой группы клеток:

$$\lambda_{i+1} = \frac{\omega_{i+1} R_{i+1} (1 + S_{i+1})}{\omega_i R_i (1 + S_i) - \frac{d \Delta l_i}{dt}}. \quad (6)$$

Возмущающие воздействия в контуре регулирования петли проката имеют высокочастотную составляющую, вызванную динамическими процессами в самом контуре и низкочастотную, связанную с изменением режима обжатия от переднего участка проката к заднему участку в первой чистовой клетки.

Высокочастотные составляющие возмущения подавляются пропорциональной частью регулятора, а низкочастотные интегральной частью. Поэтому выходной сигнал регулятора петли может быть использован для системы управления натяжением в последнем межклетьевом промежутке черновой группы клеток с целью выравнивания уширения по длине проката.

Структурная схема модели системы коррекции вытяжки проката в последнем межклетьевом промежутке по выходному сигналу интегральной части регулятора петли представлена на рис. 2.

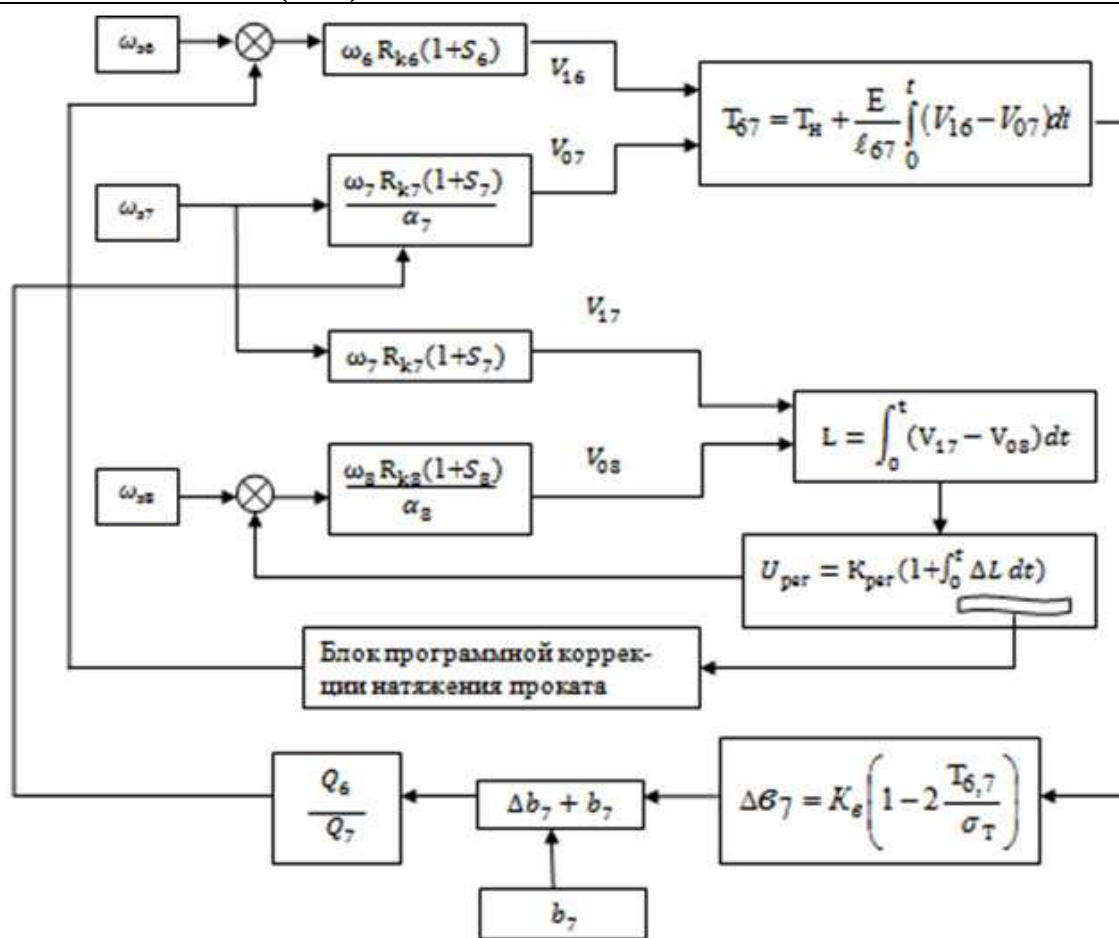


Рисунок 2 - Структурная схема управления режимом натяжения в последнем межклетьевом промежутке черновой группы клеток

Система работает следующим образом.

Заходные обороты последней клетки черновой группы устанавливаются завышенными, по сравнению с прокаткой среднего участка проката. Это необходимо для устранения разноширинности на переднем участке проката.

Так как прокатка с натяжением переднего и заднего участков пока-та в черновой группе клеток и в первой клетки чистовой группы осуществляется в различные временные интервалы, то непосредственно управление режимом натяжения проката по сигналу регулятора петли будет осуществляться с транспортным запаздыванием. Поэтому в рассматриваемой системе при прокатке первого проката запоминается выходной сигнал на переднем и заднем участках проката и программно, на последующих прокатах, изменяется частота вращения шестой клетки черновой группы для устране-

ния разноширинности проката. Интенсивность разгона и торможения валков прокатных клетей при заполнении стана и завершения прокатки корректируется после каждого проката. Критерием правильной настройки является отсутствие тренда в сигнале регулятора петли в начале и в конце проката.

Сказанное поясняют графики (рис. 3, 4), полученные путем компьютерного моделирования системы. Данные для расчетов взяты из таблицы калибровки, приведенной в [1].

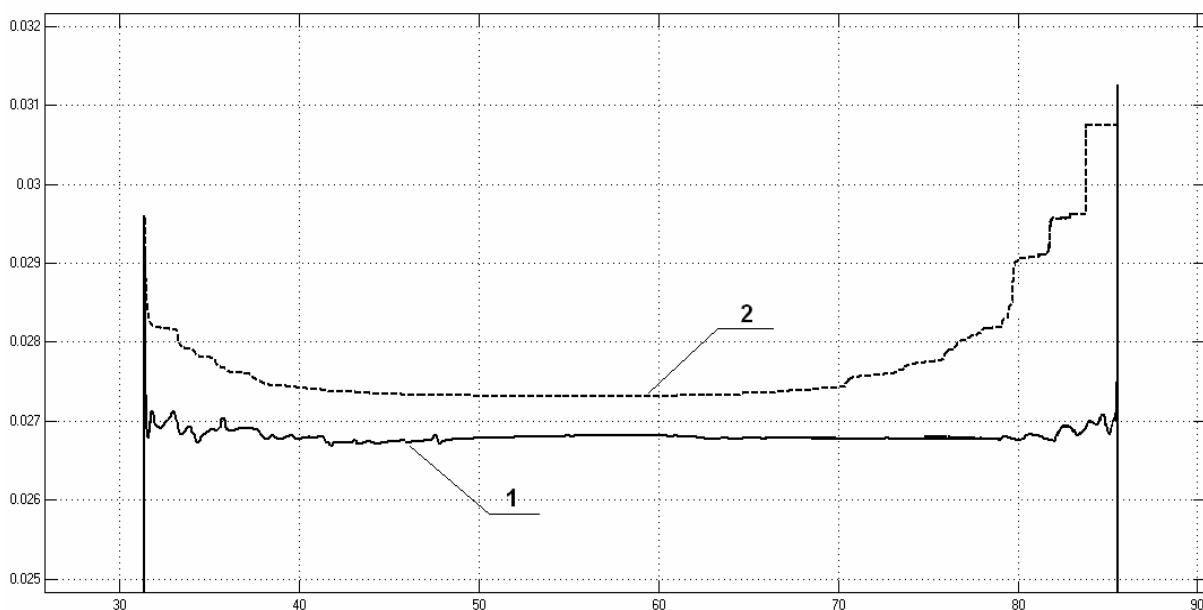


Рисунок 3 - График изменения уширения проката на выходе из черновой группы клетей: 1 – с системой программного регулирования натяжения проката; 2 – без системы регулирования натяжения

Изменение ширины проката с системой программного управления практически отсутствует.

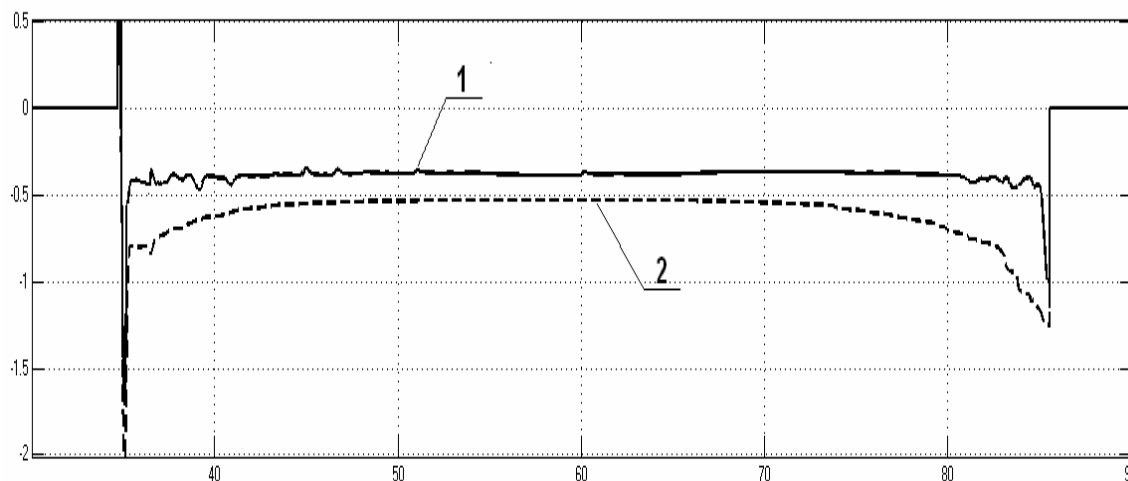


Рисунок 4 - График выходного сигнала регулятора петли:

1 – с системой программного регулирования натяжения проката;

2 – без системы регулирования

Так как площадь поперечного сечения проката на выходе черновой группы практически не изменяется, то не изменяется и скоростной режим прокатки в этом межклетьевом промежутке.

Реализация приведенной системы автоматического управления скоростным режимом прокатки не требует каких либо изменений в комплексах технических средств существующих систем, которыми оборудованы практически все мелкосортные и проволочные станы Украины. Задача может быть решена незначительным изменением программного обеспечения системы.

Выводы

1. Показано, что, даже при настройке черновой группы прокатных клеток с минимальным натяжением, изменение уширения составляет 3 мм.
2. Существующие системы программного управления автоматически не подстраиваются под изменяющиеся условия прокатки.
3. Установлено, что выходной сигнал регулятора петли может быть оценкой разноширинности проката в регулируемом промежутке.
4. Разработана система программного управления натяжением проката, которая практически сводит к нулю разноширинность на выходе черновой группы клеток.

5. Предложена коррекция режима управления по выходному сигналу регулятора петли.

ЛИТЕРАТУРА

1. Підвищення енергоефективності електромеханічного комплексу виробництва сортового прокату. Звіт з НДР /Національна металургійна академія України. Керівник Єгоров О.П. - №0113U003260с - Дніпропетровськ, 2014. -151 с.
2. Автоматизация технологических процессов на мелкосортных прокатных станах: монография /А.С. Бешта, В.Н. Куваев, О.Е. Потап, А.П. Егоров. - Днепропетровск: Журфонд, 2014.-283 с.
3. Грудев А.П. Теория прокатки: Учебник для вузов. - М.: Металлургия, 1988, 240 с.
4. Цифровая система управления скоростным режимом /В.Н. Куваев, В.И. Стахно, А.П. Егоров, В.С. Ткачев. Металлургия. - 1998, №2. - с.31.
5. Егоров А.П., Стахно В.И., Чернышев А.Н. Автоматическое управление скоростным режимом непрерывной группы прокатных клетей при косвенном определении возмущения. Сталь. - 1980.

SHIP MANAGEMENT INTERNAL COMBUSTION ENGINES WITH REGARD TO ITS TECHNICAL STATE BASED THEORY OF FUZZY SETS

Annotation: The paper presents a fuzzy model of determining the current status of marine internal combustion engine on the basis of criteria established by the manufacturer. Design model and determine the optimal mode of work was carried out by the algorithm of fuzzy inference Mamdani package Fuzzy Logic Toolbox computing environment MATLAB. Using fuzzy logic allows the use of a generalized and formalized experience of a large number of experts in the field of ship diesel power plants, both in the creation of the rule base and to determine the current condition of the engine.

Keywords: fuzzy logic, linguistic variable, membership function, the definition of a technical condition, the ship's engine.

Introduction. Ship internal combustion engines (SICE) are complex systems composed of many subsystems and components, and the failure of at least one of them leads to a loss of efficiency of the engine, which is a threat to the safety of navigation, reduces the efficiency of the engine and extensive material losses. SICE during operation is exposed to moisture, salt, vibration, shock, ambient temperature changes over a wide range, etc. These effects, in addition to the complex physical and chemical processes and energy transformation that occur during operation of the engine, accelerate the process of degradation of parts and assemblies SICE and reduce their reliability.

During operation, the engine plays an important role to ensure the safety of navigation, which is directly related to ensuring the reliability of the engine and its components. To ensure a high level of reliability of the engine of the ship is necessary to carry out continuous monitoring of its technical condition, failure to timely detect and prevent sudden failure of the engine and its systems. The solution to this problem is possible in the presence of a system for assessing the technical condition of the engine in real time. Evaluation of the technical con-

dition of the ship's engine is in operation, provides an opportunity to optimize operating conditions of the engine, focusing on economic performance, environmental standards and the safety of navigation. Additionally, continuous monitoring allows for timely detection of faults, to prevent sudden failure of the engine and its components. This in turn leads to an increase in the interval between repairs and reduce operating costs.

In order to enhance the evaluation of the technical condition of the engine, as well as for early detection of faults are currently using modern methods of simulation and computer tools. At the same time, the use of fuzzy logic allows to make management decisions on the choice of operating conditions of the engine in a fuzzy, incomplete and uncertain information. Since marine engines for use characteristic feature is that the decision on the choice of operating conditions, in most cases, made subjectively only chief engineer, then it is likely that the decision will not be correct. In this regard, the development of methods that could generalize and formalize the experience of a large number of marine engineers and based on them to create a system to support decision-making on the choice of operating conditions in real time, is today an important task of the technical operation of marine SICE.

Analysis of publications. At the present days, there are a variety of means, methods and systems of information on the technical condition of the ship's engine by controlling the structural and functional parameters. For nondestructive testing include: vibroacoustic [1,2], ultrasonic [3], magnetic [4], etc. The basis of integrated assessment put statistical methods [5], methods for determining the technical condition of the engine of complex parameters [6], the methods of diagnosing the parameters of exhaust gases [7]. A method of thermal imaging diagnosis of marine diesel engines [8]. It is not always possible to quickly identify the problem due to the lack of clarity and delays in the collection of objective information about the state of the engine in real time [9]. To solve such problems, widespread system of fuzzy inference, which are based on the theory of fuzzy sets [10-12].

The purpose of the article. The development of models for assessing the technical condition of the engine in real time based on the theory of fuzzy sets.

Main part. Model studies can be represented by the formula

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

where y - the value of the technical status (output parameter),

$x_1, x_2, \dots, x_n$ - the parameters controlled during the operation of marine diesel (input parameters).

To build the model, and determine the optimum mode of operation used a system of fuzzy inference algorithm based on fuzzy inference Mamdani. This choice is determined by the fact that when using the model type Mamdani no difficulty with the content interpretation of the parameters of fuzzy model, as well as an explanation of the inference, so it is more understandable for the operator.

As the membership functions for the input parameters used Gaussian function, which is its advantage continuously differentiable on its domain, and the fact that the shape of the curve is determined by only two parameters, making it easy to configure the system:

$$\text{gaussmf}(x, \sigma, c) = e^{-\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2}, \quad (2)$$

where c - the maximum coordinate of the curve, and σ - concentration factor, the value of which defines the area of the curve accessories.

For output parameter used triangular membership function of fuzzy sets:

$$\text{trimf}(x, a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right), \quad (3)$$

where the parameters a and c define the coordinates of the base of the triangle, the parameter b determines the coordinates of the vertices. This feature allows you to get the required accuracy defuzzification by the fixed domain of definition.

Formation of the rule base of fuzzy inference is carried out in an ordered list of agreed fuzzy production rules of the form:

IF "Condition 1" THEN "Conclusion 1".

The aim is to establish the stage of fuzzification correspondence between the specific values of the individual input variable fuzzy inference system and membership functions corresponding to the value of her term input linguistic variable.

Aggregation is a procedure for determining the degree of truth conditions for each of the fuzzy inference rules of the system. Are the

levels of "cut-off" for each of the prerequisites rules using operation min:

$$\alpha_k = \bigwedge_{i=1}^n \left[\mu_{a_i}^{a_k}(x_i) \right] \quad (4)$$

Activation is the process of finding the truth degree of each of the fuzzy inference rules podzaklyucheny, ie definition truncated membership functions of fuzzy sets:

$$\mu'_k = (\alpha_k \wedge \mu_k(D)), \quad (5)$$

where $\mu(D)$ - truncated membership functions for input variables - truncated membership functions for the fuzzy rules.

Accumulation is the process of finding the membership function of a fuzzy subset of the final output for the variable:

$$\mu_\Sigma(D) = \bigvee_{k=1}^m \left[\mu'_k(D) \right] \quad (6)$$

Defuzzification systems fuzzy inference is the process or the process of finding a conventional (non-fuzzy) values for each of the output linguistic variables. Defuzzification carried out by the center of gravity. Clearly the value of the output variable is defined as the center of gravity of the resulting accumulation of figures:

$$Y = \frac{\int_{\min}^{\max} x \cdot \mu(x) dx}{\int_{\min}^{\max} \mu(x) dx} \quad (7)$$

where Y - the result of defuzzification, x - variable corresponding to the output linguistic variable - membership function of the fuzzy set corresponding to the output variable after stage accumulation, min, and max - the left and right points of the interval considered medium fuzzy set output variable.

Practical implementation of the work of the proposed model was implemented for marine engines Wärsilä6L46C package Fuzzy Logic Toolbox computing environment MATLAB, equipped with special means of fuzzy modeling, which allows the full range of research on the development and application of fuzzy models [13-14].

The formalization of input and output parameters are presented in Table 1.

In the set of parameters describing the technical condition of marine diesel was allocated seven. Their choice is due to the fact that it is for them, developers of the engine Wärtsilä 6L46C identified critical to triggering the alarm [15].

The range of changes was based on the design parameters of auxiliary systems registered in the engine manual.

Table 1

Baths, boundaries and range of the linguistic variables

Linguistic variables	Bathslinguisticvariable	Range
x_1 – «air temperature after air cooler», K	norm	(313,15...343,15)
	allowable	(343,15...348,15)
	inadmissible	(348,15...373,15)
x_2 – «pressure before engine (lubricating oil system)», MPa	norm	(0,3...0,4)
	allowable	(0,2...0,3)
	inadmissible	(0...0,2)
x_3 – «prelubricating pressure», MPa	norm	(0,078...0,08)
	allowable	(0,05...0,078)
	inadmissible	(0...0,05)
x_4 – «temperature before engine», K	norm	(336,15...351,15)
	allowable	(351,15...353,15)
	inadmissible	(353,15...373,15)
x_5 – «pressure before engine (hight temperature cooling water system)» , MPa	norm	(0,32...0,48)
	allowable	(0,2...0,32)
	inadmissible	(0...0,2)
x_6 – «temperature after cylinders(hight temperature cooling water system)», K	norm	(355,15...378,15)
	allowable	(378,15...383,15)
	inadmissible	(383,15...403,15)
x_7 – «pressure before engine (low temperature cooling water system)» , MPa	norm	(0,32...0,44)
	allowable	(0,2...0,32)
	inadmissible	(0...0,2)
y -«technical state»	a good	0,8...1,0
	acceptable	0,5...0,8
	allowable	0,3...0,5
	inadmissible	0...0,3

The causal connection between the values of the parameters and the technical condition of the engine formalized as a set of fuzzy logic rules. To build a base of fuzzy rules was carried out expert evaluation of

combinations of input variables with simultaneous evaluation of membership functions. Weighting factors of all the rules were set to 1.

Since the totality of these rules describes the strategy for managing the system, when drafting them was paid special attention to their consistency. Computational experiments have shown that the approximation gives the smallest error base consisting of 366 rules.

Fuzzy equations between the membership function of input and output variables are as follows:

$$\mu^{1(n)}(y) = \mu^n(x_1) \wedge \mu^n(x_2) \wedge \mu^n(x_3) \wedge \mu^n(x_4) \wedge \mu^n(x_5) \wedge \mu^n(x_6) \wedge \mu^n(x_7) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mu^{0,8(n)}(y) = & \\ & [\mu^a(x_1) \wedge \mu^n(x_2) \wedge \mu^n(x_3) \wedge \mu^n(x_4) \wedge \mu^n(x_5) \wedge \mu^n(x_6) \wedge \mu^n(x_7)] \vee \\ & [\mu^n(x_1) \wedge \mu^a(x_2) \wedge \mu^n(x_3) \wedge \mu^n(x_4) \wedge \mu^n(x_5) \wedge \mu^n(x_6) \wedge \mu^n(x_7)] \vee \\ & [\mu^n(x_1) \wedge \mu^n(x_2) \wedge \mu^a(x_3) \wedge \mu^n(x_4) \wedge \mu^n(x_5) \wedge \mu^n(x_6) \wedge \mu^n(x_7)] \vee \\ & [\mu^n(x_1) \wedge \mu^n(x_2) \wedge \mu^n(x_3) \wedge \mu^a(x_4) \wedge \mu^n(x_5) \wedge \mu^n(x_6) \wedge \mu^n(x_7)] \vee \quad (9) \\ & [\mu^n(x_1) \wedge \mu^n(x_2) \wedge \mu^n(x_3) \wedge \mu^n(x_4) \wedge \mu^a(x_5) \wedge \mu^n(x_6) \wedge \mu^n(x_7)] \vee \\ & [\mu^n(x_1) \wedge \mu^n(x_2) \wedge \mu^n(x_3) \wedge \mu^n(x_4) \wedge \mu^n(x_5) \wedge \mu^a(x_6) \wedge \mu^n(x_7)] \vee \\ & [\mu^n(x_1) \wedge \mu^n(x_2) \wedge \mu^n(x_3) \wedge \mu^n(x_4) \wedge \mu^n(x_5) \wedge \mu^n(x_6) \wedge \mu^a(x_7)] \end{aligned}$$

In step defuzzification linguistic variables inputs have been converted into a numerical value representing the technical condition of the ship's engine.

As a result of fuzzy inference obtained surface "input - output", showing the dependence of the technical condition of the engine from the input values (Figure 1).

During the test the system, changing input parameter values within a predetermined range causing a change of the output variable in accordance with the actual situation. The results of the system are presented in Table 2. As for the first case, when the values $x_1 = 325; x_2 = 0,35; x_3 = 0,078; x_4 = 345; x_5 = 0,415; x_6 = 368; x_7 = 0,398$, which corresponds to the normal value of the output variable $y = 0,893$, which, according to experts, this estimate corresponds to the technical status at the given values of the input parameters.

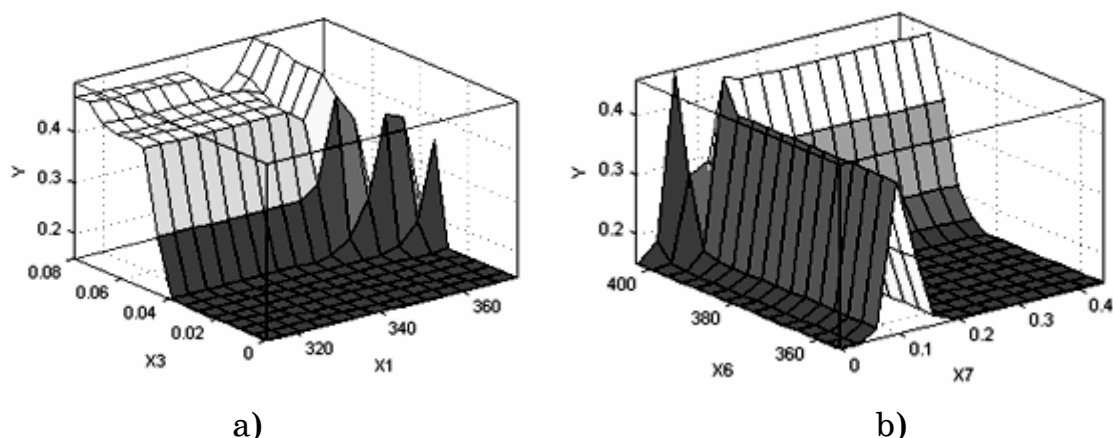


Figure 1 - Dependence of the technical condition of the engine on the values of the input parameters: a) x_3 – «prelubricating pressure», x_1 – «air temperature after air cooler»; b) x_6 – «temperature after cylinders (high temperature cooling water system)», x_7 – «pressure before engine (low temperature cooling water system)»

In the second case, the value was not within the normal range, as in other settings, as was the value in the range of acceptable values. At the same time the output of the y already had a much smaller compared to the first case of a numerical value that indicates the deterioration of the technical condition of the ship's engine.

The results of the system under the conditions of change of input values in the range of "normal" and "acceptable" are shown in the cases 3-6.

Experiments were conducted under conditions of an unacceptable value of one of the input parameters, regardless of the range in which there were other parameters. In the case of 7, when the parameter is invalid, and other parameters are within the normal range at the output of $y = 0,158$, which corresponds to "inadmissible" in the real world in such situations is considered critical to the operation of the engine, the engine room alarm is triggered. Similarly, in the case of 8, when he had an invalid value, and all other parameters were within the acceptable range, the value of $y = 0,15$, which is also critical in the engine.

Results of the system

№	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	y
1.	325	0,35	0,078	345	0,415	368	0,398	0,893
2.	325	0,35	0,06	345	0,415	368	0,398	0,887
3.	313	0,25	0,058	350	0,38	356	0,349	0,768
4.	320	0,25	0,079	352	0,26	360	0,36	0,688
5.	346	0,24	0,063	353	0,3	379	0,22	0,491
6.	342	0,35	0,05	351,5	0,2	365	0,2	0,407
7.	318	0,3	0,78	350	0,1	367	0,38	0,158
8.	344	0,25	0,025	352	0,26	380	0,28	0,15

Conclusions. On the basis of these examples show that the most simple model for assessing the current technical condition required for use in controlling the operation of the ship's diesel engines can be built on the basis of the developed framework of the rules of fuzzy logic.

When you change the input values from min to max, the output parameter varied from 1.15 to 0.893, and is adequate for each case.

Presented fuzzy model allows to determine the technical condition of the ship's engine in real-time by changing the values of the input parameters.

To use the model provided by the operator does not need to have some additional skills, and the data obtained at the output can be easily interpreted.

This model is easy to adjust to any ship internal combustion engine.

A further area of research is the creation of an integrated system of marine engine diagnostics based on neural network technology.

REFERENCES

1. Попков В.И. Виброакустическая диагностика в судостроении / В.И.Попков. - Ленинград: Судостроение, 1983. - 256 с.
2. Маницын В.В. Технология ремонта судов рыбопромыслового флота / В.В.Маницын. - Москва:Колос, 2009. - 542 с.
3. Ключев В. В. Неразрушающий контроль. Том 3. Ультразвуковой контроль / В.В. Ключев. - М.: Машиностроение, 2004. - 864 с.
4. Белокур И. П. Дефектоскопия материалов и изделий / И.П. Белокур, В.А. Коваленко. - К.: Техника, 1989. - 192с.
5. Никитин Е.А. Диагностирование дизелей/ Е.А. Никитин, Л.В. Станиславский, Э.А. Улановский и др. - М.: Машиностроение, 1987. - 224с.

6. Крашенников С.В. Современные подходы к диагностированию дизельных двигателей внутреннего сгорания / С.В. Крашенников // Вестник Новосибирского государственного педагогического университета. – 2013. - № 2(12). – С.59- 68.
7. Гор Д. А., Кук Г. Ж. Бесконтактные методы диагностики дизельного двигателя основанные на анализе формы волны выхлопных газов/ Доклад сделан в Ряде Технических документов SAE. – 1987. – 8 с.
8. Безюков О. К. Диагностирование технического состояния судовых дизелей по инфракрасному излучению их наружных поверхностей / О.К. Безюков, А.А. Кордаков, С.В. Шаршавин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2009. - № 2 (2) – С. 160-164.
9. Бабичев С.А. Система технической диагностики судовых установок на основе нечеткой логики / С.А. Бабичев, Л.А. Стрелковская // Современные энергетические установки на транспорте, технологии и оборудование для их обслуживания: материалы научно-практической конференции, 01-03 октября 2014г., г. Херсон. – Херсон: Херсонская государственная морская академия, 2014. – 435с.
10. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. / Л. А. Заде. – М. : Мир, 1976. – 167 с.
11. Kosko B. Fuzzy systems as universal approximations // Proc. 1-st IEEE Conf. on Fuzzy Systems (FUZZ-92)., San Diego, CA, Mar. 1992. - P. 1153–1162.
12. Ротштейн А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети/ А.П. Ротштейн. – Винница: УНИВЕРСУМ, 1999.- 320с.
13. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами МАТЛАБ / С.Д. Штовба. – М.: Горячая линия - телеком. 2007. - 290 с.
14. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH/ А.Леоненков- Санкт-Петербург: «БХВ Петербург», 2005. - 719с.
15. Project guide for Marine Applications. Wärtsilä Finland Oy, Marine P.O. Box 252, FIN-65101 VAASA, Finland, 2001. – 212 p.

А.Е. Кучеренко

АППРОКСИМАЦИЯ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ И ПОИСК ОПТИМАЛЬНОЙ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ СТЕРЖНЯ

Аннотация. В статье рассмотрена задача кусочно-линейной аппроксимации момента инерции плоского сечения, которая возникает при решении проблемы оптимизации топологии стержневой системы и проверке ее на устойчивость.

Ключевые слова: аппроксимация, момент инерции, сечение, устойчивость, оптимизация.

Введение

Оптимальное проектирование конструкций — сложная междисциплинарная проблема, которая вынуждена решать множество зачастую противоречащих друг другу задач. Важность этой проблемы подчеркивается тем фактом, что конечная стоимость сооружения во многом зависит от количества израсходованного материала [1], поэтому оптимизационные методы, позволяющие снизить материалоемкость без ущерба инженерно-техническим требованиям, являются ключевыми при проектировании конструкции.

С другой стороны, огромное разнообразие численных и аналитических методов порождает как проблему поиска общей подходящей стратегии оптимизации, так и проблему применимости того или иного метода на определенном этапе проектирования. Большое количество работ [2] посвящено частным оптимизационным задачам, в которых практически не уделяется внимание вопросам комбинирования этих задач с тем, чтобы обеспечить комплексный и всесторонний анализ проблемы. Так, в [3-5] рассматривается оптимизация топологии стержневой системы с использованием генетических алгоритмов. В [6, 7] приводится решение этой же задачи на основе выпуклой оптимизации. Тут же возникает ряд инженерно-практических проблем, среди которых есть такой основополагающий, как проверка системы на устойчивость. В упомянутых выше работах этот вопрос не рас-

смаатривается. Расчеты конструкции на устойчивость естественным образом основываются на использовании осевых моментов инерции плоских сечений [8, 9], в то время как большинство методов оптимизации топологии стержневой системы в качестве ответа дают либо объемы стержней, либо их площади, либо простое соотношение между их площадями. Вопрос же перехода от, например, площади сечения стержня к его осевым моментам инерции является малоосвещенным в литературе.

В схеме «оптимизация топологии системы» - «проверка системы на устойчивость» появляется важный аспект, связанный с необходимостью функционального представления моментов инерции стержней и оптимизацией их сечений. При этом важно не забывать об ограниченности вычислительных ресурсов, т.к. в реальных структурах количество конечных элементов может быть очень велико.

Полуопределенная оптимизация топологии стержневой системы

Проблему полуопределенной оптимизации топологии стержневой системы можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 & \text{minimize}_{W,v} W \\
 & \text{s.t.} \sum_{i=1}^m v_i \leq V \\
 & v_i \geq 0 \forall i = 1 \dots m, \\
 & \begin{pmatrix} W & F^T \\ F & \sum_{i=1}^m \frac{E_i v_i}{L_i^2} a_i a_i^T \end{pmatrix} \geq 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

где W - верхняя оценка величины энергии упругой деформации стержневой системы; v_i - объем стержня; F - внешние силы, приложенные к узлам конструкции; E_i - модуль Юнга; L_i - длина стержня; a_i - i -й столбец матрицы уравнений системы A , которая находится из уравнения баланса сил $Af + F = 0$. Оптимизационная задача сводится к поиску минимальной величины W при заданных ограничениях. Более подробно математические формы задачи оптимизации топологии стержневой системы рассмотрены в [9]. Результат решения оптимизационной задачи (1) представляется в виде $v_1 : v_2 : \dots : v_m$, т. е. в виде соотношений объемов стержней. Конкретные значения v_i определяются из условий, которые обеспечивают выполнение инженерно-

технических требований к исследуемой системе. Среди них — и проверка конструкции на устойчивость.

Сама подзадача проверки стержневой системы на устойчивость может записываться в разных формах [8-10]. Все эти формы объединяет тот факт, что в уравнениях, которые используются в процессе вычислений, так или иначе фигурируют осевые моменты инерции сечений стержней.

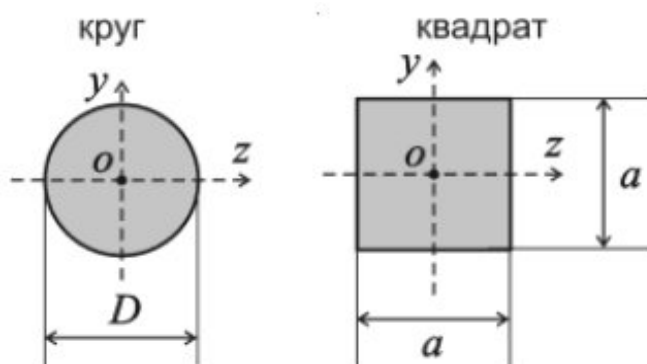


Рисунок 1 — Примеры простых сечений

И если в случае простых сечений типа «круг», «квадрат» (рис.1) существует взаимно однозначное отображение «площадь сечения» - «осевой момент инерции плоского сечения», то для сложных сечений такой простой связи нет. Задача еще больше усложняется, когда заранее не известна форма сечения стержней, т.е. возникает и проблема выбора «на лету» оптимальной геометрии сечения по заданным параметрам.

Кусочно-линейная аппроксимация осевого момента инерции плоского сечения

Исходные условия таковы, что, имея только расчетное значение площади сечения стержня, полученное из решения задачи (1), мы приходим к некорректно поставленной по Адамару задаче [11], т. к. одному и тому же значению площади могут соответствовать несколько значений моментов инерции, что наглядно демонстрирует рис. 2. Решение таких некорректных задач осуществляется, как правило, посредством регуляризации, которая позволяет использовать некоторую дополнительную информацию для поиска решения — часто приближенного. При расчете момента инерции стержня по его площади сечения роль такой «регуляризующей информации» могут играть

табличные данные из сортамента, откуда можно брать «опорные» точки, используемые для вычисления моментов инерции.

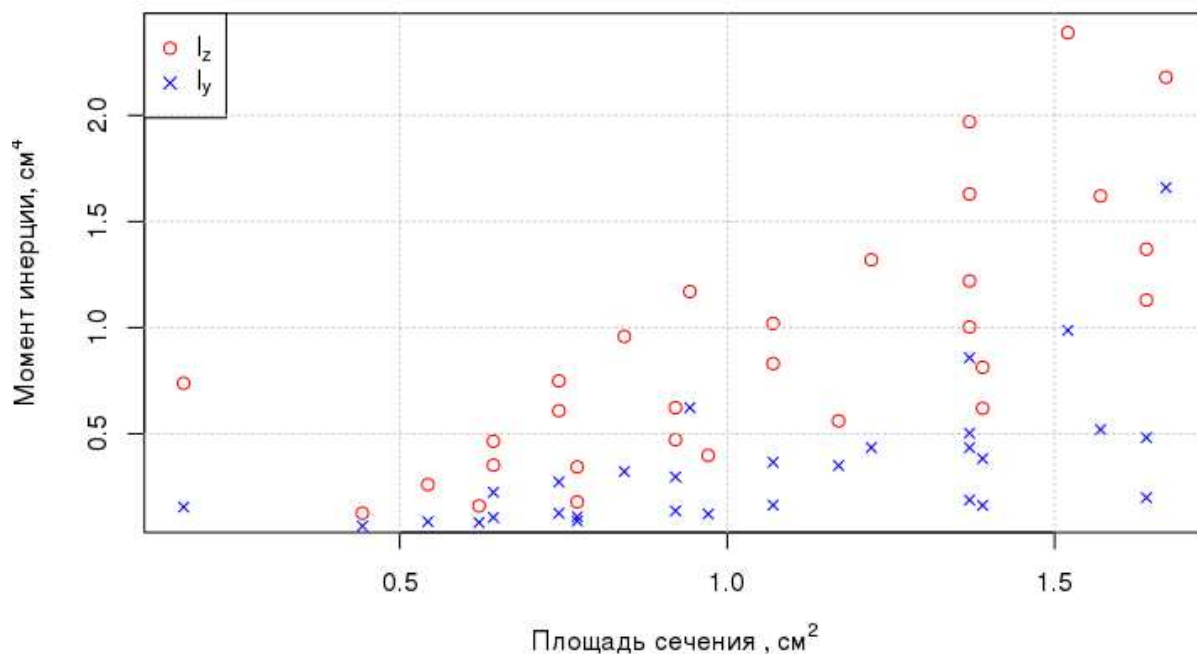


Рисунок 2 — Зависимость плоского момента инерции сечения типа «прямоугольная труба» от площади сечения

Допустим, известно расчетное значение площади сечения стержня A . Очевидно, что A будет принадлежать некоторому интервалу (A_1, A_2) , причем для значений A_1 и A_2 известны табличные значения осевых моментов инерций I_{1y} , I_{2y} , I_{1z} , I_{2z} . Проведенные численные эксперименты показывают, что с достаточной точностью значения осевых моментов инерции для I_y и I_z могут быть вычислены с помощью кусочно-линейной аппроксимации (рис. 3). Для этого запишем систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} I_{1y} = k_y A_1 + b_y \\ I_{2y} = k_y A_2 + b_y \\ I_{1z} = k_z A_1 + b_z \\ I_{2z} = k_z A_2 + b_z \end{cases} \quad (2)$$

Решая систему (2) относительно коэффициентов k_y , k_z и свободных членов b_y , b_z и выполняя подстановку A , получим:

$$\begin{cases} I_y = k_y A + b_y \\ I_z = k_z A + b_z \end{cases} \quad (3)$$

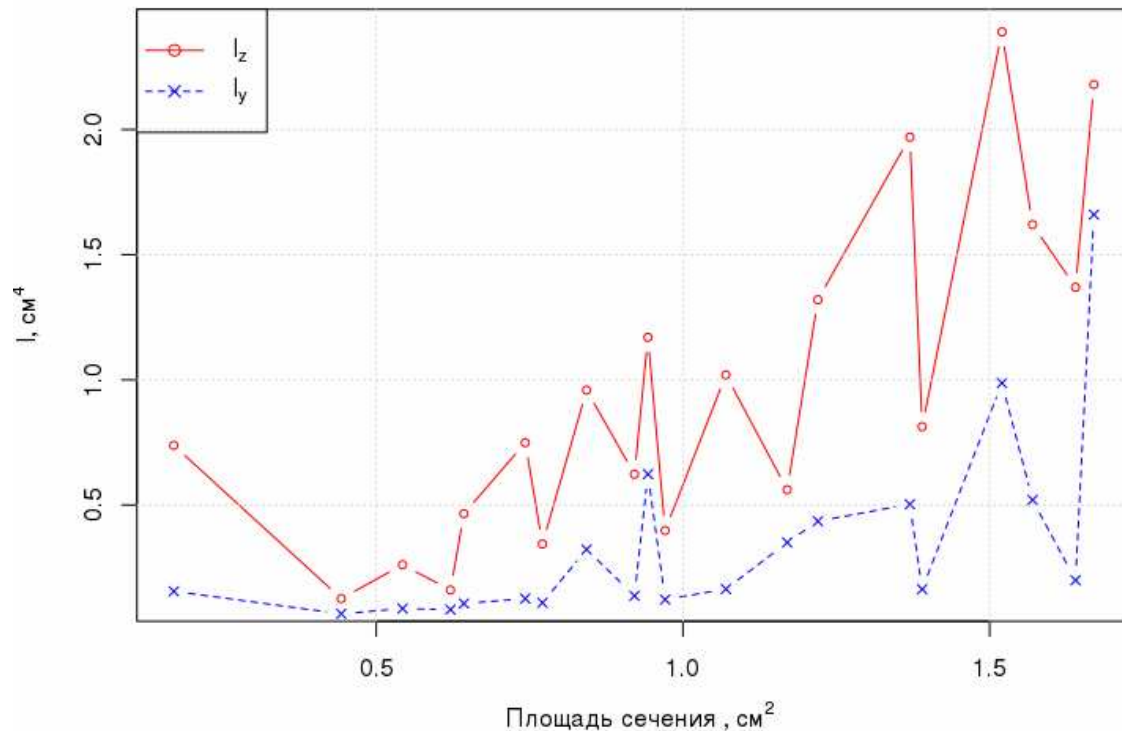


Рисунок 3 — Кусочно-линейная аппроксимация
моментов инерции сечения

Выбор оптимальной формы сечения

Используя кусочно-линейную аппроксимацию, можно определить алгоритм выбора оптимальной формы сечения в случае, если заранее эта форма не задана или не известна. Тут можно исходить из тех соображений, что при равных площадях сечений более эффективным является то, у которого осевые моменты инерции больше. На рис. 4 проиллюстрирована эта идея: в некоторых случаях выгоднее использовать квадратную трубу, в других же — прямоугольную. Алгоритм выбора оптимальной формы сечения можно свести к следующим шагам:

Вход: $S=(S_1, \dots, S_n)$ — множество таблиц сечений формата (A, I_z, I_y) ; A_i — площадь i -го стержня.

Для S_j :

Найти интервалы (A_{j1}, A_{j2}) , (I_{jz1}, I_{jz2}) , (I_{jy1}, I_{jy2})

Решить систему (3)

Если новые значения (I_z, I_y) больше предыдущих, то

Запомнить $j, (I_z, I_y)$

КонецДля

Вывод $j, (I_z, I_y)$

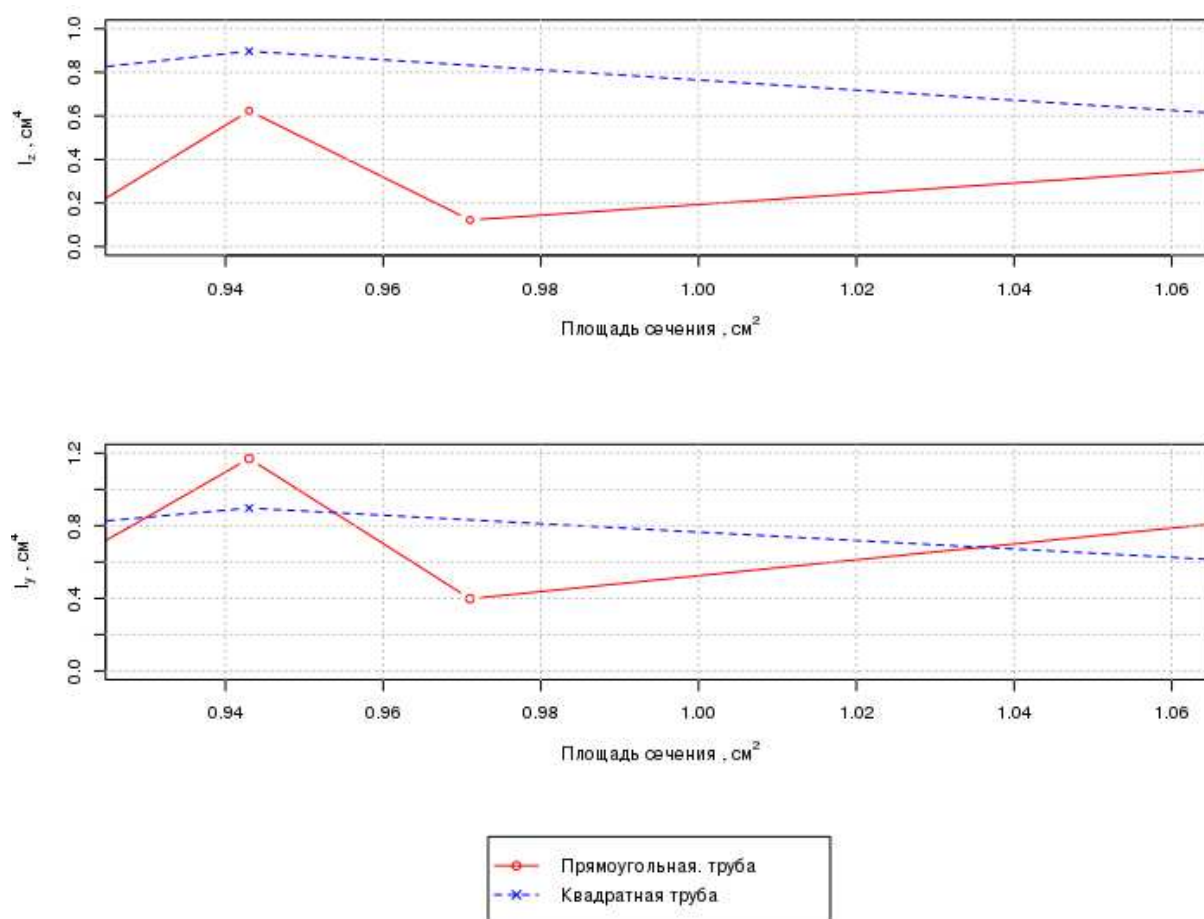


Рисунок 4 — Сравнение моментов инерции сечений типа «прямоугольная труба» и «квадратная труба»

Пример кусочно-линейной аппроксимации осевых моментов инерции стержня и выбор оптимальной формы сечения

Проведем расчет осевых моментов инерции для стержня с площадью сечения 1 cm^2 . В наличии квадратные и прямоугольные трубы (рис. 4). Имеем такие табличные данные:

Таблица 1

Данные для расчета моментов инерции

Сечение	A_1, cm^2	A_2, cm^2	I_{z1}, cm^4	I_{y1}, cm^4	I_{z2}, cm^4	I_{y2}, cm^4
Кв. труба	0.943	1.071	0.897	0.897	0.6	0.6
Пр. труба	0.971	1.07	0.122	0.398	0.366	0.831

Решая системы (2) и (3), получим, что если использовать квадратную трубу, то моменты инерции по осям Z и Y составят 0.76 см^4 . Если использовать прямоугольную трубу, то $I_z=0.19 \text{ см}^4$, $I_y=0.53 \text{ см}^4$. Очевидно, что в данной ситуации сечение типа «квадратная труба» имеет большие моменты инерции и является более выгодным.

Заключение

В статье рассмотрен вопрос аппроксимации осевых моментов инерции плоских сечений в контексте решения задачи оптимизации топологии стержневой системы. Также приведен алгоритм поиска оптимальной геометрии сечения. Применение такого подхода позволяет упростить расчеты, связанные проверкой конструкции на устойчивость. Моделирование проводилось в среде Matlab.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беленя Е. И., Гениев А. Н., Балдин В. А. Металлические конструкции. – М.: Стройиздат, 1985.
2. Валуйских В.П. Статистические методы оптимального проектирования конструкций. - Владимир: Владим. гос. ун-т, 2001. - 156 с.
3. Chen, S. An approach for impact structure optimization using the robust genetic algorithm // Finite Elem. Anal. Design. - 2001. – Vol. 37, no.5. – P.431-446.
4. Серпик И. Н., Алексейцев А. В., Лелетко А. А. Генетические алгоритмы оптимизации металлических строительных конструкций. – Брянск: Изд-во БГИТА, 2010.
5. Woon, S. Y. Structural application of a shape optimization method based on genetic algorithm // Struct. Multidiscip. Optim. - 2001. - Vol. 22, no. 1. - P. 57-64.
6. Ben-Tal A., Nemirovski A. Robust truss topology design via semidefinite programming. SIAM Journal on optimization. – 1997. - Vol. 7, no. 4. - P. 991-1016.
7. Yonekura K., Kanno Y. Global optimization of robust truss topology via mixed integer semidefinite programming // Optimization and Engineering. - 2010. - Vol. 11, no. 3. - P. 355-379.
8. Wriggers P. Nonlinear Finite Element Methods. Springer, 2008.
9. Кучеренко А.Е. Оптимизация топологии стержневых систем и их устойчивость // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 4(99). - Днепропетровск, 2015. - С.23-30.
10. Kattan P. Matlab Guide to Finite Elements. Springer, 2008.
11. Hadamard J. Sur les problemes aux derivees partielles et leur signification physique // Princeton University Bulletin.- 1902.- Vol. 13, no. 4.- P. 49-52.

Т.О. Танцура, О.М. Коробочка, О.І. Білоус

СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНЬ В МАТЕРІАЛІ ШЛІФУВАЛЬНОГО КРУГА

Анотація. Статтю присвячено висвітленню питань дослідження розподілу напружень в матеріалі шліфувального круга при дії на нього нормальної та дотичної сили. Встановлено, що напружений стан шліфувального круга зумовлений сумісною дією нормального та дотичного навантажень може визначатися складанням напружень.

Ключові слова: напруження, шліфування, нормальна та дотична сила.

Вступ

Шліфування займає значне місце в металообробці. Знос шліфувального круга відбувається в наслідок циклічного механічного, теплового навантаження шліфувальних кристалів. Періодичне навантаження кристалів призводить до циклічно змінного напруженого стану самих кристалів та матеріалу, що їх оточує. Термін руйнування (кількість циклів навантажень) з'єднання кристалів з матеріалом залежить від ряду причин, серед яких і величини сил навантаження кристалів, характер циклів зміни навантажень. Руйнування поверхневого шару шліфувального круга забезпечує появу на ній нових різальних кромок замість зношених. Системне дослідження напружень в матеріалі шліфувального круга та встановлення оптимальних умов руйнування робочого шару шліфувального круга та зносу різальних кромок – актуальна науково-технічна задача.

Найбільш повну класифікацію видів зносу абразивних матеріалів розробили Т. Н. Лоладзе і Р. В. Бокучава [1]. Вони запропонували класифікацію видів зносу абразивних матеріалів і розробили методи експериментальних досліджень властивостей абразивів, показали, що для раціональних умов роботи, абразивний матеріал повинен бути достатньою міцним та зносостійким. При недостатній міцності різальної частини вона руйнується. Відбуваються сколювання і викришування поверхневих шарів матеріалу абразиву. Доцент Д.Г. Му-

зичка [2] досліджувала ефективність шліфування твердих сплавів спрямованими обмеженням формозміни різальної поверхні шліфувальних кругів з урахуванням їх навантажень. Питання встановлення напруженого стану матеріалу шліфувального круга, зумовленого прикладеними силами не вивчалось. В роботі [3] розроблена просторова модель напружено-деформованого стану в якій кристал абразивного матеріалу утримується системою дискретних елементів циліндричної форми. В статті [4] досліджено вплив величин передніх кутів шліфувальних зерен на напружений стан окремо взятого кристалу. При дослідженні враховували його форму та орієнтацію в тілі інструмента. Взаємодію кристалу абразивного матеріалу з матеріалом, що з'єднує окремі зерна поміж собою не враховували.

Постановка задачі дослідження

Розглянемо розподіл напружень в матеріалі шліфувального круга при дії на нього нормальної та дотичної сили. Відцентрові сили враховувати не будемо. Їх вплив, на нашу думку, достатньо вивчено. Прийнемо наступну фізичну модель шліфувального круга та його навантаження. Круг уявляє собою пружний циліндр виготовлений з ізотропного матеріалу. Внутрішній діаметр циліндра нерухомо приєднаний до оправки. На зовнішню циліндричну поверхню круга діють рівномірно розподілені по ширині та дузі нормальна сила тиску та дотичне навантаження. Напружений стан круга – плоский. Зовнішній та внутрішній радіуси круга позначимо літерами r_0 та R . Віднесемо круг до полярної система координат. Відповідно до прийнятої фізичної моделі, маємо наступні граничні умови:

$$\begin{aligned} \text{а) по поверхні } r &= r_0 \\ r_r &= r_\beta = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{б) по поверхні } r &= R \\ R_r &= \begin{cases} 1 & \text{коли } -\frac{\delta}{2} \leq \beta \leq \frac{\delta}{2} \\ 0 & \text{коли } -\frac{\delta}{2} > \beta > \frac{\delta}{2} \end{cases} \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{для випадку нормального наванта-} \\ \text{ження,} \end{array} \quad (2)$$

$$R_{\beta} = \begin{cases} 1 & \text{коли } -\frac{\delta}{2} \leq \beta \leq \frac{\delta}{2} \\ 0 & \text{коли } -\frac{\delta}{2} > \beta > \frac{\delta}{2} \end{cases} \text{ для випадку дотичного навантаження}$$

ня

(3)

де δ – кут дуги контакту шліфувального круга з матеріалом.

Рішення поставленої задачі

Розподіл напружень в крузі визначимо з використанням функції напружень (функції Ері) $\phi(r, \beta)$ [5].

$$\phi(r, \beta) = B_0\beta + A \ln(r) + Br^2 \ln(r) + Cr^2 + (B_1r^3 + C_1r^{-1} + D_1r \ln(r)) \cos(\beta) - \frac{2D_1}{1-\mu} r\beta \sin(\beta) + (A_m r^m + B_m r^{m+2} + C_m r^{-m} + D_m r^{-m+2}) \cos(m\beta).$$

(4)

де $B_0, A, B, B_1, C_1, D_1, A_m, B_m, C_m, D_m$ – невідомі сталі; μ – коефіцієнт Пуассона; $m = 2, 3, \dots$ – ціле число.

Напруження для прийнятої функції.

$$Br(r, \beta) = B_0r^{-2} + (2B_1r + 2C_1r^{-3} + D_1r^{-1}) \sin(\beta) - (A_m r^{m-2} (1-m) - B_m r^m (1+m) + C_m r^{-m-2} (1+m) - D_m r^{-m} (1+m)) m \sin(m\beta).$$

(5)

$$Rr(r, \beta) = Ar^{-2} + B(2 \ln(r) + 1) + 2Cr + (2B_1r + 2C_1r^{-3} + D_1r^{-1}) \cos(\beta) + \left(A_m r^m (1-m) + B_m r^m (m+2-m^2) - C_m r^{-m-2} (m(1+m)) + D_m r^{-m} (-m+2-m^2) \right) \cos(m\beta).$$

(6)

$$B\beta(r, \beta) = Ar^{-2} + B(2 \ln(r) + 3) + 2Cr + (6B_1r + 2C_1r^{-3} + D_1r^{-1}) \cos(\beta) + \left(A_m r^{m-2} (m(m-1)) + B_m r^m (m+2)(m+1) + C_m r^{-m-2} m(m+1) + D_m r^{-m} (m-2)(m-1) \right) \cos(m\beta).$$

(7)

Відносні деформації за відомих значень напружень.

$$\varepsilon_{\beta\beta}(r, \beta) = \frac{1}{E} \left[\begin{aligned} & \left(Ar^{-2}(1+\mu) + B((2\ln(r)+1)\mu - 2\ln(r)+3) - 2C(1-\mu) \right) + \\ & + (2B_1r(\mu-3) - 2C_1r^{-3}(1+\mu) - D_1r^{-1}(1-\mu))\cos(\beta) \end{aligned} \right]^+ + \\ + \left[\begin{aligned} & A_m r^{m-2} m(1-m)(1+\mu) + \\ & + B_m r^m \left((m+2-m^2)\mu - ((m+2)^2 - m - 2) \right) - \\ & - C_m r^{-m-2} m(1+m)(1+\mu) + \\ & + D_m r^{-m} \left((-m+2-m^2)\mu - ((2-m)^2 + m - 2) \right) \end{aligned} \right] \cos(m\beta) \quad (8)$$

$$\varepsilon_{rr}(r, \beta) = \frac{1}{E} \left[\begin{aligned} & \left(Ar^{-2}(1+\mu) + B((2\ln(r)+1)\mu - 2\ln(r)+3) - 2C(1-\mu) + \right) + \\ & + (2B_1r(1-3\mu) - 2C_1r^{-3}(1+\mu) + D_1r^{-1}(1-\mu))\cos(\beta) \end{aligned} \right]^+ + \\ + \left[\begin{aligned} & A_m r^{m-2} m(1-m)(1+\mu) + \\ & + B_m r^m \left((m+2-m^2) - ((m+2)^2 - m - 2)\mu \right) - \\ & - C_m r^{-m-2} m(1+m)(1+\mu) + \\ & + D_m r^{-m} \left((-m+2-m^2) - ((2-m)^2 + m - 2)\mu \right) \end{aligned} \right] \cos(m\beta) \quad (9)$$

Переміщення в крузі відповідно до (7) мають наступний вигляд.

$$u_r = \int \varepsilon_{rr} dr + f(\beta), \quad (10)$$

$$u_\beta = \int (r\varepsilon_{\beta\beta} - u_r) d\beta + f(r). \quad (11)$$

Аналіз залежностей (10, 11) показав, що для прийнятої функції (4) умова нерозривності деформацій виконується коли

$$f(\beta) = f(r) = 0.$$

Нормальне навантаження прикладене до поверхні круга симетричне. Напружено-деформований стан симетричний. Напружено-деформований стан, зумовлений дотичним навантаженням, антисиметричний. Для аналізу напружень в обох випадках достатньо визначити напруження для симетричної або антисиметричної частини. Для шліфувального круга із зовнішнім та внутрішнім радіусами 40мм та 20мм значення напружень в симетричній (антисиметричній) частинах наведені на рисунках 1 та 2. Графіки на рисунку 1 побудовані для

випадку прикладення нормальної розподіленої сили на дузі в 10 (гранична умова 2). В позначеннях напружень на це вказують індекси п.

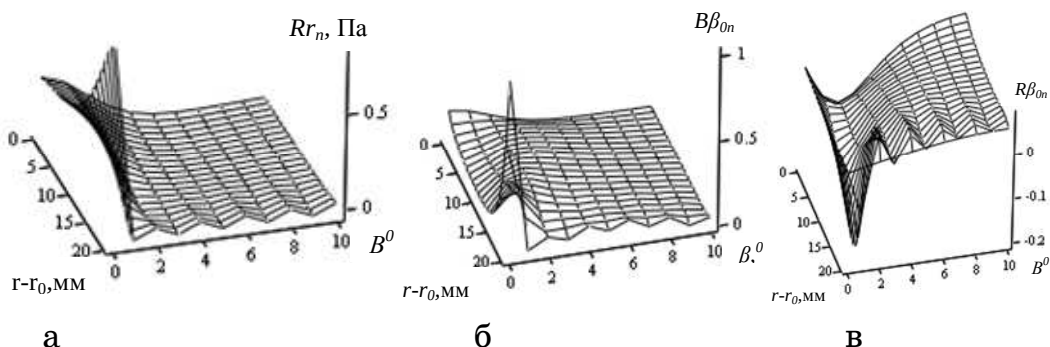


Рисунок 1 – Розподіли напружень в матеріалі шліфувального круга навантаженого розподіленою нормальною силою

Графіки б та в побудовані для напружень віднесених до максимальних напружень, зумовлених радіальним навантаженням (Rr_n). Рисунок 1 засвідчує локальність збурень напруженого стану, зумовленого згаданим навантаженням. В об'ємах матеріалу, що розташовані ближче до внутрішнього отвору в крузі, різниця напружень зменшується, але вони залишаються не рівномірно розподіленими. При цьому максимальні нормальні колові напруження близькі за значеннями до відповідних нормальних радіальних напружень, дотичні значно (в п'ять разів) менші. Інший характер розподіл напружень викликає дотичне навантаження (рис.2).

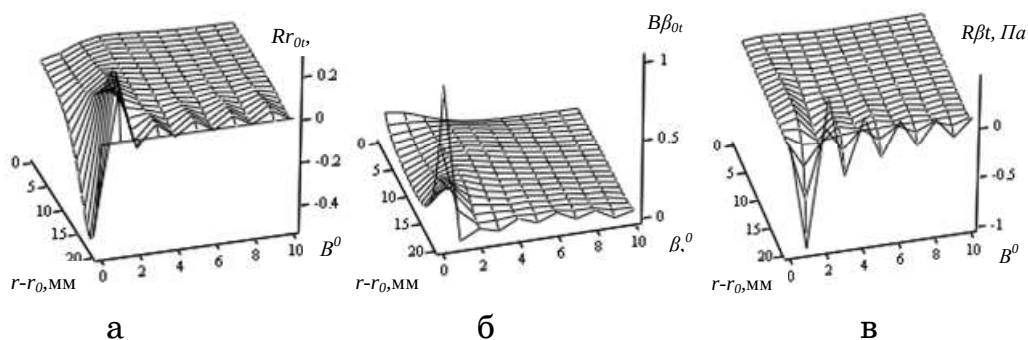


Рисунок 2 – Графіки розподілу напружень в матеріалі шліфувального круга навантаженого дотичною розподіленою силою

На графіках а та б (рис. 2) напруження показані віднесеними до максимального нормального напруження, зумовленого дотичним навантаженням. Останнє призводить до появи антисиметричних колових нормальних напружень (рис.2 б). Відповідно, і до напружень відриву кристалів абразиву від матеріалу, в якому кристали розташо-

вані. Максимальні значення таких напружень значно (понад ніж у три рази) перевищують значення максимальних дотичних напружень, обумовлених дією прикладених розподілених сил. Такі напруження, на нашу думку, більше за інші впливають на вирив кристалів з абразивного матеріалу.

На кристал, під час його взаємодії з матеріалом деталі діють обидві проаналізовані навантаження. Одночасність та періодичність їх дії в одному і тому самому обсязі матеріалу – по поверхні взаємодії матеріалу з кристалом зумовлює циклічну зміну напруженого стану матеріалу, що зв'язує кристали в шліфувальному крузі. Коефіцієнт асиметрії вказаного циклу залежить від значень нормальних колових напружень, що виникають в матеріалі шліфувального круга при одночасній дії на кристали радіального та дотичного навантаження. Він визначається відношенням

$$l = \frac{\max V\beta_n + \max V\beta_t}{\max V\beta_n + \min V\beta_t}.$$

Кількість циклів взаємодії кристалів з матеріалом до їхнього граничного зносу значно менша за 106.. Відповідно витривалість матеріалу, за такої кількості навантажень до руйнування, має розглядатися як витривалість з малою кількістю навантажень та з асиметричним циклом зміни напружень. Раціональна витривалість матеріалу, що утримує кристали в шліфувальному крузі при дії змінних колових нормальних напружень з асиметричним циклом навантажень, має дорівнювати кількості циклів взаємодії кристалів з матеріалом деталі до досягнення граничного зносу їх різальних кромки.

Розглянута нами задача лінійна. Напружений стан шліфувального круга, зумовлений сумісною дією нормально та дотичного навантажень, може визначатися складанням напружень. Отримані результати можуть бути поширені на шліфувальні круги інших діаметрів.

Висновки

Дотичне навантаження циліндричної поверхні шліфувального круга призводить до появи напружень стискання та відриву. Такі напруження більше за інші впливають на вирив кристалів з матеріалу, що їх зв'язує – на витривалість системи кристал – матеріал, що зв'язує кристали. Витривалість матеріалу за малої кількості циклів навантажень при дії симетрично змінних колових нормальних на-

пружень має перевищувати кількість циклів за яких відбувається допустимий знос різальних кромок кристалів. Подальшим напрямком системних досліджень напруженого стану матеріалу шліфувального круга доцільно вважати розподіл напружень в біля окремого кристалу в системі матеріал що зв'язує – кристал та дослідження показників витривалості матеріалу шліфувального круга, включно по поверхні адгезійного зв'язку кристала з матеріалом, при малій кількості циклів навантажень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Новоселов Ю.К. Знос абразивных зерен в круге при шлифовании заготовок / Ю.К. Новоселов, В.Б. Богуцкий, // «ВЕСТНИК СевНТУ серия «Машиноприладобудування та транспорт» – 2012. – Вып. 128. – С. 228 – 237.
2. Музичка Д.Г. Підвищення ефективності шліфування твердих сплавів спрямованими обмеженням формозміни різальної поверхні шліфувальних кругів [Текст] : автореф. дис. на здобуття канд. техн. наук.: спец. 050301 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» / Музичка Діана Геннадіївна; Чернігівський нац. технологічний університет. – Чернігов, 2015 – 20, [1] с., включ. обкл.: іл., табл. – Бібліограф.: с. 17–18.
3. Ушаков А.Н. Разработка модели напряженного-деформированного состояния «абразивное зерно – связка» /А.Н. Ушаков // Вісник НТУ «ХП». – 2014. – №42(1085). –С.59-65.
4. Коротков В.А. Геометрия и напряженное состояние ориентированных шлифовальных зерен /В.А. Коротков// Обработка металлов. – 2014. – №2 (63). –С.62-77.
5. Рекач В.Г. Руководство к решению задач по теории упругости: учебное пособие для вузов. Изд. 2 / В.Г. Рекач – М.: Высшая школа, 1977. – 216 с.

А.И. Швачка, А.В. Бородулин, Е.В. Чернецкий, О.Ю. Олейник,
Я.А. Довгополый

ПРИМИНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДОМНЫ И ПОВЫШЕНИЕ ЕЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Светлой памяти Учителя и наставника

Аннотация. Теплоэнергетическая модель доменной плавки на данном этапе развития является многозонным балансово-статистическим методом расчета, основанном на комплексных энергетических параметрах (тепловая мощность, коэффициент использования топлива, тепловой дефицит, потери тепла в рабочем пространстве). В развитие модели предложены информационные методы. Поиск перспективных энергосберегающих режимов связан с оценкой компромиссов по основным показателям плавки. Дополнительная информация по расходу кокса может быть получена в результате учета внешних тепловых потерь. Эффективность принятых решений в базовых режимах определяется устойчивостью в системе подачи дутья с учетом принципа стабилизации.

Введение

От энергетических процессов в доменной печи во многом зависит не только количество, но и качество выплавляемого чугуна. Основные идеи теплоэнергетической модели доменной плавки рассмотрены в работах И.Д. Семикина [1, 2]. Компактная форма модели отражена зависимостями производительности и удельного расход тепла топлива во взаимосвязи с энергетическими параметрами:

$$P = \frac{M_{\text{общ}} \cdot \eta - Q_{\text{ПРП}}}{\Delta J} \quad T_{\text{уд}} = \frac{\Delta J}{\eta} + \frac{Q_{\text{ПРП}}}{P \cdot \eta},$$

где P - производительность, т чугуна / час; $M_{\text{общ}}$ - общая тепловая мощность, МВт; η - коэффициент использования топлива, доля ед.; ΔJ - тепловой де-

© Швачка А.И., Бородулин А.В., Чернецкий Е.В., Олейник О.Ю.,
Довгополый Я.А., 2016

фицит, МДж/т чугуна; $Q_{\text{ПРП}}$ - внешние тепловые потери рабочего пространства печи, МВт; $T_{\text{уд}}$ - удельный расход теплоты на выплавку чугуна, МДж/т чугуна.

Величиной первого ранга в модели является общая тепловая мощность, определяющая производительность печи и характеризующаяся количеством поданного дутья, которое, в свою очередь, определяется характеристикой сети и воздухоподувной машины [3]. Характеристика сети, зависящая от качества шихты и профиля рабочего пространства печи, тесно связана с протекающими в ней физико-химическими процессами. Необходимо выполнить оценку состава топливных добавок в дутье и влияния на сопротивление со стороны печи, а также возможности функционирования доменны на предельном газодинамическом режиме.

Литературные данные показывают [4], что тепловые потери в периферийной зоне являются важнейшим фактором стабилизации и экономичности технологии доменной плавки, надежности и долговечности функционирования доменных печей. В модели внешние тепловые потери в системе водяного охлаждения определены как зависящие, учету которых не уделяется должного внимания, их величину относят к разности приходных и расходных статей баланса.

Постановка задачи

Разработать информационные методы повышения эффективности теплоэнергетической модели доменной плавки на основании инструментального измерения тепловых потерь с учетом требований к формированию дутьевого режима, синтеза результатов моделирования и вычислительного эксперимента.

Основная часть

На основании теплоэнергетической модели доменной плавки была сформулирована оптимизационная модель топливоиспользования с учетом вдувания комбинированного дутья как задача нелинейного программирования по определению экстремума одного из показателей плавки (P -производительность, K - удельный расход кокса, $T_{\text{усл}}$ - удельный расход условного топлива) при ограничениях, обеспечивающих текущие и перспективные режимы плавки [5]. При рассмотрении варианта оптимизационной задачи один из представленных показателей определяет целевую функцию, иные входят в состав ограничений. Многофакторные не-

линейные характеристики доменной плавки представлены полиномами второй степени:

$$P, K, T_{ycl} = f(t_{dm}, O_2, m, n),$$

где t_{dm} – температура дутья, $^{\circ}\text{C}$; O_2 – содержание кислорода в дутье, %; m (n) – доля углерода природного газа- ПГ (пылеугольного топлива- ПУТ) от общего количества углерода, сгораемого на фурмах, *доля ед.*

Адекватность модели выполнена на основании статистического анализа, а также оценки значимости коэффициентов модели. Результаты расчета в табл. 1. Решения задачи согласуются с данными исследований под руководством З.И. Некрасова, Н.Н. Бабарыкина и др., полученными в условиях различных реальных условий работы и обеспечивает учет переменных режимов плавки.

Проведенная оценка влияния параметров дутьевого режима на показатели доменной плавки показала, что ни одна характеристика комбинированного дутья не дает такого эффекта как комплексное их использование (рис. 1).

Установлено, что информацию о тепловых потерях в системе охлаждения можно использовать для определения эффективности распределения газового потока, расхода кокса на покрытие внешних тепловых потерь и для получения предупреждений о расстройках тепловой работы печи. Величины тепловых потерь печей одинакового объема отличаются и зависят от длительности кампании, профиля и тепловой мощности, состояния ограждения и футеровки, газораспределения, температурно-теплового режима, марки чугуна.

Таблица 1

Прогнозируемые показатели плавки в условиях ДП № 9 ПАО «АМКР»

Показатели плавки	Критерии эффективности								
	$P \rightarrow \max$			$K \rightarrow \min$			$T_{ycl} \rightarrow \min$		
$T_{\phi z(\max)}^*$, $^{\circ}\text{C}$	190 0	210 0	230 0	190 0	210 0	230 0	190 0	210 0	230 0
Расчетные параметры комбинированного дутья									
t_{dm} , $^{\circ}\text{C}$	120 0	120 0	120 0	120 0	120 0	120 0	120 0	120 0	120 0
O_2 , %	31	31	31	31	31	31	21	21	21
V_{ng} , $\text{м}^3/\text{т}$ чуг	95	42	0	95	95	95	48	0	0
G_{nym} , $\text{кг}/\text{т}$ чуг	149	142	128	149	149	149	139	132	69

Оптимальные показатели доменной плавки									
P, m $чуг/час$	395	413	429	395	395	395	290	303	309
$K, кг/т$ $чуг$	347	392	436	347	347	347	382	422	483
$T_{ysl}, кг/т$ $чуг$	631	603	579	631	631	631	596	570	558
$rd, \%$	41,6 2	51,2 5	58,9 1	41,6 2	41,6 2	41,6 2	49,8 9	58,5 6	59,7 3
$t_{кз}, ^\circ C$	305	233	157	305	305	305	373	313	244
$T_{фз}, ^\circ C$	190 0	210 0	230 0	190 0	190 0	190 0	190 0	210 0	230 0
η (КИТ), д.е.	0,27	0,31	0,34	0,27	0,27	0,27	0,32	0,35	0,36

^{*)} $T_{фз}$ – температура фурменной зоны; $V_{не}$ – удельный расход природного газа; $G_{нум}$ – удельный расход пылеугольного топлива; η (КИТ) – коэффициент использования теплоты топлива; rd – степень прямого восстановления железа по М.А. Павлову; $t_{кг}$ – температура колошниковога газа.

Удельный расход кокса, $кг/т$ $чуг$

Производительность, $т$ $чуг/час$

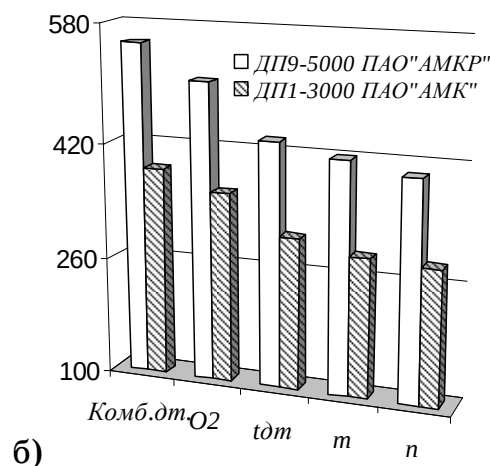
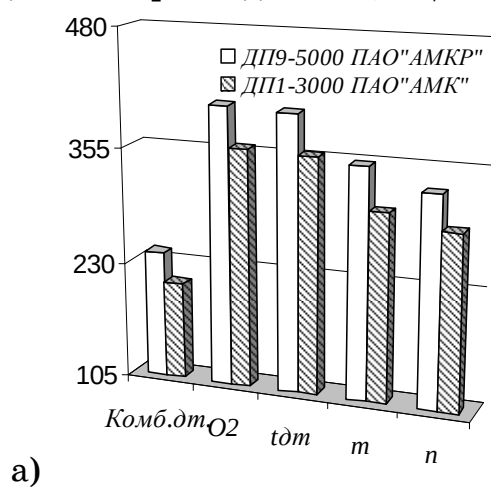


Рисунок 1 - Тенденции влияния параметров дутьевого режима на показатели плавки: Комб.дт- комбинированное дутье;

(O_2 , $t_{дm}$, m , n)- параметры дутья

Для снижения влияния неопределенности исходной информации по тепловым потерям на показатели плавки предложен метод платежной матрицы [6]. Его сущность заключается в оценке совокупных эффектов влияния вариантов дутьевого режима при фиксированном значении потерь диапазона (0 – 75) МВт, определяемых теоретически возможными значениями. Преимущественные значения параметра

находятся внутри диапазона, закон их распределения неизвестен. В результате расчетов показателей плавки составлены платежные матрицы и рассчитаны характерные оценки (различные подходы к расчету затрат производства). К ним относится функция риска (табл. 2), которая представляет перерасход, который будет иметь место в случае выбора варианта вместо рассчитанного.

Таблица 2

Потери по производству (ΔP) и расходу коксу (ΔK) без контроля потерь

Дутье	Отклонение показателей плавки							
$t_{dm}, ^\circ C$	ΔK_1^*		ΔK_2		ΔK_3		ΔK_4	
	кг/т чуг	%	кг/т чуг	%	кг/т чуг	%	кг/т чуг	%
1000	31	9	33	9	34	9	38	9
1100	15	4	16	4	17	4	19	5
1200	0	0	0	0	0	0	0	0
$t_{dm}, ^\circ C$	ΔP_1		ΔP_2		ΔP_3		ΔP_4	
	т чуг/час	%	т чуг/час	%	т чуг/час	%	т чуг/час	%
1000	20	5	18	4	20	5	21	6
1100	10	2	9	2	10	3	9	2
1200	0	0	0	0	0	0	0	0

^{*)} - нижний индекс определяет величину внешних тепловых потерь соответствующего варианта расчета:

1- 0МВт, 2- 25МВт, 3- 50 МВт, 4- 75МВт

На основании характерных оценок сформулированы критерии принятия решения. Метод позволяет получить несколько рациональных вариантов, что определило необходимость перехода к инструментальным измерениям потерь.

Выполненные измерения потерь теплоты калориметрическим методом на основании замеров температуры входящей и исходящей воды в системе охлаждения, расхода воды и обобщенный экспериментальный опыт [1] показали, тепловых потерь изменяются почти в 2 и более раз, а удельные тепловые потери, по данным теплотехнической лаборатории ИЧМ НАНУ, для ДП №3, 4 ОАО «ММК им. Ильича» а также ДП №3 ОАО «Северсталь» такого же объема изменяются практически в 5 раз. Нестабильность тепловых нагрузок указывают на не-

стабильность теплового и газодинамического режима работы печи, а также на неустойчивость гарнисажа, износ футеровки и системы охлаждения, что определяют необходимость развития центрального газораспределения. Учет внешних тепловых потерь позволяет повысить точность расчета показателей плавки на 2-10%.

Для поддержания постоянной величины тепловой мощности печи, как показывает анализ теплоэнергетической модели, необходимо обеспечить постоянство характеристик дутья. Это определяет актуальность исследования колебаний в системе подачи дутья «турбо-воздуходувка - доменная печь» («ТВД-ДП») [7].

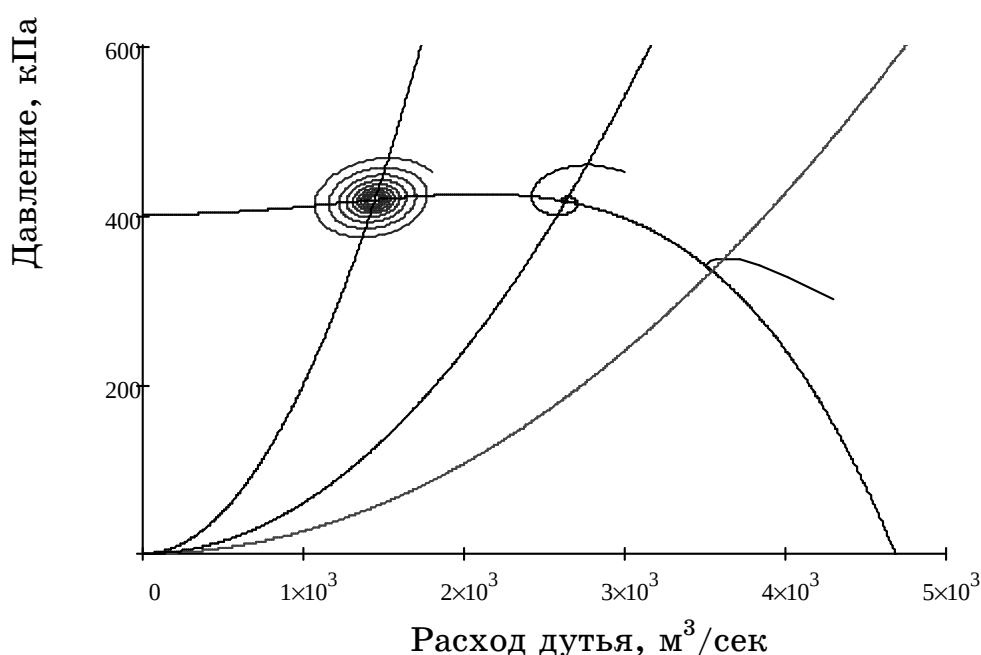


Рисунок 2 - Энергетическая характеристика ТВД при вдувании:

1 – ПГ (колебания затухающие, режим устойчивый), 2 – пылеугольного топлива (переход в автоколебательный режим), 3 – эффект автоматической стабилизации при вдувании угольной пыли (режим устойчивый, сопровождается не-сколькими колебаниями относительно задания)

В случае вдувания природного газа (рис. 2, т.1) характеристика доменной печи полагая, газодинамический режим устойчивый. При вдувании ПУТ (рис. 2, т.2) газодинамическое сопротивление печи растет, возникает автоколебательный режим. Для его исключения необходима система стабилизации, которая обеспечит переход в область устойчивости (рис. 2, т.3). Основные положения данной теории

были реализованы в системе фирмы «ССС», США на ДП №9 ПАО «АМКР» с учетом повышения давления нагнетания путём уменьшения расстояния рабочей точки ТВД от границы помпажа. Оценка влияния стабилизации [8] определила экономию расхода кокса 3-4 кг/т чугу.

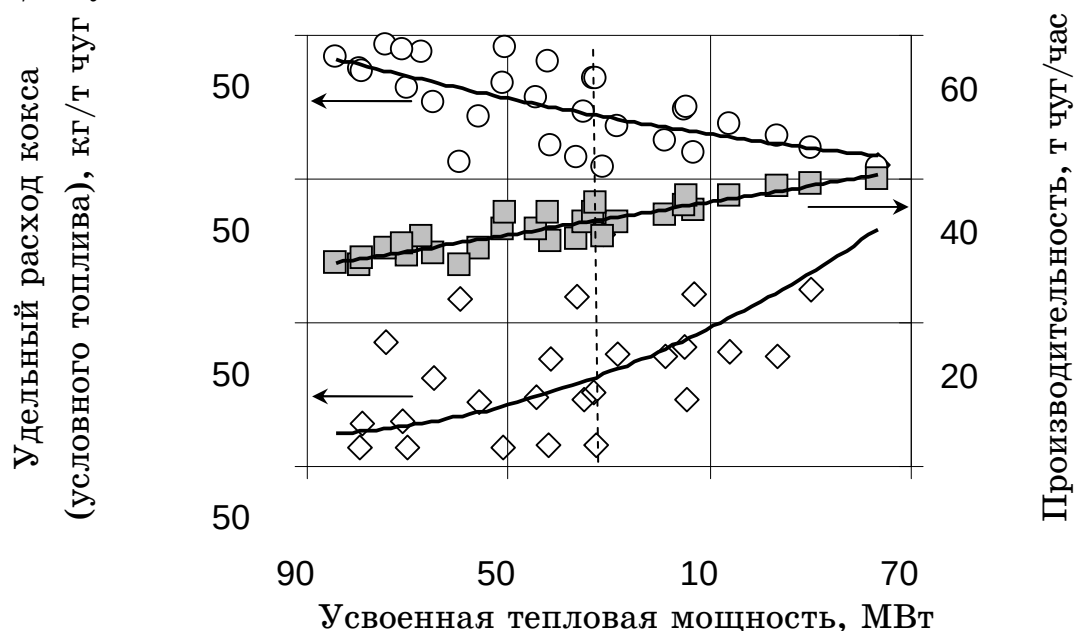


Рисунок 4 - Поиск компромиссных решений в области « $P - K - T_{ysl}$ » на ДП №9 ПАО «АМКР»: о- уд. расход условного топлива, ■- производительность, ◇- уд. расход кокса, (—) — линия тенденции показателей плавки

Дальнейшим направлением развития теплоэнергетической модели, которая уже перешла в оптимизационную форму, является изменения энергетических условий плавки и оперативной оценки компромиссных режимов плавки на основании принципа Парето [9]. Для технологической интерпретации решение перенесено на плоскость искоемых величин (рис. 4). Управление тепловым режимом плавки выполняется по анализу используемых видов топлива (газ, угольная пыль) с дальнейшим переходом на показатель производительности печи в плоскости показателя усвоенной тепловой мощности. Линия проекции (---) определила рациональный режим процесса с точки зрения энергоэффективности.

Выводы

Для совершенствования теплоэнергетической модели доменной плавки выполнена адаптация методов: платежной матрицы – для снижения влияния неопределенности исходной информации, фазово-

го пространства – для мониторинга газодинамического режима доменной печи, векторной оптимизации – для поиска компромиссных показателей плавки в развитии теплоэнергетической модели. Обоснована целесообразность контроля тепловых потерь в системе охлаждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бородулин А.В. Домна в энергетическом измерении [Текст] / А.В. Бородулин и др. - Днепропетровск, 2006. - 450 с.
2. Бородулин А. В. Вклад И. Д. Семикина в теплотехнику доменного производства и его развитие [Текст] / А. В. Бородулин, И. И. Кобеза, Н. М. Можаренко // Металлургическая и горнорудная промышленность. -1998.- № 4. С. 70–74.
3. Розенграт Ю.И. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах [Текст] / Ю.И. Розенграт, Б.Б. Потапов, В.Н. Олышанский, А.В. Бородулин. - Киев; Донецк: Вища шк. Головное изд.-во, 1986.- 296.
4. 4. Большаков В.И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки [Текст] /В.И. Большакову- Киев. Наукова думка, 2007.- 410.
5. Байбуз А. Г. Об использовании методов математического программирования в расчетах показателей доменной плавки [Текст] / А. Г. Байбуз, И.А. Лукьяненко, А.А. Сохацкий, А.Л. Чайка, А.И. Швачка // Тр. III науч. – практ. конфер. «Металлургическая теплотехника: история, современное состояние, будущее. К столетию со дня рождения М.А. Глинкова». - М. : МИСиС, 2006. - С. 136 – 141.
6. Швачка А. И. Моделирование режимов форсирования доменной плавки с учетом неопределенности информации. [Текст] / А.И. Швачка, И.А. Лукьяненко, В.Г. Зайцев, А.Л. Чайка, С.В. Нын // Науч.-техн. конфер. «Информационные технологии в металлургии и машиностроении». – С. 105-110.
7. Казакевич В. В. Автоколебания (помпаж) в вентиляторах и компрессорах [Текст] / В. В. Казакевич. - М. : Машгиз, 1976. – 262 с.
8. Романенко В. И. Управление дутьевым режимом в доменной печи с автоматической стабилизацией параметров дутья. [Текст] / В.И. Романенко, А.Г. Швец, В.С. Листопадов, А.Л. Чайка, А.И. Швачка, А.В. Бородулин // Черная металлургия. - 2006. - №2 (1274). - С. 28 – 33.
9. Швачка А. И. Разработка теоретических основ построения эффективных АСУТП при повышении числа критериев эффективности. [Текст] / А.И. Швачка, Е.В. Чернецкий, Я.А. Довгополый // Вестник национального технического университета «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Автоматика и приборостроение.- Х.: НТУ «ХПИ». – 2016- №15 (1187).- с. 55-58.

К.І. Узлов, О.В. Мовчан, К.І. Михайлова

**ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНОГО
ПРОФІЛЮ ПРОКАТУ ТА ЕФЕКТИВНОГО МАТЕРІАЛУ
ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ОБВ'ЯЗКИ
ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ**

Анотація. Запропоновані для виготовлення обв'язки вантажного вагону із прямокутної труби ефективні – основна 09Г2 та альтернативні 09Г2С, 16Г2АФ марки сталі, які відрізняються вмістом легуючих компонентів, завдяки чому мають різну кінетику структуроутворення і, як наслідок, кінцеву структуру, яка дозволяє прогнозно забезпечувати широкі можливості варіювання класу міцності виробу – 295, 345 та 440, відповідно.

Ключові слова: високоміцний металопродукт, труба прямокутна, вантажний вагон, обв'язка нижня та верхня, механічні властивості, легування, клас міцності, мікроструктура.

Вступ

«Комплексною програмою оновлення залізничного рухомого складу України на 2008 – 2020 роки» [1], пріоритетом в оновленні рухомого складу встановлене забезпечення залізниць України рухомим складом переважно «нового покоління». Це дозволить покращити техніко – економічні показники діяльності залізничного транспорту, поліпшити безпеку та зручність перевезень, підвищити конкурентоспроможність залізниць України, зробити ривок у підвищенні роботи галузі.

Поповнення інвентарного парку вагонів планується, в першу чергу, вагонами «нового покоління» з навантаженням на вісь 25 тонн, продуктивністю 112 % до наявних, пробігом до 1 млн. км.

Планується, що новий рухомий склад буде більш продуктивний та економічний.

Для створення та освоєння виробництва вантажного рухомого складу «нового покоління» та його складових частин Програмою були висунуті базові принципи [1], зокрема, такі:

* Розробка типових технічних вимог до вантажних вагонів «нового покоління».

* Розробка та переробка нормативної документації, яка стосується подовження термінів служби рухомого складу.

* Збільшення терміну служби вагону, основних його деталей та вузлів в 1,5 – 2,0 рази.

* Застосування при виробництві вантажних вагонів матеріалів з більш високими технічними характеристиками, а також комплектуючих підвищеної надійності.

Вибір сортаменту та матеріалу для виготовлення обв'язки вантажного вагону

Верхню і нижню обв'язки вантажних вагонів виготовляють з труб круглого перетину або з профільних труб по ГОСТ 8645-68. Діаметр перетину круглого прокату повинен бути не менше 5 мм, площа поперечного перерізу не круглого прокату [2] повинна бути не менш ніж 2 см².

Оскільки вагон є коробчастою конструкцією, а обв'язка кріпиться у відповідних позиціях методом зварювання, то за доцільне прийнято використання профільної труби прямокутного перерізу.

Елементи вантажного вагону, які є об'єктом наявного дослідження, за вимогами залізничних стандартів ГОСТ 5267.0-90 та ГОСТ 5267.4-90 виготовляють з низьколегованих та легованих сталей 09Г2, 09Г2С і 16Г2АФ за ГОСТ 19281-14.

Аналіз кінетики структуроутворення та властивості сталі 09Г2 для виготовлення обв'язки вантажного вагону

Типова мікроструктура сталі 09Г2, яка формується відповідно до термодинамічної діаграми [3] наведена на рисунку 1. Рисунок 1 свідчить про те, що основу структури марганцевої сталі 09Г2 в нормалізованому стані формує ферит, в якому при охолодженні на повітрі відбуваються дифузійні і зсувно-дифузійні перетворення з утворенням феритних, перлітних і бейнітних структурних складових.

Механічні властивості, що забезпечуються структурним станом (див. рис. 1) Ф+П+Б, гарячекатаного прямокутного профілю за ГОСТ 13663-86 зі сталі 09Г2 за ГОСТ 19281-14 для обв'язки вагона по ГОСТ 5267.4-90 представлені в таблиці 1.



Рисунок 1 - Мікроструктура (x400) сталі 09Г2 прямокутної труби в гарячекатаному стані поставки

Таблиця 1

Механічні властивості гарячекатаного прямокутного профілю для обв'язки вагона

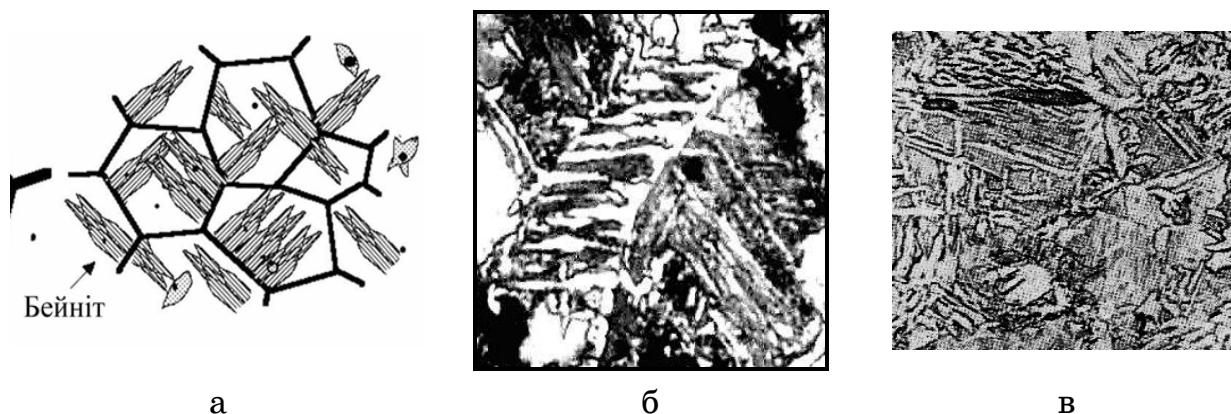
Марка сталі	Тимчасовий опір руйнуванню σ_B , Н/мм ²	Межа плинності σ_T , Н/мм ²	Відносне видовження δ_5 , %	Ударна в'язкість КСУ, Дж/см ²			Вигин до паралельності сторін (а-товщина зразка, d-діаметр оправки)
				при температурах, °С		після мех. старіння	
				-40	-60		
не менше							
09Г2	430	295	21	34	—	34	d=2a

Тобто, низьколегована гарячекатана сталь марки 09Г2 прямокутної труби з хімічним складом за ГОСТ 1928-14 забезпечує розпад аустеніту при безперервному охолодженні відповідно до термкінетичної діаграми [3] з формуванням ферито – перліто – бейнітної структури (рис. 1), завдяки якій клас міцності виробу забезпечує показник 295 (див. табл. 1).

Аналіз кінетики структуроутворення та властивості сталі 09Г2С для виготовлення з прямокутного профілю обв'язки вантажного вагону

Введення в низьковуглецеву сталь ~ 1% кремнію підвищує критичні точки і збільшує міжкритичний інтервал температур. При цьому розширюється область виділення надлишкового фериту, а області розпаду по перлітному і бейнітному механізму зміщуються у бік менших швидкостей охолодження.

Згідно з класичними уявленнями [4] ініціатором бейнітного росту є ферит. Перетворення здійснюється з формуванням роздільних платівок фериту уздовж специфічних кристалографічних площин аустенітного зерна [5]. За даними [6], бейнітна реакція здійснюється за механізмом формування пробейнітного фериту, який має голчасту морфологію. Схема цього перетворення запропонована Такахаши та Бгадешєю [7] і наведена на рисунку 2а.



б – Ч1250 (ЧЗ), в – Ч1000

Рисунок 2 – Схема формування бейнітної структури (а), морфологія пробейнітного фериту (б) та ферито – бейнітна структура дослідженої сталі 09Г2С (в)

Морфологія такого пробейнітного фериту голчаста (див. рис. 2 б). Завдяки цьому зернограничний ферит у сформованій таким чином структурі практично не виявляється як самостійна складова – рисунок 2 в.

У сталі 09Г2С, водночас із низьким вмістом легуючих добавок (що позначається на її собівартості), так само низький вміст вуглецю, що забезпечує хорошу зварюваність і технологічність, як конструкційного матеріалу. При цьому при малій кількості легуючих елементів (а головне – при відсутності дорогих легуючих елементів, таких як Cr, В, Ni, Мо) все ж таки досягається комплекс потрібних механічних характеристик (табл. 2).

Механічні властивості сталі 09Г2С за вимогами ГОСТ 19281-14

Марк а сталі	Тимчасови й опір руйнуванн ю σ_B , Н/мм ²	Межа плинност і σ_T , Н/мм ²	Відносне видовженн я δ_5 , %	Ударна в'язкість КСУ, Дж/см ²			Вигин до паралельнос ті сторін (а-товщина зразка, d-діаметр оправки)
				при температурі , °C		після мех. старінн я	
				-20	-40		
	не менш						
09Г2 С	480	345	21	-	34	29	d=2a

Таким чином, низьколегована гарячекатана сталь марки 09Г2С прямокутної труби з хімічним складом за ГОСТ 19281-14 забезпечує розпад аустеніту при безперервному охолодженні відповідно до термодіаграми [8] з формуванням ферито-бейнітної структури (див. рис. 2 в) з голчастою морфологією фериту бейніту, завдяки чому клас міцності виробу досягає показника 345 (див. табл. 2). Найважливіше те, що досягнутий ефект забезпечується в даному випадку завдяки легуванню базової сталі не коштовним і не дефіцитним елементом – кремнієм.

Аналіз кінетики структуроутворення та аналіз властивостей сталі 16Г2АФ для виготовлення з прямокутного профілю обв'язки вантажного вагону

Аналіз термодіаграми [8] сталі, що вміщує нітридоформуючі частки, свідчить про очевидно бейнітний характер структуроутворення при повітряному її охолодженні з незначною кількістю феритної складової очевидно пробейнітного походження.

Приймаючи до уваги той факт, що, за даними [4, 6], ферит є ініціатором бейнітного росту, верхній бейніт формується з зародження та росту фериту з парарівноважним вмістом вуглецю і є, за визначенням [9], пробейнітним.

При цьому, на діаграмах ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту в проміжній області температур немає окремого інтервалу формування добейнітної α -фази [10, 11]. Пов'язано це, за дани-

ми [8, 12], з тим, що відповідний дилатометричний аналіз фіксує теплові ефекти перетворення, які обумовлені характеристичними термодинамічними властивостями фаз без урахування кінетики їх утворення. Тобто, акти формування бейнітного голчастого або поліедричного фериту по границях зерен дилатометрично індивідуально не відокремлюються, внаслідок термодинамічної ідентичності феритної фази в обох випадках.

За даними [13], якщо механізм бейнітного перетворення розглядати через зростання бейнітного фериту як відманштетту, у двофазній області нижче за евтектоїдну температуру [10] перетворення має ступінчасту кінетику. Тобто, різноманітні механізми релаксації за теорією Курдюмова – Ройтбурда [14, 15] призводять до того, що вся температурна область перетворення поділяється на ряд температурних ділянок. В межах кожної ділянки реалізується свій механізм релаксації, а кожне перетворення характеризується своєю С-подібною діаграмою [6, 15].

З огляду на розглянуту вище ступінчасту кінетику, стає зрозумілою варіантність проміжної реакції після формування пробейнітного фериту. Її можна описати у такий спосіб:

- після автогальмування бейнітного перетворення з формуванням пробейнітного фериту, зі збагаченого вуглецем аустеніту можуть випасти карбіди, що обумовить дифузійний розпад аустеніту за перлітним механізмом,
- після формування пробейнітного фериту і, як наслідок, перерозподілення вуглецю проміжне перетворення продовжиться з формуванням бейніту з голчастою або пірчастою морфологією, в залежності від температурних параметрів зсувно-дифузійної реакції,
- якщо при частковому проміжному перетворенні з виділенням пробейнітного фериту має місце підвищення вмісту вуглецю в залишковому аустеніті (і навіть завдяки цьому [15]) при подальшому охолодженні реалізується зсувна реакція формування мартенситу,
- розглянута у попередньому випадку концентрація вуглецю у залишковому аустеніті може сягнути значень, які є достатніми для повної стабілізації аустеніту. Тоді по завершенні реакції фазовий склад такого бейніту ферито-аустенітний.

Крім того, в роботах [6, 7] показано, що внутрішньозеренні платівки голчастого фериту, що формуються на гетерофазних включеннях (рис. 3), підвищують в'язкість без зміни міцності.

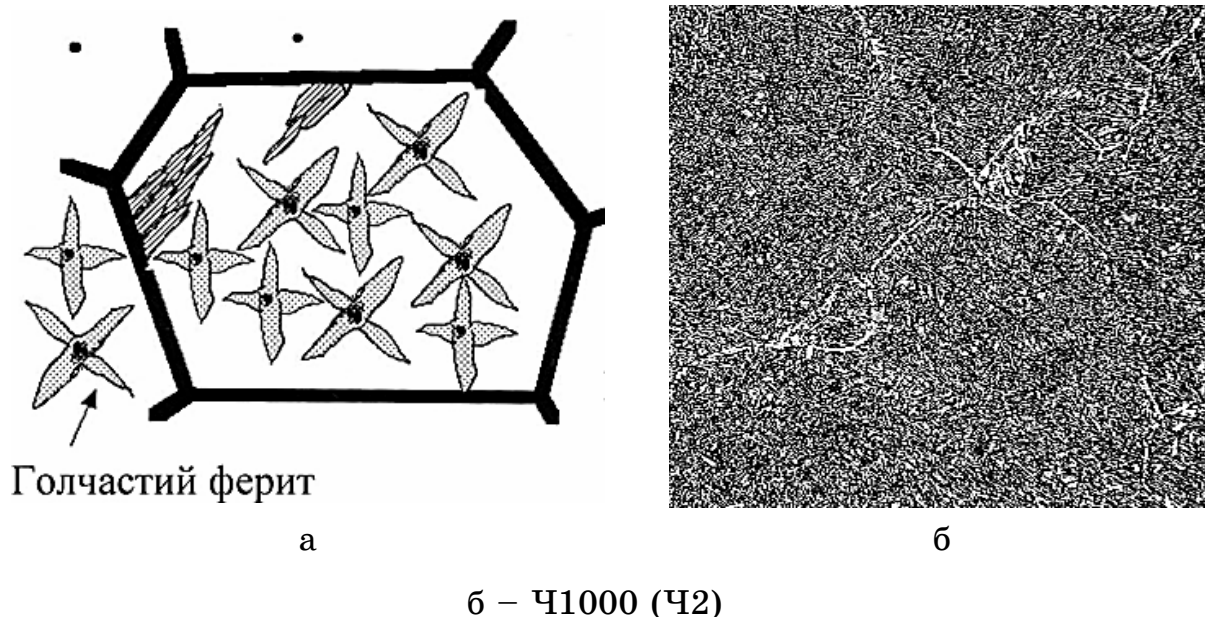


Рисунок 3 – Схема гетерофазного формування голчастого пробейнітного фериту (а) та мікроструктура дослідженої сталі 16Г2АФ (б)

Щодо механізму росту голчастого фериту у цьому випадку, автор [16] стверджують, що таке перетворення демонструє феномен незавершеної реакції, який є також характерним для бейніту. За твердженням автора [6], гетерофазно зароджений голчастий ферит відрізняється від бейніту *тільки внутрішньозеренним розміщенням* при наявності великої кількості включень (рис. 3 а), на відміну від випадку формування в позиціях границі (див. рис. 2 а) аустенітного зерна [6, 7, 16].

Тобто за даними проведених досліджень встановлено, що легована ванадієм та азотом сталь 16Г2АФ в результаті охолодження на повітрі (нормалізації) гарантовано отримує структурний стан – бейнітні структури (інтрагранулярно зароджений голчастий ферит) підвищеного ступеня диференціювання. Доля такої структурної складової досягає 95 % (див. рис. 3 б). При цьому формується високий комплекс механічних характеристик зміцненого матеріалу (див. табл. 3).

Механічні властивості сталі 16Г2АФ за вимогами ГОСТ 19281-14

Марка сталі	Тимчасовий опір руйнуванню $\sigma_{\text{в}}$, Н/мм ²	Межа плинності $\sigma_{\text{т}}$, Н/мм ²	Відносне подовження δ_5 , %	Ударна в'язкість КСУ, Дж/см ²			Вигин до паралельності сторін (а-товщина зразка, d-діаметр оправки)
				при температурі, °С		після мех. старіння	
				-70	-40		
не менш							
16Г2АФ	590	440	19	29	39	29	d=2a

Таким чином, низьколегована гарячекатана сталь марки 16Г2АФ прямокутної труби з хімічним складом за ГОСТ 19281-14 забезпечує розпад аустеніту при безперервному охолодженні відповідно до термодинамічної діаграми [8] з формуванням бейнітної структури (рис. 3 б) з інтрагранулярно зародженим на гетерофазних границях нітридних включень голчастим феритом, завдяки чому клас міцності виробу досягає показника 440 (див. табл.).

Висновки

За результатами дослідження трубного сортаменту, призначеного для виготовлення верхньої і нижньої обв'язки вантажних вагонів, обґрунтована доцільність використання профільної труби прямокутного перерізу з визначеною площею поперечного перерізу не круглого прокату.

За даними аналізу вимог нормативно-технічної документації обрані раціональні матеріали прямокутного металопрокату вагонобудівного призначення для виготовлення обв'язки вагону – основна марка сталі 09Г2 та альтернативні – 09Г2С, 16Г2АФ.

На підставі проведених досліджень, в роботі встановлено, що основна 09Г2 та альтернативні 09Г2С, 16Г2АФ марки сталі відрізняються вмістом легуючих компонентів, завдяки чому мають різну кінетику структуроутворення і, як наслідок, кінцеву структуру, яка дозволяє прогнозно забезпечувати широкі можливості варіювання класу міцності виробу – 295, 345 та 440, відповідно.

ЛІТЕРАТУРА

1. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008 – 2020 роки. – Київ: Укрзалізниця, ДНДЦ УЗ. 2009. – 299 с.
2. Шевченко П. И. Вагоны промышленного железнодорожного транспорта/П. И. Шевченко, А. В. Горбенко. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1980.– 224 с.
3. Швейкин В.П. Микроструктура и фазовый состав низкоуглеродистых сталей после нагрева в межкритический интервал температур / В.П. Швейкин, В.А. Хотинков, В.М. Фарбер// Изв. Вузов, Черн. Мет., № 6, 2008. – с. 39-43.
4. Smith G. Lattice Relationships in Decomposition of Austenite to Pearlite, Bainite and Martensite / G. Smith, R. Mehl // Trans. AIMME. – 1942. – Vol. 150. – P. 143-154.
5. Davenport E.S. Transformation of Austenite at Constant Subcritical Temperatures / E.S. Davenport, E.C. Bain // Trans. Met. Soc. AIME.–1930.–Vol. 90.–P.117-128.
6. Bhadeshia H.K.D.H. Bainite in Steels. 2nd Edition. The University Press, Cambridge, 2001. – 454 p.
7. Takahashi M. A Model for Transition from Upper to Lower Bainite / M. Takahashi, H. K. D. H. Bhadeshia // Mat. Sci. and Tech.– 1990. – Vol. 6. – P. 592-603.
8. Попова Л.Е. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета – раствора в сплавах титана: Справочник термиста / Л.Е. Попова, А.А. Попов. – М.: Металлургия, 1991. – 503 с.
9. Honeycombe R.W.K. Phase Transformations in Ferrous Alloys, eds. A.R. Marder and J.I. Goldstein, The Met. Soc. Of the AIME, Warrendale, Pennsylvania, 1984. – P. 259-280.
10. Fisher J. C. Thermodynamics in Physical Metallurgy / J.C. Fisher. – Cleveland: ASM, 1950. – 201 p.
11. Свищенко В.В. Образование мезоферрита и зернистого бейнита в низкоуглеродистой низколегированной стали / В.В. Свищенко, Д.П. Чепрасов, О.В. Антонюк // Митом. – 2004. - № 8. – С. 7-11.
12. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел / С.И. Новикова. - М.: Наука, 1974.- 294 с.
13. Кризement О. Бейнитная реакция в высокоуглеродистых сталях / О. Кризement, Ф. Вефер // Фазовые превращения в сталях. - М.: Металлургиздат. - 1961. – С. 138 – 148.
14. Roitburd A.L. The Nature of Martensitic Transformation / A.L. Roitburd, G.V. Kurdjumov // Mat. Sci. Eng. - 1979. - V.39. – P. 141-167.
15. Курдюмов Г.В. Превращения в железе и стали / Г.В. Курдюмов, Л. М. Утевский, Р. И. Энтин. – М.: Наука, 1977. – 236 с.
16. Bhadeshia H.K.D.H. Bainite: The Incomplete Reaction Phenomenon and the Approach to Equilibrium. Proc. Of the Int. Solid-Solid Phase Transf. Conf., Pittsburgh, 1981, Publ. by The Metal. Soc. of the AIME, Warrendale, PA, USA, pp. 1041-1048.

METHOD OF BIOMEDICAL TIME SERIES PROCESSING FOR PATHOLOGY CLASSIFICATION

This paper presents the new approach of biomedical time series processing for feature extraction based on chaos theory. Methods of nonlinear dynamics for processing of time series allow us to obtain significant features of physiological signals. Using of the F-transform for phase space diagrams approximation provides more high accuracy of classification. It has been demonstrated that signals of breathing have a fractal properties. Application of fractal analysis will allow developing new approaches for pathology identification.

Keywords: Signal processing, Feature extraction, F-transform, Approximation, Classification.

Introduction

Medical diagnosis is very complex process. It is a complex of objective and subjective methods for estimation of diagnostic parameters. Most objective methods are based on time series processing for diagnostics task.

Time series processing is a well-studied task. The data scientists usually employ two approaches: analysis of global integral statistical properties of signals or analysis of significant parts of signal [1]. A lot of papers use linear models, where time series are transformed in stationary series through differentiation. However, physiological processes have high complexity, all of them are nonstationary and nonlinear. Some of them have a chaotic behavior and many types of components, such as trends, impulses, other uncontrolled features. So, representation of physiological time series by linear model is not suitable.

In recent years, there has been a dramatic increase in the use of computation-intensive methods to analyze biomedical signals. The general approach falls under the methods of artificial intelligence or machine learning for decision-making in medicine. Such methods require a dataset of significant features that will be fully representative of underlying biological processes. Several techniques using non-linear chaos fea-

tures of the signal have been proposed for classification and prediction purposes in [2-4]. The list of applications includes automated electrocardiogram (ECG) or electroencephalogram (EEG) analysis for cardiovascular or neurological disorder diagnosis [5, 6]. The principal task of non-linear approach is to examine the possible existence of chaotic properties in the signal [7].

Previous work [8] is devoted to identification of fractal properties of time series using signals of nasal breathing. These properties allow identification hidden features in time series. The main task of current paper is to find significant features of time series of breathing signals derived from the data itself for pathology classification task.

Materials and methods

A wide variety of methods for evaluating the parameters of nasal breathing is used in rhinology [9]. All of them have common disadvantage: lack of objective criteria for differential diagnosis of rhinological pathologies. Active Anterior Rhinomanometry remains one of the most used methods for evaluating the nasal breathing function. This method is based on simultaneous registration of two parameters: differential pressure Δp and an airflow rate Q through a nasal cavity. Rhinomanometric data were recorded by a system for rhinomanometric measurements [10]. The measurements result are the time series of the differential pressure Δp [Pa] and the airflow rate Q [cm³/s] presented in Fig.1.

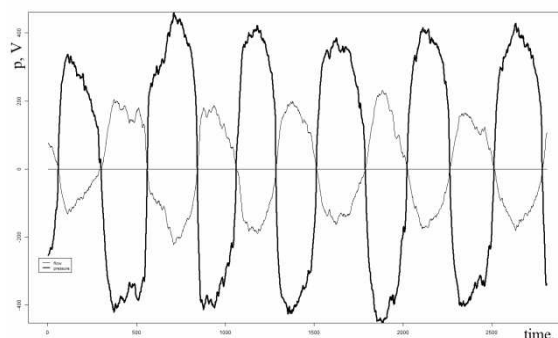


Fig.1 – The dependence of pressure and airflow rate on a time

Rhinomanometric signals are quasi periodic, nonstationary and nonlinear[8]. For validation of fractal properties of signals, we propose a calculation of Hurst parameter H and fractal dimension D according to [11]. The Hurst parameter is suggested as a measure of the degree of self-similarity of a data series because it allows the evaluation of the bursty nature of a data. Processed dataset contains 1076 measurements

of rhinomanometric signals. Result of calculation is within the range of [0.16,0.20] and the range of [1.80,1.84] for H and D respectively. It means signals have a fractal properties and process is anti-persistent.

Through this paper, we use the Rhinology laboratory of ENT Clinic "Garyuk"/laboratory of intelligent software and hardware systems of Kharkiv National University of Radio Electronics rhinologic database (<http://www.garyuk.com>). Signals were recorded using software/hardware system for rhinomanometric measurements "Optimus" [10]. Database consists of 1076 records for several groups of patients. There are patients with different types of rhinitis and rhinosinusitis, cysts, polyps, septal deviation and other. Each record contains 3 to 5 breathing cycles.

The initial data set obtained from database can hold noises. On the one side the usage of high-sensitive sensors is always associated with registration of noises. On the other side during measuring procedure an inadequate seal of the mask, incorrect connecting tubes between mask and sensors could appear. Therefore, a preprocessing of signals is required. Data preprocessing stage includes several techniques like data cleaning, data reduction, data transformation, which are described in detail in [12, 13]. An important task of preprocessing is to remove a signal distortion and don't remove the significant parts of signal. Preprocessing for time series represents a filtering of noises and smoothing of signals. Survey of filtering techniques for biomedical data has been presented in the works [14].

We used "RStudio" for signal processing and feature extraction. First of all we implement an additional filtration for removing of signal distortion. Secondly, we cut the measurements to variety of periods, which equal to one breathing cycle. Sample of one breathing cycle is shown in Fig. 2. Then we built a phase space diagram of the rhinomanometric signal. The phase space diagram of the rhinomanometric signal is constructed as follows : the differential function $\dot{x} = \partial x / \partial t$ is plotted on the Y-axis, and the original function x - on the X-axis of the phase plane. Phase space diagrams for norm and septal deviation are shown in Fig. 3, 4.

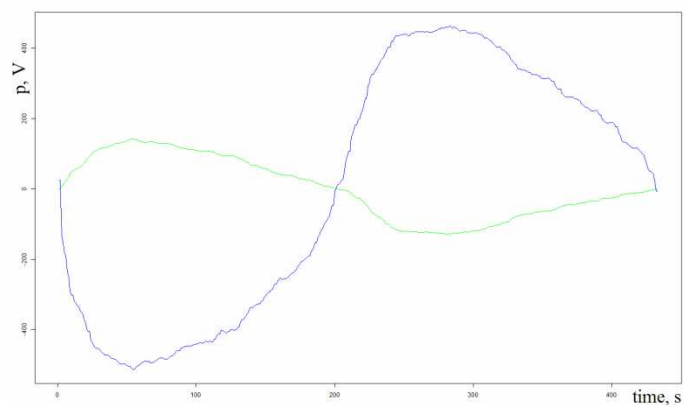


Fig. 2 – The breathing cycle

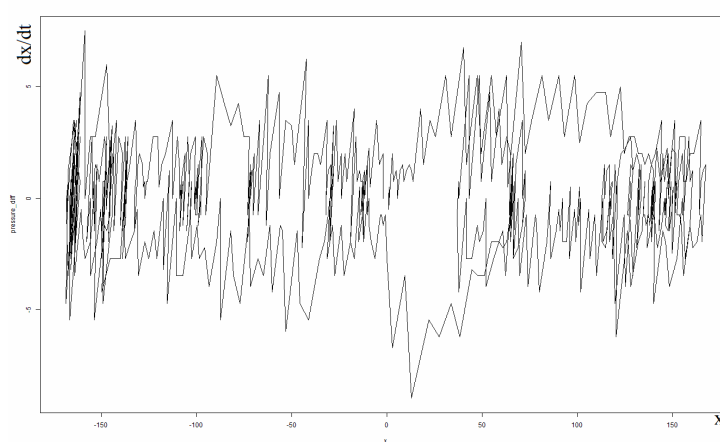


Fig. 3 – Sample of phase space diagram of differential pressure for “norm”

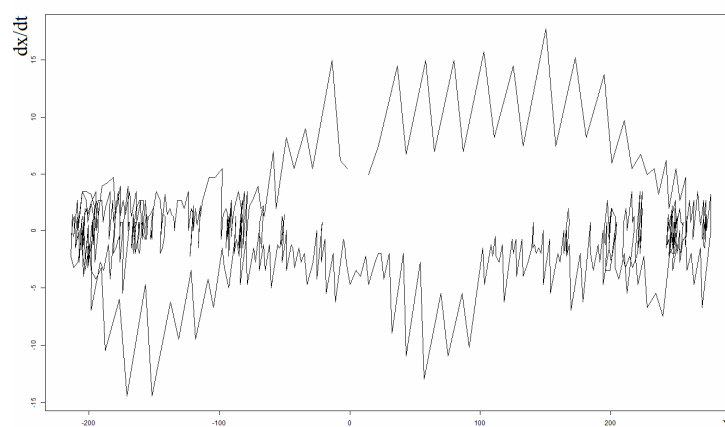


Fig.4 – Sample of phase space diagram of differential pressure for “sepal deviation”

The next stage is approximation of phase space diagram using F-transform. This approach was introduced by I. Perfilieva in [15]. F-

transform is good chose for time series. It has many advantages, among them excellent filtering properties and easy calculation. F-transform is stable with respect to the choice of points. It means that the resulting function will not be significantly changed. Let us remind the basic definitions and properties of F-transform.

The domain $D = [a, b]$ is partitioned by k fuzzy partition by fuzzy sets $\{f_1, \dots, f_k\}$. Let $P = \{a = t_1 < t_2 < \dots < t_n = b\}$ of $[a, b]$ into $n - 1$ subintervals, where t – time of signal measurement. Each subinterval $[t_{k-1}, t_k]$, $k = 2, \dots, n$ and by a family $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ of n fuzzy numbers (the basic functions), identified by their membership functions $A_1(t), A_2(t), \dots, A_n(t)$ for $t \in [a, b]$ and with the properties:

1. A_i is continuous on D ;
2. A_i - strictly increase on $[t_{i-1}, t_i]$ and strictly decrease on $[t_i, t_{i+1}]$
3. $A_i: [1..N] \rightarrow [0, 1], A_i(t_i) = 1$;
4. $A_i(t) = 0$, if $t \notin (t_{i-1}, t_{i+1})$, and assume that $t_0 = t_1 = 1, t_{n+1} = t_n = N$
5. $\sum A_i(t) = 1$ for all $t \in [1..n]$.

After that time series are transformed into k values $[F_1, \dots, F_k]$ using (1):

$$F_j = \frac{\sum X_{t_i} A_j(t_i)}{\sum A_j(t_i)}, i = 1, \dots, k \quad (1)$$

We have used triangle base function as $A(t)$ for each of fuzzy partition.

This kind of data received from human breathing, and may have different number of values in each data measurement. It related with different time of breathing cycle for each person. On other side we have a lot of machine learning approaches which require fixed count of input features for the each measurement. We propose to set count of fuzzy values equivalent to K and receive length of fuzzy partition (N) from this equation: $N = \text{floor}\left(\frac{L}{K}\right) \sqrt{b^2 - 4ac}$, where L – number of data in current measurement. We use obtained K number of F-components as in-

put data features for machine learning methods, for example SVM and Random Forest. For the comparing of approximation results we have used FFT and moving average methodes.

Let $i = 1..L$, where L - amount of calculated values of phase diagram. Represent each point with coordinates (x_i, y_i) of the shape as a complex number $z_i = x_i + y_i j$, where x_i as real part and y_i as imaginary part.

We will apply Discrete Fourier transform (DFT) to the vector $Z = z_1...z_N$ using method from [16]. As result we have received components $F = [F_0, F_1, ..., F_{N-1}]$.

Let the K - count of pairs of Fourie components F , which will be used in reduced Fourie component list $F_r : F_r = [F_0, F_1, F_2...F_K, F_{N-K}, ..., F_{N-2}, F_{N-1}]$

If we perform Inverse Discrete Fourie Trasform (IDFT) to this reduced components list, we will receive approximated representation of the phase diagram. It allows creating visualization.

Experiments and results

The classifiers implemented in this research are Support Vector Machine (SVM) [17] and Random Forest approach (RF) [18]. Set of features consists of phase space diagrams. Phase space diagrams were approximated using F-transform and FFT. Amount of elements of input data set is 1076 measurements, which were classified by otolaryngologists to the 'norm' and 'pathology' classes. Each measurement stores information about differential pressure and airflow rate.

For each classification method the set of features has been performed such that the optimal classification results are achieved.

We propose to compare a techniques based on F-transform and FFT for approximation of obtained phase space diagrams. Grafical visualization of implemented approximation techniques is shown on Fig. 5.

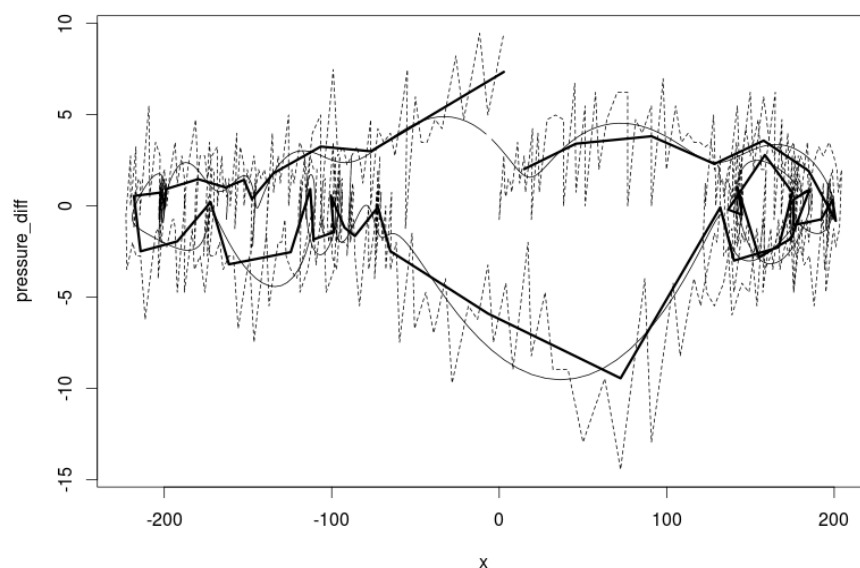


Fig. 5 - Result of approximation of phase space diagram: bold curve – F-transform approximation; faint curve – FFT approximation

The mean absolute error of approximation for FFT approach is 1.26, for F-transform approach is 0.63. Learning set takes 85% from all amount, test set takes 15% from all amount of measurements. Approximation result should be smooth or more close to initial data depends on value of the K variable. This value is discrete. Selection of this value should be performed to receive best learning values using learn/test/validation data set. K value was selected equal to 43.

Results of classification are presented in Table 1.

Table 1

Error rates for different learning methods

Method	Learning RF	Learning SVM	Test RF	Test SVM
FFT	4,4	3,6	11,8	11,7
F-transform	5,0	4,3	10,53	10,53

Conclusions

The paper demonstrates a potential of using the methods of nonlinear dynamics for processing of biomedical time series. The proposed method based on phase space diagram approximation to finding significant features of rhinomanometric signals. Approach is based on usage of the F-transform approximation of time series for generation of fixed amount of initial features of signals. It returns the value of mean absolute error less than the FFT. Supervised learning algorithms SVM and

RF were used for classification on two classes ‘norm’ and ‘pathology’. The classification accuracy with using F-transform is higher than with using FFT. Future investigation can be related with usage of 2D fuzzy transformation for approximation of rhinomanometric signals.

REFERENCES

1. Bogunovic N. Processing and analysis of biomedical nonlinear signals by data mining methods / N. Bogunovic, A. Jovic // Proceedings of 17th Conference on Systems, Signals and Image Processing IWSSIP, 2010.- P. 276-280.
2. Costa M. Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series / M. Costa, A.L. Goldberger, C.K. Peng // Phys. Rev. Lett, no.6 - 2002. – P.89.
3. Wessel N. et al. Short-term forecasting of life threatening cardiac arrhythmias based on symbolic dynamics and finite-time growth rules, Phys. Rev. no. 61(1) – 2000, P. 733-739.
4. Braun C. et al. Demonstration of nonlinear components in heart rate variability of healthy persons, Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol., no. 275. – 1998, P. 1577-1584.
5. Fainzilberg L.S. Computer analysis and recognition of cognitive space electro-cardio graphic image / L.S. Fainzilberg, T.P. Potapova // Proc. of the 6th Intern. Conf. on Computer analysis of Images and Patterns (CAIP'95) Prague, - 1995. – P. 668 -673.
6. Saprykin G. Using the characteristics of chaotic dynamics in the knowledge base of decision support system / G. Saprykin, J. Kobyt-ska, L. Kirichenko // Proc. of the International Conference on Computer Sciences and Information Technologies, Lviv, Ukraine, 14-17 September, - 2015. – P. 162-165.
7. Fraktal'nyj analiz processov, struktur i signalov, R.И. Pašenko. – Har'kov: HOOO NIO «Иkoperspektiva», 2006. – 348 s. (in Russian).
8. Nechyporenko A. Rhinomanometric signal processing for selection of formalized diagnostic criterion in rhinology / A. Nechyporenko // Telecommunications and Radio Engineering, Vol 74, no. 14, 2015. - P. 1285-1294.
9. Wallace D. The diagnosis and management of rhinitis: an updated practice parameter / D. Wallace, M. Dykewicz, D. Bernstein et al. // J Allergy Clin Immunol, no 122, - 2008. – P. 1–84.

10. Yerokhin A. A New Intelligence-Based Approach for Rhinomanometric Data Processing / A. Yerokhin, A. Nechyporenko, A. Babii, O. Turuta // 2016 IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 19-21 April, - 2016. – P. 198-201.
11. Yerokhin A. Usage of phase space diagram to finding significant features of rhinomanometric signals / A. Yerokhin, O. Turuta, A. Babii, A. Nechyporenko, I. Mahdalina // 2016 IEEE XI International Scientific and Technical Conference on Computer Science and Information Technologies, Lviv, Ukraine, 6-10 September, - 2016. – P. 198-201.
12. Data mining: concepts and techniques. Second edition, J. Han, M. Kamber, Morgan Kaufmann, Elsevier Inc. – 2006. – P. 137.
13. Data mining: practical machine learning tools and techniques – 2nd edition. I. H. Witten, E. Frank, - Amsterdam etc.: Morgan Kaufman. – 2005. – P. 214
14. Goras M. Fira Preprocessing method for improving ECG signal classification and compression validation / M. Fira Goras // PHYSCON 2009, Catania, Italy, September, 1–September, 4, - 2009, P.114-119.
15. Perfilieva I. Fuzzy transformation and its applications / I. Perfilieva and E. Chaldeevea // 4th Czech - Japan Seminar on Data Analysis and Decision Making under Uncertainty, - 2001. – P. 116–124.
16. Fundamentals of signals and systems using Mathlab, E. Kamen, B. Heck, -N.Y. Prentice Hall, 1997. – 219.
17. Data mining: practical machine learning tools and techniques – 2nd edition”, I. H. Witten, E. Frank, - Amsterdam etc.: Morgan Kaufman. – 2005. – P.139.
18. Data preparation for data mining, D. Pyle, San-Francisco etc.: Morgan Kaufmann, - 1999, P.217.

В.В. Скалозуб, Л.А. Паник

**О ПОСТРОЕНИИ ОБОБЩЕННЫХ МОДЕЛЕЙ
ПЛАНИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ
ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ**

Аннотация. В статье построены и исследованы математические модели экономических принципов равновесия для неоднородных транспортных потоков. Модели обобщают принципы Вардропы, и предназначены для анализа и планирования неоднородных потоков в транспортных сетях.

Ключевые слова: транспортные потоки, принципы Вардропы, неоднородный поток, математические модели равновесия.

Введение

Большинство транспортных потоков неоднородны – содержат элементы с различными свойствами по функциональному назначению, эффективности, требованиям к процессу транспортировки по времени, сервисам др. При планировании и рациональной организации перевозок учитывают и формируют однородные в определенном смысле процессы, исходя из главных характеристик и требований. С учетом этого разработаны различные математические модели транспортных процессов, в том числе как задач оптимального или рационального планирования [1 – 3]. Непрерывное развитие методов и средств анализа свойств элементов потоков, а также создание современных информационно-коммуникационных технологий и систем, создают возможность для все более полного учета требований и свойств отдельных категорий объектов транспортных потоков, а также их взаимодействия. В настоящее время одним из глобальных решений проблем организации и управления транспортными потоками является создание и продвижение интеллектуальных транспортных систем (ИТС) [4].

Учет специфических категорий требований или свойств объектов транспортных потоков существенно влияет на содержание и сложность соответствующих моделей и методов их анализа и плани-

рования [5]. В [1] и других исследованиях в частности рассмотрен один из подходов к моделированию и исследованию транспортных потоков, основанный на теории конкурентного бескоалиционного равновесия. Теория дает возможность достаточно адекватно описать механизм функционирования автотранспортных улично-дорожных сетей. При этом учитываются основные элементы системы, включающие в себя транспортную сеть, потребности в перевозках, критерии эффективности транспортной системы и общие принципы ее функционирования. Указанные исследования все же рассматривают однородные потоки. Вместе с тем проблемы анализа и планирования неоднородных потоков в сетях остаются актуальными.

Модели экономического равновесия для описания транспортных систем

Для выяснения отличий моделей неоднородных транспортных потоков, остановимся на некоторых вопросах моделирования процессов функционирования однородных автотранспортных сетей [1, 3]. При этом основное внимание уделим формированию принципов, отражающих содержание транспортного равновесия. В [1] выполнено исследование транспортных потоков с помощью теории экономического равновесия, как одного из наиболее агрегированных способов описания транспортных систем. Этот подход соответствует модели черного ящика, на входе которого X – это нагрузка на транспортную систему (общие затраты, направленные на перевозки), а на выходе Y – объемы грузов или количество людей, перевезенные системой. Кроме описания технологически допустимых сочетаний затрат X и выхода Y в задачу моделирования также входит формирование понятия эффективного функционирования системы, а также отбор и анализ эффективных вариантов. Полученные при этом модели являются одним из инструментов для объективной оценки эффективности проектов по модификации транспортной системы, улучшения качества транспортного обслуживания и др.

Для определения рациональных объемов загрузки транспортной сети выполняется моделирование транспортных потоков, которое рассматривается как задача принятия решений. При этом в первую очередь выявляются правила, по которым отдельные транспортные средства выбирают маршрут следования. Ряд моделей транспортного равновесия формируется на основе поведенческих принципов, кото-

рые были окончательно сформулированы в [2]. При этом постулируются два принципа.

1) Независимый выбор маршрута следования, соответствующего минимальным транспортным расходам каждого (первый принцип Вардропа, В1).

2) Выбор маршрутов следования пользователями, исходя из минимизации общих транспортных расходов в сети (второй принцип Вардропа, В2).

Согласно В1 (пользовательская оптимизация) распределение транспортных потоков соответствует конкурентному бескоалиционному равновесию, предполагающему «совершенный эгоизм» всех участников дорожного движения (выбирается маршрут, который соответствует собственным минимальным временным, финансовым и др. затратам). Этот поведенческий принцип предполагает допущения о совершенной информированности участников движения о ситуациях (знание затрат на передвижения по тем или иным маршрутам). В настоящее время такое предположение технически и информационно реализуемо, поскольку интенсивно развиваются и внедряются автоматизированные автонавигаторы и ИТС. Согласно В1 предполагается малое влияние отдельного участника движения на затраты по всем маршрутам. Заметим, что такое предположение заведомо неверно для крупногабаритных транспортных средств, неоднородных потоков, хотя приемлемо для легковых автомобилей.

Второй принцип Вардропа (системная оптимизация) предполагает централизованное управление движением в сети. Соответствующее ему распределение транспортных потоков называют системным оптимумом. Примером пользователей, передвигающихся согласно второму принципу, служат водители маршрутизированного транспорта. Ранее поведенческие принципы транспортного равновесия сформулировали Ф. Найт [3] и А. Пигу [6]. Они утверждали, что все участники движения, направляющиеся из одного узла сети в другой, распределяются по различным маршрутам таким образом, чтобы удельные (в расчете на один автомобиль) затраты на проезд были одними и теми же для всех.

Рассмотрим соотношение между конкурентным и системным равновесием. Общие затраты при системной оптимизации не могут превышать общих затрат при пользовательской оптимизации. Поэто-

му разность между совокупными транспортными затратами пользователей сети согласно первому или второму принципам Вардропа можно считать ценой несогласованности, отсутствия взаимодействия и организации участников потока. Принципиальная разница между конкурентным транспортным равновесием и системным оптимумом указана в работе А. Пигу [6], где рассмотрена простейшая транспортная сеть, состоящую из двух дуг, соединяющих два пункта: пункт А и бизнес-зону В (см. рис. 1).

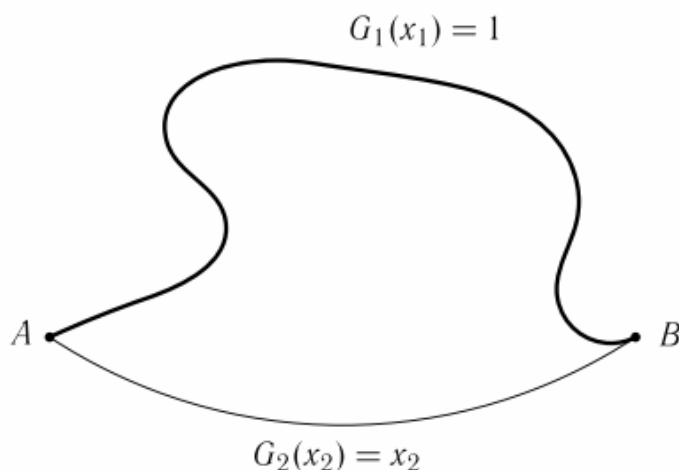


Рисунок 1 - Пример транспортной сети

Обозначим через x_1 и x_2 доли общего объема транспортного потока, следующего по первой и второй дугам. Эти пути в сети неравноценны. Первая – способна принять весь поток автомобилей из пункта А в пункт В без ограничения и замедления движения. Проезд по ней требует определенного времени G_1 , которое считаем равным часу – $G_1(x_1)=1$. Второй путь существенно короче, но здесь движение существенно зависит от величины потока, замедляется при наличии на нем значительного потока автомобилей. Считается, что время проезда по второй дороге G_2 линейно зависит от потока x_2 по ней и задается согласно $G_2(x_2)=x_2$.

В соответствии с первым принципом Вардропа равновесному транспортному состоянию будет соответствовать следующее распределение потоков (x_1 , x_2)

$$\begin{aligned} G_1(x_1) &= G_2(x_2); \\ x_1 + x_2 &= 1; \\ x_1 &\geq 0, x_2 \geq 0; \end{aligned} \tag{1}$$

откуда $x_1 = 0, x_2 = 1$; при этом оценка затрат равна

$$G(x_1, x_2) = 1 * x_1 + x_2 * x_2 = 1;$$

Для системного оптимума распределение потоков в соответствии со вторым принципом Вардропа определяется путем решения оптимизационной задачи вида:

$$\begin{aligned} G(x_1, x_2) &= 1 * x_1 + x_2 * x_2 \rightarrow \min \\ x_1 + x_2 &= 1; \\ x_1 \geq 0, x_2 &\geq 0, \end{aligned} \quad (2)$$

решение которой равно: $x_1^* = x_2^* = 0.5$; здесь $G(x_1^*, x_2^*) = 0.75$; пример показывает, что суммарные затраты в конкурентном равновесии могут составлять $4/3$ от суммарных затрат системного оптимума, что также устанавливается в других исследованиях [1].

Обобщение моделей экономического равновесия в применении к неоднородным транспортным потокам

Указанные принципы равновесия были сформулированы для однородных автотранспортных потоков [2, 3, 6]. Дадим интерпретацию этим принципам моделирования транспортного равновесия, исходя из развития методов формирования критериев оптимальности для решения задач анализа и планирования, а также с учетом введения дополнительных требований относительно «индивидуальных» свойств для классов элементов в моделях планирования и управления неоднородными потоками.

Принцип равенства удельных затрат В1 соответствует широкому классу подобных «физических принципов» оптимальности (условий рациональности), которые выдвигались в разных областях техники и технологий на начальных этапах развития теории и распространения практики вариантного и оптимального проектирования и планирования [7, 8]. Примерами подобных естественных или физических принципов, например, в области оптимального проектирования строительных конструкций (ОПК) являются «равнопрочность», «равнонапряженность», «равноустойчивость» и др. [8]. Их общность состоит в конкретных формах реализации принципа неопределенности Бернулли, что позволяет построить систему разрешающих уравнений. Как известно, принципы равенства, упрощая расчетные и вычислительные модели, в общем случае не обеспечивают оптимальности

решения (проекта) в общепринятой математической формулировке, как задач ОПК, так и других [7]. Здесь также уместно отметить множественность возможных формулировок таких принципов.

Рассмотрим вопрос обобщения принципов В1 и В2, задачи (1) и (2) индивидуальной рациональности и системной оптимизации транспортного равновесия, в условиях нескольких категорий объектов автотранспортного потока. Для простоты изложения постановки задачи и системы обозначений возьмем ту же транспортную сеть из 2-х дуг (рис. 1). Далее пусть имеем поток, состоящий из 2-х категорий автомобилей К1, К2. Обозначим $\overline{x_i^k}$ - поток по i-ой дуге объектов k-ой категории, а $x_i^{(k)}$ - доли потока k-ой категории на i-ой дуге,

$\sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^2 x_i^{(k)} = 1$. Обозначим $x_i^{(1)} + x_i^{(2)} = Z_i$ доли потока по i-ой дуге, а

$x_1^{(k)} + x_2^{(k)} = P_k$ доли автомобилей k-ой категории. $\sum_{i=1}^2 Z_i = 1$, $\sum_{k=1}^2 P_k = 1$,

Учитывая предположения модели (2) о зависимости затрат от величины потока, обозначим удельные затраты на первой дуге для двух видов транспорта β_1 , а для второй дуги β_2 . Получим математическую модель принципа равновесия в потоке В2 вида:

$$\begin{aligned} G(x_1, x_2) &= \beta_1 * Z_1 + \beta_2 * Z_2 \rightarrow \min \\ 0 &\leq \overline{x_i^k} \leq c_i^k, \quad i = 1, 2 \\ \overline{x_i^1} + \overline{x_i^2} &\leq c_i, \quad i = 1, 2 \\ \beta_1 + \beta_2 &= 1 \end{aligned} \quad (3)$$

где c_i^k - пропускная способность на i-ой дуге для k-ой категории, c_i - общая пропускная способность i-ой дуги.

От примера частного случая В2 перейдем к дальнейшему обобщению моделей Вардропа. Принцип Вардропа 1 (ОВ1) содержательно состоит в следующем: для каждой k-ой категории транспортного потока на всех его допустимых маршрутах удельные затраты (на каждую единицу потока) будут одинаковыми. При этом получаем следующую обобщенную модель принципа равновесия неоднородного потока (ОВ1):

$$\forall k : G(x_p^{(k)}) = G(x_q^{(k)}); \quad \forall (p, q) : x_p^{(k)}, x_q^{(k)} \in X^{(k)}; \quad (4)$$

$$\sum_p x_p^{(k)} = X^{(k)}, \quad \sum_k X^{(k)} = 1; \quad (5)$$

$$x_p^{(k)} \geq 0, \quad p \in I_p. \quad (6)$$

В (4) – (6) $p \in I_k$ множество индексов маршрутов для категории транспорта « k ».

Используя такие же предпосылки, обобщенный принцип Вардропа 2 (ОВ2), соответствующий требованию системной оптимизации для « k » участников потока, может быть представлен следующей моделью равновесия:

$$G_*(\bar{X}) = \sum_k \sum_i \beta_i^{(k)} (x_i^{(k)})^{(1+\gamma(i,k))} \rightarrow \min \quad (7)$$

$$\sum_k x_i^{(k)} \leq c_i; \quad 0 \leq x_i^{(k)} \leq c_i^{(k)}; \quad i \in I_X; \quad (8)$$

$$\sum_k \sum_i \beta_i^{(k)} = 1. \quad (9)$$

В модели ОВ2 (7) – (9) параметры $\beta_i^{(k)}$ удельные затраты на маршруте $x_i^{(k)}$ k -ого участника транспортного потока; $\gamma(i,k)$ – параметр, который учитывает зависимость удельных затрат по в зависимости от значения потока $x_i^{(k)}$. Например, в модели (2) этот параметр равен 1. Остальные обозначения и ограничения соответствуют модели ОВ1 (4) – (6). Так при $k=2$ и $\gamma(i,k)=1$ получаем математическую модель (7) – (9) ОВ2 в виде (3).

Реализация последней модели (3) равновесия ОВ2 позволила получить естественное заключение, что с увеличением удельной стоимости проезда транспортных средств на первой дуге растет поток по второй – $\bar{x}_2^k$. То же утверждение было получено и для транспортных средствах, следующих по первой дуге, рис. 1.

Выводы

В работе получены обобщения моделей для экономических принципов равновесия транспортных потоков Вардропа, (4) – (6) и (7) – (9). Эти модели для однородных потоков переходят в ранее известные. Заметим, что помимо них могут быть предложены и другие модели равновесия неоднородных транспортных потоков. Так вместо чистых стратегий распределения « k » категорий участников потока согласно решению (4) – (6), можно рассмотреть принцип равновесия Нэша [9] в смешанных стратегиях для некооперативных игр и др. За-

дачи описания неоднородности транспортных потоков еще не исследованы в достаточной мере, а учет различных форм неоднородности приводит к необходимости совершенствования их математических моделей, а также усовершенствования методов их реализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гасников В.А. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: Учебное пособие / А.В. Гасников и др. М.: МЦНМО, 2013. - 428 с.
2. Wardrop J. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research / Proceedings of the Institute of Civil Engineers. 1952.
3. Knight F. H. Some fallacies in the interpretation of social cost / The Quarterly Journal of Economics. 1924. V. 38, № 4. P. 582–606.
4. Скалозуб В.В. Интеллектуальные транспортные системы железнодорожного транспорта (Основы инновационных технологий) / В. В. Скалозуб, В. П. Соловьев, И. В. Жуковичский, К. В. Гончаров – Д.: Изд-во Днепропетр. нац. ун-та ж.-д. трансп. им. акад. В. Лазаряна, 2013. – 208 с.
5. Скалозуб В.В. Развитие многопродуктовых и многокритериальных моделей потоковых задач с учетом специализации носителей потоков / В.В. Скалозуб, Л.А. Паник, Є.С. Блохін. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011 - №4 - С.7-11
6. Пигу А. С. Экономическая теория благосостояния / А.С. Пигу. Т. 1 –2. Сер. Экономическая мысль Запада. М.: Прогресс, 1985.
7. Рейтман М.И., Шапиро Г.С. Методы оптимального проектирования деформируемых тел / М.И. Рейтман, Г.С. Шапиро – М.: Наука, 1976. – 268 с.
8. Лихтарников Я.М. Вариантное проектирование и оптимизация стальных конструкций / Я.М. Лихтарников – М. Стройиздат, 1979, – 319 с.
9. Воробьев Н. Н. Теория игр для экономистов-кибернетиков. / Н. Н. Воробьев. М.: Наука, 1985.

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ЗБАГАЧЕННЯ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ

Анотація. Збагачення являється комплексним складним процесом та націлене на досягнення трьох різних цілей – підвищення продуктивності, підвищення якості кінцевого продукту та зниження енергозатрат. Для досягнення корисно застосовувати до збагачувального комплексу мультиагентне керування, що дозволить розглядати кожен його механізм окремо у контексті роботи загальної системи. Доцільне використання сучасних інтелектуальних засобів автоматизованого керування – оптимальне та адаптивне керування, засоби штучного інтелекту, нечіткої логіки, генетичні алгоритми, гібридні моделі. Критичний огляд проведених досліджень показав, що дослідники звертають увагу на окремі механізми, не беручи до уваги комплекс збагачення у цілому. Подальші дослідження передбачають більш глибоке дослідження зв'язку між механізмами різних стадій подрібнення та розробку відповідної автоматизованої системи керування.

Ключові слова. Автоматизація, збагачення, мультиагентне керування, нечітка логіка, системний підхід.

Проблема та її зв'язок за науковими і практичними завданнями

Процес збагачення залізної руди є досить енергоємним та складним. Забезпечення достатньої конкурентоспроможності кінцевого продукту порівняно з виробництвом інших країн світу, зменшення собівартості продукції шляхом зниження затрат на електроенергію та зменшення втрат корисного компоненту у хвостах та підвищення його якості обґрунтовують актуальність досліджуваного питання.

Під час аналізу існуючих досліджень у сфері автоматизованого керування процесом збагачення залізної руди, було отримано висновки, що в основному дослідники звертають увагу на певні окремі механізми, оптимізуючи лише частково їх роботу і не беручи до уваги загальну систему в цілому.

Найбільша кількість робіт присвячена подрібненню залізної руди, а особливо млину першої стадії подрібнення. Це обумовлено тим, що перша стадія подрібнення є стадією рудопідготовки, вона споживає найбільше енергії (необхідні великі потужності, щоб подрібнювати великі шматки руди) та саме тут відбуваються найбільші втрати корисного компоненту у хвостах. Крім того, саме подрібнення у першій стадії визначає подальший перебіг загального процесу збагачення. Загалом процес подрібнення споживає до 70% енергоресурсів гірничозбагачувального комбінату або близько 5% енергоспоживання усього металургійного комплексу.

Аналіз досліджень і публікацій

Питання формування автоматизованого керування об'єктами гірничозбагачувального комбінату досить детально досліджено у працях [1-5, 7, 8]. Проте, більшість вчених досліджувала окремі технологічні механізми без урахування їх впливу на роботу суміжних механізмів та гірничозбагачувального комбінату у цілому. Прикладом повного огляду усього виробництва збагачення руди з точки зору його комплексної автоматизації є роботи [7, 8].

Для керування комплексом виробничих механізмів доцільно використовувати новітній метод мультиагентного управління, як одного із принципів кіберфізичних систем – складової концепції Industry 4.0 [9-10]. При керуванні ж окремими технологічними механізмами слід застосовувати сучасні засоби інтелектуального керування, такі як апарат нечіткої логіки, засоби штучного інтелекту, генетичні алгоритми, оптимальне та адаптивне керування та гібридні системи. Зокрема, при управлінні технологічними процесами досить добре себе зарекомендували автоматизовані системи керування, побудовані з використанням засобів нечіткої логіки [1, 7, 11-14].

Звертаючи увагу на існуючий досвід у автоматизованому керуванні окремими об'єктами гірничозбагачувального комбінату, можна помітити, що найбільш дослідженим є процес подрібнення залізної руди [1, 2]. Найчастіше, це контроль гранулометричного складу, керування оптимальним завантаженням млина рудою та діагностування його роботи з точки зору продовження життєвого циклу обладнання.

Не менше значення, ніж контроль вмісту корисного компоненту та діагностування аварійних ситуацій при роботі обладнання, мають способи вимірювання характеристик оброблюваної руди. Одним,

з найбільш перспективних та розвинутих методів є ультразвуковий контроль. Процеси ультразвукового діагностування пульпи досить детально розглянуто та успішно застосовано у працях [1, 4, 7, 8].

Кондратець В.О. звернув увагу на проблему складності вимірювання більшості параметрів роботи млина та характеристик стану подрібнюваної руди. Більшість параметрів або дуже складно вимірювати, або взагалі неможливо, тому доводиться нехтувати точністю вимірювання, а отже і керування. На його думку найбільш перспективним параметром для вимірювання є розрідження пульпи у млині.

Учений запропонував нову концепцію адаптивного керування, яка стала основою для вдосконалення підходів стосовно автоматичного керування розрідженням пульпи у замкнених циклах подрібнення руди [2]. Проте, не дивлячись на явні переваги запропонованого методу, він все ж є досить складним для застосування у реальних умовах. Наприклад, вираз співвідношення тверде/рідке на вході млина:

$$K_{T/P} = \frac{A_{\delta} \cdot (Q_{VP} - Q_{VBG}) + Q_{PM}}{Q_{BM} + Q_{BGM} + K_n \cdot [A_{\delta}(Q_{VP} - Q_{VBG})]} \quad (1)$$

де Q_{VP} , Q_{VBG} , Q_{BM} , Q_{BGM} – відповідно об’ємна витрата пульпи, витрата води в пісковий жолоб класифікатора, масова витрата вихідної води та води, що надходить у пісковий жолоб; A_{δ} – параметр, що залежить від густини пульпи; K_n – коефіцієнт, що визначає вміст вологи у пісках. Як видно, для розрахунку необхідно вимірювання багатьох параметрів, що потребує значних затрат.

Як бачимо, до проблеми автоматизації процесу подрібнення підходили з різних боків. перш за все, найбільшу увагу учені приділяли першій стадії, як найголовнішій; розглядали млини різних конструкцій (кульові, стержневі), типів подрібнення (самоподрібнення та з подрібнюючим середовищем), у зв’язку з наступними агрегатами (класифікатор, гідроциклон) та окремо. Були запропоновані нові методи обробки матеріалу, діагностування стану млинів, нові методи керування та ідентифікації об’єктів керування. З приводу автоматизації інших технологічних механізмів збагачувальної фабрики, то їм приділено значно менше уваги. Проте і тут є значні досягнення.

Саїтгареев Л. Н. досліджував параметри протікання пульпи для розуміння процесів розділення її тонкодисперсних компонентів та подальшого використання отриманих знань у керуванні розділенням. Вченим була розроблена математична модель, яка дозволяє роз-

рахувати розподіл дисперсних частинок в об'ємі апарата з урахуванням нестаціонарності поля швидкості та його залежності від змінної концентрації твердої фази. За результатами численного моделювання руху пульпи в гідросепараторі, проведеними за розробленою моделлю, учений запропонував показник раціонального використання об'єму гідросепаратора, що забезпечує створення зони розділення за заданим граничним зерном, і обчислюється за даними про поле швидкості суспензії, дозволяє кількісно оцінити поєднання технологічних та конструкційних рішень для створення необхідних гідродинамічних умов розділення. [3]. Отримані дані можна успішно застосовувати для керування процесами розділення пульпи та задавати дані про перебіг процесу сусіднім агентам розділюючого апарату. Проте, фізична природа руху тонкодисперсних матеріалів є дуже складною, тому отримані результати є досить приблизними. Наприклад, рівняння руху твердої частинки у рухомому потоці зі змінними властивостями:

$$\frac{dU_q}{dt} = \frac{\rho_q - \rho}{\rho_q + 0,5\rho} g - C_D \frac{3\rho}{4d_q(\rho_q + 0,5\rho)} |U_q - u| (U_q - u) + \frac{\rho}{2(\rho_q + 0,5\rho)} \frac{du}{dt} \quad (2)$$

де u , U_q – вектори швидкості твердої частинки без та з урахуванням швидкості дифузійного перенесення; ρ , ρ_q – середня густина пульпи та густина твердої частинки; d_q – діаметр еквівалентної частинці за об'ємом сфери, g – прискорення вільного падіння, C_D – емпіричний коефіцієнт опору. Усі використані у формулі показники є досить приблизними, важковимірюваними та припускають чимало допущень (наприклад ідеалізоване представлення форми твердої частинки у вигляді сфери).

Радіоновим В. М. було досить детально досліджено роботу гідроциклону у замкненому циклі подрібнення-класифікації та удосконалено його модель. Даний ефект був досягнутий шляхом інтеграції до системи керування і апріорних моделей, які містять попередню інформацію про механізм до початку роботи, і динамічних, розроблених вже у процесі роботи технологічного механізму [4]. Автором підтверджено гіпотезу про те, що найефективнішим керуючим впливом для гідроциклону є регулювання швидкості обертання піскового насоса шляхом застосування частотного приводу. Ученим підтверджено, що керуючий вплив розраховується в залежності від характеру руху частинок у потоці гідроциклону, що розраховується за рівнянням:

$$\rho V \frac{d\vec{v}}{dt} = (\rho - \rho_e) V \vec{g} + \vec{F}_D + \vec{F}_F + \vec{F}_S + \vec{F}_M + \vec{F}_B + C_{VM} \rho_e \left[\frac{D\vec{v}_e}{Dt} - \frac{d\vec{v}_\rho}{dt} \right] \quad (3)$$

де C_{VM} – коефіцієнт приєднаних мас, ρ – середня щільність частинки, V – її об’єм, ρ_e – густина несучого середовища; $\vec{F}_D + \vec{F}_F + \vec{F}_S + \vec{F}_M + \vec{F}_B$ – відповідно сили опору Фрадсена, Сафмана, Магнуса і Бассе, діючі на частинку. Проте, більшість параметрів є складно вимірюваними, особливо сили опору, діючі на частинку, а отже застосовуються приблизні табличні значення, що значно знижує точність розрахунків.

Окрім процесів підготовки руди (подрібнення, розділення) слід розглянути з точки зору автоматизації керування процеси безпосередньо збагачення. Досвід показує, що автоматизоване керування магнітним сепаратором є досить складним з точки зору застосування керуючих впливів. Найчастіше у якості керуючих впливів застосовують зміну подачі технологічної води у сепаратор та зміну напруженості магнітного поля. Проте, змінювати напруженість магнітного поля досить складно, а регулювання подачі води до сепаратора може негативно відбитися на роботі інших сепараторів секції гірничозбагачувальної фабрики. Тому зазвичай роботою магнітного сепаратора керують опосередковано, керуючи передуючими йому механізмами – млинами та гідроциклонами.

Оптимізацією роботи дешламаторів та сепараторів займався Ртищев А.Б. На основі роботи дослідника розроблені теоретичні основи та експериментально обґрунтоване створення конструкцій магнітних систем сепараторів з глибоким проникненням магнітного поля та флокуляторів з магнітними полями, близькими до однорідних [5]. Учений докладно дослідив природу магнітних процесів у сепараторах та запропонував нову їх конструкцію, що підвищить їх ефективність та покращить якість отриманого концентрату. Проте, виникає складність з практичним застосуванням отриманих результатів, адже заміна технологічних механізмів збагачення веде за собою значні затрати часу та коштів.

Проте, не завжди зміни у конструкції технологічного механізму вимагають заміни самого механізму, а отже радикальних перебудов збагачувального комбінату. Іноді достатньо здійснити надбудову, яка не заважає роботі, а лише покращує її. Наприклад, Дік, Крехіна та Міньков запропонували у нижній частині гідроциклону, недалеко від піскової насадки, встановити інжектор та детально дослідити

природу змін у процесі роботи механізму після такої надбудови. Інжектор вприскує додаткову воду поперечно до напрямку виходу пісків. Потоки води під тиском заважають проходженню мілкої фракції у піски та виштовхують її до основного потоку, щоб дрібні частки потрапили до зливу. При цьому, проходженню крупних частинок у піски нічого не заважає. На основі досліджень було встановлено, що тангенціальна інжекція (потоки вприскуваної води напрямлені до центру кола перерізу) значно покращує сепараційну характеристику гідроциклону і дає кращий ефект, ніж радіальна інжекція (вода направлена під кутом до основного потоку) [6].

Для сепараційної кривої дослідниками було отримано вираз:

$$T(d_j) = \frac{1}{1 + S \cdot \exp\left[-\frac{D_c}{2D_t} \left(V_s(d_j) - \frac{V_{inj,e}}{n+1}\right)\right]} \quad (4)$$

де $T(d_j)$ – функція сепарації для частинок розміром d_j , S – спліт-параметр, D_c – діаметр гідроциклону, D_t – коефіцієнт турбулентної дифузії; V_s , $V_{inj,e}$ – швидкості відповідно відсадження та інжекційного потоку на зрізі інжектора.

Розглянуті роботи дозволяють стверджувати, що в основному науковцями розглядаються окремі механізми лише інколи у взаємозв'язку з сумісними агрегатами, але частіше окремо, ніби ізольовано від загального процесу. Лише декілька учених розглядали технологічний комплекс збагачення залізної руди загалом.

Наприклад, Моркун Н.В. звернула увагу, що для багатьох технологічних агрегатів на залізорудних збагачувальних фабриках залежність між основними вхідними й вихідними параметрами має екстремальний характер. Крім того техніко-економічні показники, що характеризують ефективність роботи технологічних агрегатів, також необхідно підтримувати на екстремальному рівні. Саме тому дослідник застосувала адаптивне екстремальне керування для підвищення ефективності систем управління інерційними об'єктами із запізнюванням у разі нечіткої і неповної інформації про об'єкт та дії неконтрольованих збурювань [7]. Для вимірювання характеристик пульпи було застосовано ультразвукові методи, а саме вимірювання згасання хвилі Лемба після проходження через магнітне поле. Однак, тут присутні деякі похибки та припущення, обумовлені складністю вимірювань та обчислень. Наприклад, вираз:

$$I_v = I_{oo} \exp\{-k(1 - \alpha(H))l\} \exp\left\{-\frac{[(1 - W_\tau)\rho_v - W_\tau\rho_{me}]}{\rho_{пл}} C_v l\right\} \quad (5)$$

де $I_{oo} \exp\{-k(1 - \alpha(H))l\}$ - функція послаблення хвилі при відсутності контактуючого середовища; ρ_v , $\rho_{тв}$, $\rho_{пл}$ - густини відповідно води, твердої фази пульпи та вимірювальної пластини) може застосовуватися лише при припущенні строго поперечного магнітного поля, крім того, не враховується зміна у часі густин твердої та рідкої складових пульпи. Проте, застосування сучасних засобів інтелектуального керування дало змогу підтримувати бажані значення характеристик кінцевого продукту в залежності від параметрів вхідної руди. У сукупності з засобами вимірювання, що не вимагають безпосереднього втручання у збагачувальні процеси та дозволяють, таким чином, аналізувати його перебіг без зупинки самої роботи, дослідник змогла оперативно контролювати якість залізорудної сировини у реальному часі.

Наприклад, Поркуян О.В. сформулювала одну з актуальних проблем технологічного процесу збагачення залізної руди, як досягнення підвищення якості концентрату без значного збільшення витрат на виробництво. Дослідник зауважила, що це завдання неможливо вирішити без ефективного автоматизованого керування всіма процесами збагачення руд. Дослідник запропонувала гібридні моделі для апроксимації об'єктів магнітного збагачення в умовах неповної та нечіткої інформації, алгоритмічні рішення для реалізації автоматизованого адаптивного керування технологічними процесами гірничо-збагачувальних виробництв; розробила уніфіковані ультразвукові методи визначення основних параметрів залізорудної пульпи і на основі цього синтезувала систему керування технологічними процесами магнітного збагачення [8]. Проте, не дивлячись на явні переваги системи, такі як універсальність та ефективність, введенню її у експлуатацію заважає складність використовуваних методів керування

Постановка завдання

На основі проведеного критичного аналізу існуючих рішень удосконалення процесів збагачення залізної руди можна помітити, що збагачувальний комплекс у цілому не досить добре розглянутий, так як основна увага переважно приділяється окремим технологічним механізмам. Учені зазвичай розглядають окремо млини, розділяючі апарати та магнітні сепаратори з різних точок зору – розробляють

нові методи вимірювання та контролю характеристик оброблюваної руди, діагностують стан технологічних механізмів для збільшення їх довговічності, докладно заглиблюються у фізичну природу процесів обробки руди та пропонують навіть нові конструкції технологічних механізмів або надбудови до них. Запропоновані вирішення окремих проблем, без сумнівів, дозволяють досягти значного корисного ефекту, проте науковцями не розглянуто їх роботу у взаємозв'язку та можливі наслідки і введення в експлуатацію більшості розглянутих розробок є або занадто складним, або занадто коштовним. Розглянуті ж методи комплексної автоматизації одразу усіх процесів збагачення залізної руди є ще складнішими. Отже, найбільш оптимальним вибором є мультиагентне керування збагачувальними процесами на основі інтелектуальних засобів керування. Таким чином, кожен з об'єктів буде мати власну систему керування, що значно спростить автоматизоване керування процесів збагачення загалом, і одночасно усі об'єкти будуть пов'язані між собою та обмінюватимуться необхідною інформацією. Зв'язок між технологічними механізмами збагачувальної фабрики має велике значення так як дозволяє розглядати увесь процес збагачення у сукупності та контролювати його згідно загальної картини.

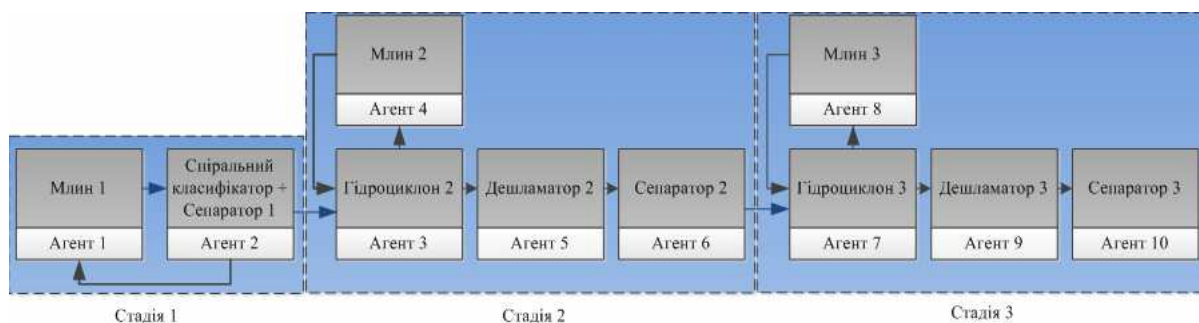


Рисунок 1 - Схема зв'язків при мультиагентному керуванні трьохстадійним збагаченням залізної руди

Викладення матеріалу і результати дослідження

Згідно запропонованої схеми (рис. 1) кожна стадія окрім першої здійснює чотири операції – подрібнення, класифікацію, знешламлення та мокру магнітну сепарацію залізної руди. Відповідно, у кожній стадії присутні млини, магнітні сепаратори, дешламатори та розділяючі механізми. Для першої стадії це спіральний класифікатор, для наступних – гідроциклони. Кожен технологічний механізм має власну, незалежну від інших, систему керування і являється аге-

нтом. Зважаючи на відносну простоту спірального класифікатора, з деякими припущеннями його можна розглядати у сукупності з млином першої стадії подрібнення як окремий агент з загальною системою управління для двох механізмів. При налагоджених зв'язках між агентами кожна система керування має змогу оптимально працювати за рахунок отримуваної інформації від інших агентів про поточний стан оброблюваної руди, бажані характеристики кінцевого продукту та можливі аварійні ситуації. Загалом це дозволить отримати значний економічний ефект.

Кожен агент у загальному вигляді можна описати у вигляді кортежа параметрів [8]:

$$A = \langle G, S, A, \theta, \phi \rangle \quad (6)$$

де G – цільова функція, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ – набір параметрів стану, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ – набір дій, θ – база знань, ϕ – оператор.

Основою керування являється підтримування співвідношення продуктивностей за зливом і за пісками на певному рівні. Тому, наприклад, для гідроциклона, як одного з механізмів, цільовою функцією G буде критерій

$$K = Q_{of} / Q_{uf}; \rho_{of} \leq \rho_{of.n}; \rho_{uf} \geq \rho_{uf.n} \quad (7)$$

що має на увазі підтримку співвідношення продуктивностей за зливом та за пісками і густин пісків та зливу в оптимальних межах.

Параметрами стану будуть значення густин зливу та пісків, продуктивності за зливом і за пісками, рівень пульпи у зумпфі та тиск, створюваний насосом гідроциклона. Зокрема, завдяки результатам розрахунків рівнянь (2) та (3) на основі уявлень про рух частинок руди у гідроциклоні можна точніше розрахувати густини та продуктивності кінцевих продуктів при моделюванні цих параметрів, що дозволить не вимірювати їх фізично. Крім того, вираз (4) дає змогу розрахувати параметри стану гідроциклона з урахуванням конструктивних змін. При застосуванні ультразвукових методів контролю з'являється можливість вимірювати параметри пульпи не втручаючись у технологічний процес. Не дивлячись на складність та надмірну кількість припущень при розрахунках (рівняння (5)), даний підхід є досить ефективним та дозволяє точніше виміряти параметри стану для агентів керування. Набір дій складатиметься з регулюючих впливів, а саме керування швидкості обертання двигуна насоса гідроциклона та додавання технологічної води у зумпф.

Для шарового млина цільова функція має прямувати до оптимального розкриття руди, підвищення продуктивності та зменшення витрат електроенергії та мелючих тіл. Параметрами стану, тобто вимірюваними характеристиками є продуктивність за вихідною рудою, наповненість рудою та мелючими тілами, потужність, що споживається електроприводом млина та крупність кінцевого продукту. При керуванні агентом 2 (рис. 1), який містить два механізми одразу – млин та спіральний класифікатор, доцільно до параметрів стану внести співвідношення тверде/рідке на вході млина відповідно до виразу (1). До набору дій (регулюючі впливи) належать регулювання завантаження млина рудою, мелючими тілами та технологічною водою.

Ціллю керування мокрим магнітним сепаратором є підвищення його продуктивності та проценту заліза у концентраті. Не менш важливим є зменшення втрат заліза у хвостах. Вимірюваними параметрами є затрати пульпи, що надходить на сепарацію, її густина, витрати води, напруженість магнітного поля, вміст корисного компоненту у концентраті та хвостах. Для автоматизованого керування застосовуються такі дії, як регулювання додавання води у барабан сепаратора та зміна напруженості магнітного поля.

Для усіх агрегатів такий елемент кортежу як база знань міститиме у собі досвід попереднього керування та технологічну карту різновидів руди, щоб підлаштовуватися під певні види залізної руди.

Висновки і напрямки подальших досліджень

Як видно, кожен технологічний механізм є досить складною окремою системою з великою кількістю контрольованих та керованих параметрів та має власну окрему систему керування. Однак, засоби мультиагентного керування дозволять ще й удосконалити обмін інформацією між механізмами, їх взаємозв'язок. Застосування мультиагентного керування у комплексі з засобами нечіткої логіки та оптимальним керуванням для кожного механізму дозволить досягти найбільшої узгодженості системи керування збагачувальними процесами з реальними умовами. Отже, напрямком майбутніх досліджень є розробка мультиагентної системи керування комплексом збагачення залізної руди на основі нечіткої оптимізації роботи агентів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Подгородецький М.С. Енергоефективне адаптивне керування замкнутим циклом подрібнення руди на базі гібридної нечіткої моделі : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.13.07 / Микола Сергійович Подгородецький ; Криворізький національний університет. – Кривий Ріг, 2011. – 20 с.
2. Кондратець В.О. Адаптивне розподілене керування подрібненням руди кульовими млинами з оптимізацією динаміки розрідження пульпи : дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : 05.13.07 / Василь Олександрович Кондратець ; Криворізький національний університет. – Кривий Ріг, 2015. – 339 с.
3. Саїтгареев Л.Н. Обґрунтування параметрів класифікації тонкодисперсних магнетитових кварцитів у нестационарному полі швидкості пульпи гідросепаратора : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.15.08 / Леван Наїльєвич Саїтгареев ; Криворізький національний університет. – Кривий Ріг, 2010. – 17 с.
4. Радіонов В.М. Енергоефективне керування гідроциклоном на основі моделі його гідродинаміки в ультразвуковому полі : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.13.07 / Владислав Михайлович Радіонов ; Криворізький національний університет. – Кривий Ріг, 2014. – 20 с.
5. Ртищев А.Б. Підвищення якості магнетитових концентратів за рахунок зміни взаємної орієнтації магнітного і гідродинамічного потоків : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.15.08 / Андрій Борисович Ртищев ; Криворізький національний університет. – Кривий Ріг, 2003. – 17 с.
6. Дик И.Г. Управление характеристиками гидроциклона дополнительным инжектированием воды / И. Г. Дик, А. В. Крохина, Л. Л. Миньков // Теоретические основы химической технологии. – 2012. – том 46. – №3. – С. 342-352.
7. Моркун Н.В. Адаптивна система управління процесом магнітної сепарації залізних руд на базі засобів ультразвукового контролю : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.13.07 / Наталія Володимирівна Моркун ; Криворізький національний університет. – Кривий Ріг, 2005. – 23 с.
8. Поркуян О. В. Керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних виробництв на основі гібридних моделей Гамерштейна

- : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : 05.13.07 / Ольга Вікторівна Поркуян ; Криворізький національний університет. – Кривий Ріг, 2009. – 27 с.
9. Мезенцев К. Н. Расчет Мультиагентное моделирование в среде NetLogo / К. Н. Мезенцев // Автоматизация и управление в технических системах (АУТС). – 2015. - №1. – С. 10-20.
10. Безгубова Ю.О. Мультиагентное управление распределенными информационными потоками / Ю. О. Безгубова // Образовательные ресурсы и технологии. - 2015. – №9. - 113-119 С.
- 11.11. Пешко М.С. Адаптивная система управления параметрами микроклимата процес сов производства и хранения пищевых продуктов : дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : 05.13.06 / Михаил Сергеевич Пешко ; Омский государственный технический университет. – Омск, 2015. – 200 с.
12. Байченко А.А. Применение нечеткой логики в управлении предприятием пищевой промышленности / А. А. Байченко, Л. А. Байченко, В. А. Арет // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». – 2014. – №3. – С. 35-69.
13. Новиков С.И. Методы нечеткой логики в задачах автоматизации тепловых процессов электростанций / С. И. Новиков, В. Р. Шахнович, А. В. Сафронов // Вестник ИГЭУ. – 2010. – №4. – С. 72-75.
14. Коломийчук С.Г. Расчет остаточного ресурса технической системы с помощью методов нечеткой логики с использованием программных пакетов MATLAB и Simulink / С. Г. Коломийчук // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – №9. – С. 161-165.

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ПІДД²Д³-РЕГУЛЯТОРІВ В СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

Анотація. Представлений аналіз ефективності застосування систем автоматичного регулювання (САР) з багато-параметричним регулятором та з регулятором і компенсатором суднової енергетичної установки (СЕУ). Встановлено, що САР з багато-параметричним регулятором має кращі показники регулювання порівняно з системою регулювання, яка включає регулятор та компенсатор.

Ключові слова: багато-параметричний регулятор, система автоматичного регулювання, САР з регулятором та компенсатором.

Аналіз проблеми

В суднових енергетичних установках (СЕУ) передача теплоти частіше за все відбувається у трубчатих або пластинчатих теплообмінних апаратах [1, 2]. Для таких апаратів характерно, що теплова ємність зі сторони потоку який нагрівається та зі сторони гріючого агента розподілена рівномірно упродовж всієї довжини теплообмінника.

Парові підігрівачі палива належать до більш простих теплообмінників. Їх динамічні характеристики дозволяють виконувати достатньо загальний аналіз динаміки систем регулювання [1, 2, 4]. Рівняння динаміки у протиточних теплообмінниках типу «рідина – рідина» та «повітря – рідина» мають доволі складний вид, оскільки їх параметри розподілені та взаємозв'язані.

Для отримання частотних характеристик навіть розімкнутої системи потрібно провести дуже ємнісні розрахунки. У випадку багатоходових теплообмінників або таких, де відбувається різка зміна швидкостей чи інших фізичних властивостей потоку, динамічні характеристики визначаються лише за допомогою спеціалізованих комп'ютерних алгоритмів. Проте можна відзначити, що аналітичний опис динаміки теплообмінних апаратів супроводжується складними розрахунками, але процес автоматичного регулювання представляє

собою доволі просту процедуру, за виключенням випадків, коли необхідно отримати високу точність регулювання. Такі задачі властиві, наприклад, при регулюванні в'язкості палива суднових двигунів внутрішнього згорання (СДВЗ) з електронним керуванням упорскування типу RT-flex [1, 2, 4, 16].

В суднових системах підготовки палива широко застосовують автоматичні системи управління (АСУ), які реалізовані з використанням ПІ, ПІД-регуляторів, де необхідно враховувати відомі співвідношення в'язкості та температури палива [3, 6 - 8]. Використання графоаналітичних методів розрахунку налаштувань ПІД-регуляторів та якості перехідних процесів, зазвичай, оцінюється лінійним інтегральним критерієм. Але таке оцінювання може бути використане лише для монотонних та знакопостійних процесів. Обмеження на запас стійкості САР у такому випадку може гарантувати затухаючі перехідні процеси, де оцінювання процесу, з достатньою точністю, виконується на основі лінійного інтегрального критерію. Проте, це не виключає використання його коливальної характеристики, а задача знаходження мінімального лінійного інтегрального критерію вирішується аналітично.

Використання модульного або квадратичного інтегрального критерію якості перехідних процесів з обмеженням запасу стійкості буває надлишковим. При цьому існують випадки, коли потрібно реалізувати високу точність ідентифікації об'єкта управління (предикатор Смітта) [4, 5]. Тому обмеження на запас стійкості повинно бути задано явно або отримано з підінтегральної функції.

В САР на практиці здебільшого використовуються ПІД-регулятори, що формують регулюючий вплив в залежності від зміни величини, що підлягає регулюванню [5, 8, 10]. Величина та час регулюючого впливу залежать від зміни регульованої величини, інтегралу та похідної від неї. Передавальна функція ПІД-регулятора має наступний вигляд:

$$R(s) = k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{Ti \cdot s} + Td \cdot s \right). \quad (1)$$

В наш час спеціалістами з автоматичного керування продовжуються чисельні спроби заміни конвенційних ПІД-регуляторів на формально бездоганні, засновані на найновіших досягненнях теорії автоматичного керування, регулятори. Причиною безуспішності цих

спроб є припущення про можливість зображення об'єкту регулювання системами звичайних диференціальних рівнянь [6, 7]. На практиці, реальні об'єкти частіше за все мають запізнення у передачі регулюючих впливів, що робить їх лише частково спостережуваними та у звичайних умовах роботи вони піддаються випадковим збуренням, серед яких можуть бути неконтрольовані. Отже величина, що регулюється є також випадковим процесом. А отже, і величина помилки управління оцінюється або за довгий період у середньому, або величиною короткочасних викидів викликаних ступеневою формою реалізації збурень. Оскільки для нелінійних систем не доведено, що ступенева форма збурень є найбільш важкою, то можна поставити під сумнів твердження про працездатність запропонованих регуляторів.

Реальні об'єкти автоматизації з великими транспортними запізненнями τ у лінійному наближенні описуються функціями виду:

$$W_0(s) = \tilde{W}_0(s) \cdot e^{-\tau \cdot s}, \quad (2)$$

де

$$\tilde{W}_0(s) = \frac{K_0}{(T_1s + 1) \cdot (T_2s + 1) \cdot \dots \cdot (T_ns + 1)}.$$

Передавальна функція багато-параметричного регулятора (3) з похідними різного порядку дає змогу покращити показник якості регулювання САР з великим транспортним запізненням [8, 9].

$$W_{pm}(s) = K_p^m \cdot \left(1 + \frac{1}{T_us} + T_{d1}s + T_{d2}^2s^2 + T_{d3}^3s^3 \right), \quad (3)$$

де K_p^m - коефіцієнт передачі;

T_u - постійна часту інтегрування;

T_{d1} , T_{d2} , T_{d3} - постійні часу диференціювання.

Аналіз останніх публікацій

Найбільш відомими роботами з питання регулювання об'єктів з транспортним запізнюванням є роботи у яких пропонується використання предікатору Сміта. В інших роботах запропоновано можливість компенсації транспортного запізнювання за допомогою компенсатору з передавальною функцією $W_k(s) = e^{\tau \cdot s}$, який включено у систему перед регулятором [10 - 12].

Фізична реалізація такого компенсатору може бути представлена у вигляді розкладання у ступеневий ряд Лорана різної кількості членів (4):

$$W_k^e(s) = 1 + \frac{\tau s}{1!} + \frac{\tau^2 s^2}{2!} + \frac{\tau^3 s^3}{3!} + \dots \quad (4)$$

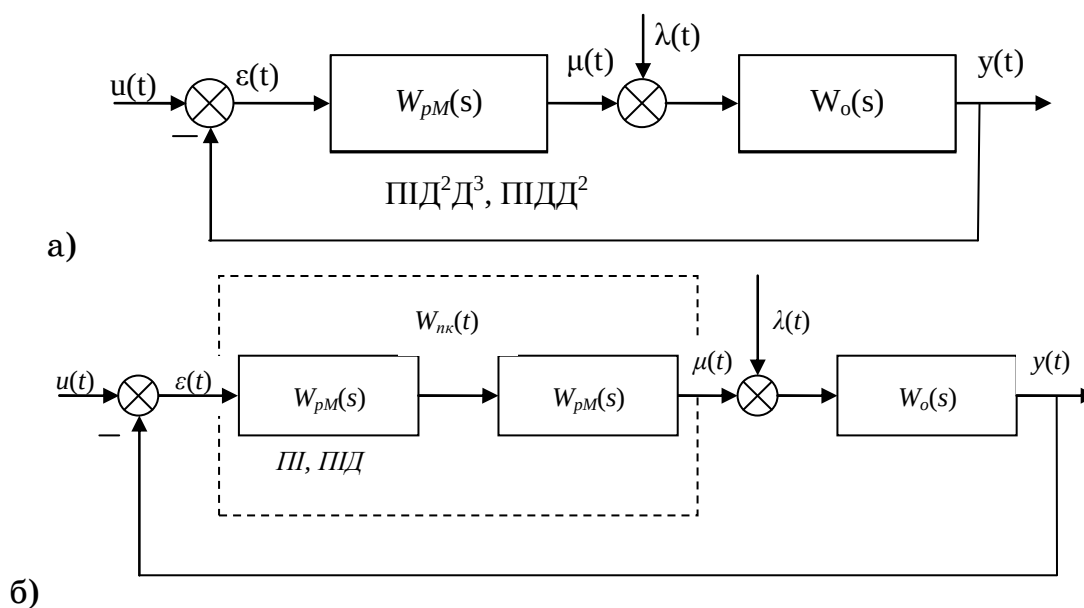
Слід зазначити, що передавальна функція з компенсатором та послідовно з'єднаним ПІД-регулятором буде мати вигляд ПІД²Д³-регулятора:

$$W_{нк}(s) = \left(K_p + \frac{K_u}{s} + K_d s \right) \cdot (1 + K_1 s + K_2 s^2) \quad , \quad (5)$$

де K_p , K_u , K_d - параметри налаштування ПІД-регулятора;

K_1 , K_2 - параметри налаштування компенсатора.

На рис.1 показано структурні схеми САР з багато-параметричним регулятором та з компенсатором і регулятором.



Риунок 1 - Структурні схеми САР:

а) з багато-параметричним регулятором;

б) з компенсатором та регулятором

Виконав перетворення та визначив співвідношення між передавальними функціями (3) та (5), і враховуючи можливість фізичної реалізації компенсатору, обираємо граничне число членів ряду (4).

Запишемо вирази, що зв'язують параметри налаштування ПІД²Д³-регулятора та пристрою керування $W_{нк}(s)$, який включає ПІД-регулятор та компенсатор:

$$\begin{aligned}
K_p^M &= K_p + K_1 \cdot K_u; & K_u^M &= K_u; \\
K_{d1}^M &= K_d + K_1 \cdot K_p + K_2 \cdot K_u; \\
K_{d2}^M &= K_d \cdot K_1 + K_p \cdot K_2; \\
K_{d3}^M &= K_d \cdot K_2.
\end{aligned} \tag{6}$$

В разі використання ПІ-регулятора, пристрій керування з компенсатором, що включає три члена ряду (4), буде відповідати ПІДД²-закону регулювання, а ПІ-регулятор з компенсатором, що включає два члена ряду (4), буде відповідати ПІД-алгоритму керування.

Мета роботи

Виконати порівняльний аналіз роботи САР з ПІДД²Д³, ПІДД²-регуляторами, а також САР з керуючим пристроєм, ПІД-регулятором та компенсатором.

Основна частина

Для знаходження оптимальних параметрів налаштування багато-параметричного регулятора та керуючого пристрою, що включає ПІД-регулятор з компенсатором, використано комп'ютерне середовище «Matlab» [14].

Для оптимізації параметрів алгоритмів керування, що аналізуються, значення цільових функцій були визначені з використанням імітаційної цифрової моделі системи регулювання з перетворенням за методом Рунге-Кутти 2-го порядку. При цьому, моделювання системи регулювання зведене до моделювання аперіодичних ланок, а використання методу Рунге-Кутти значно знизило чутливість моделі до інтервалу дискретності.

В якості цільової функції використано площу перехідного процесу у вигляді інтегралу за модулем відхилення величини регулювання $I_{M,\lambda} = \int |y(t)| dt$ при одиничному ступеневому впливі $\lambda(t) = 1$ по каналу регулюючого органу. Такий вигляд цільової функції в залежності від інтегралу має екстремальний характер, і таким чином робить стійкою процедуру пошуку оптимальних параметрів налаштувань. Для забезпечення заданого запасу стійкості використаний частотний показник коливальності M_{don} , визначений у вигляді максимального значення амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) замкнутої системи на частоті резонансу $A_{zc}(\omega_p)$.

Рівняння для АЧХ замкнутої системи з багато-параметричним регулятором $A_{zc, pM}(\omega_p)$ та для пристрою керування з компенсатором $A_{zc, nk}(\omega_p)$ має вигляд:

$$\begin{aligned} A_{zc, pM}(\omega_p) &= \left| \frac{W_{pM}(j\omega) \cdot W_o(j\omega)}{1 + W_{pM}(j\omega) \cdot W_o(j\omega)} \right|, \\ A_{zc, nk}(\omega_p) &= \left| \frac{W_{nk}(j\omega) \cdot W_o(j\omega)}{1 + W_{nk}(j\omega) \cdot W_o(j\omega)} \right|. \end{aligned} \quad (7)$$

Критерій оптимальності за звичайного налаштування регулятора без врахування зміни параметрів об'єкта запишемо у вигляді:

$$F_{opt} = \begin{cases} I_{M, \lambda} \cdot \langle 1 + |M_{\partial\partial\partial} - A_{zc}(\omega_p)| \rangle, \\ \text{якщо, } A_{zc}(\omega_p) \triangleright M_{\partial\partial\partial}, \\ I_{M, \lambda}, \text{ якщо, } A_{zc}(\omega_p) \leq M_{\partial\partial\partial}. \end{cases} \quad (8)$$

Запишемо критерій робастного налаштування, додатково враховуючи граничний показник коливальності для САР з варіативною передавальною функцією об'єкту регулювання:

$$F_{opt}^{rab} = \begin{cases} I_{M, \lambda} \cdot \langle 1 + |M_{\partial\partial\partial} - A_{zc}(\omega_p)| + |M_{\partial\partial\partial}^{var} - A_{zc}^{var}(\omega_p)| \rangle, \\ \text{якщо, } A_{zc}(\omega_p) \triangleright M_{\partial\partial\partial} \text{ та } A_{zc}^{var}(\omega_p) \triangleright M_{\partial\partial\partial}^{var}, \\ I_{M, \lambda}, \text{ якщо, } A_{zc}(\omega_p) \leq M_{\partial\partial\partial} \text{ та } A_{zc}^{var}(\omega_p) \leq M_{\partial\partial\partial}^{var}. \end{cases} \quad (9)$$

де ω_p^{var} - резонансна частота у САР з варіативними параметрами об'єкту; $M_{\partial\partial\partial}^{var}$ - допустиме значення показника коливальності у САР з варіативними параметрами при відповідній йому частоті ω_p^{var} .

Слід зауважити, що варіативною може бути як сама передавальна функція об'єкту регулювання в цілому, так і окремі параметри, які характеризують динамічні властивості об'єкту [12, 15]. В даному випадку, варіативним параметром обрано транспортне запізнювання τ_{var} . Зменшення запізнювання не викликає зниження стійкості системи, адже вона при цьому стає менш чутливою, а відповідно – більш грубою.

Для моделювання було використано наступну передавальну функцію об'єкту регулювання:

$$W_0(s) = K \cdot \frac{e^{\tau \cdot s}}{(T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1)^3}, \quad (10)$$

де $K_0 = 3,32$; $\tau = 30$ с ($\tau_{\text{впр}} = 42$ с); $T_1 = 55$ с; $T_2 = 22$ с.

Обмеження на показник коливальності транспортного запізнювання, а також параметри налаштування ПІД-регулятора з компенсатором - $M_{\text{доп}} \leq 1,618$.

У відповідності до критерію (8) отримано налаштування САР з ПІДД²Д³, ПІДД² та ПІД-регуляторами з урахуванням вихідного значення часу запізнення, а також налаштування САР з керуючим пристроєм, ПІД-регулятором та компенсатором другого порядку, що складається з трьох членів ряду (4). За результатами отриманих налаштувань проведено оцінку чутливості системи що до збільшення запізнювання від τ до $\tau_{\text{впр}}$ шляхом аналізу амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) та відповідних показників коливальності.

Для САР, що аналізуються, у відповідності до критерію (9) були отримані робастні налаштування, які обмежують величину показника коливальності при варіюванні запізнювання. Умовою робастного налаштування за першим варіантом, є збереження прийнятого запасу стійкості як для САР з вихідним об'єктом, так і з варіативним. Проте, отримані параметри налаштування за таким жорстким обмеженням знижують якісні показники процесу регулювання при нормальному вихідному об'єкті, що є неминучим наслідком компромісу. Тому у другому варіанті запас стійкості для варіативного об'єкта при $\tau_{\text{впр}}$ був удвічі збільшений, що дозволило помітно підвищити якісні показники вихідної САР у протиставленні до першого варіанту.

На рис.2 показано результати розрахунків з перехідними процесами та АЧХ у САР з багато параметричними ПІДД²Д³, ПІДД² та ПІД-регуляторами, оптимально налаштованими на вихідну передавальну функцію об'єкта з постійною запізнювання τ та при вибраній умові $M_{\text{доп}} \leq 1,618$.

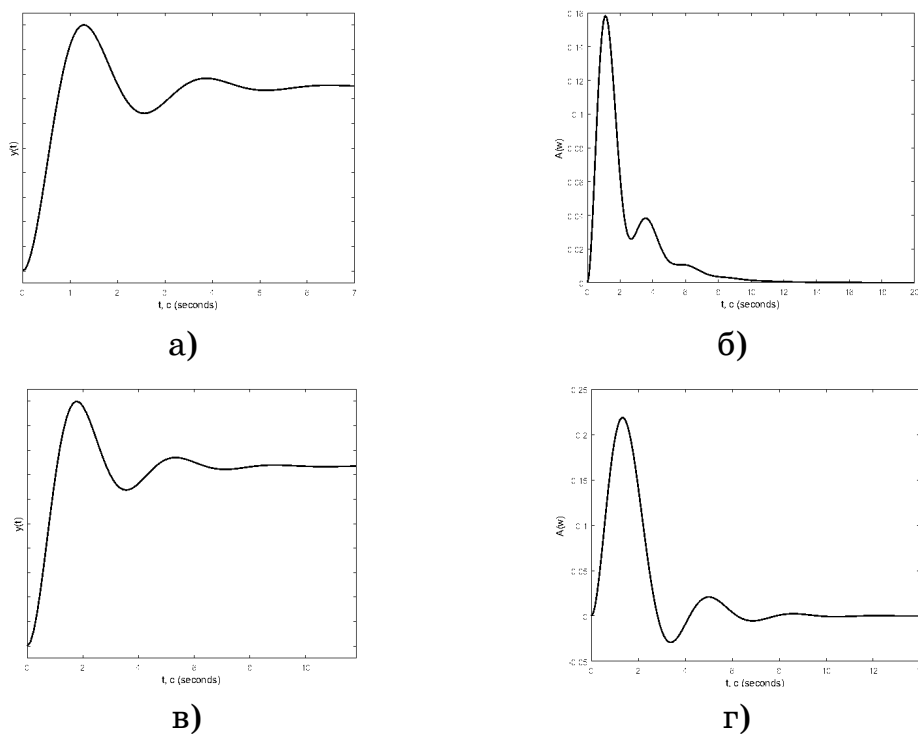


Рисунок 2 - Перехідні процеси та АЧХ для САР з багато-параметричними регуляторами, що налаштовані на вихідну передавальну функцію об'єкту:
а, б – для вихідного об'єкта з запізнюванням τ ;
в, г – для варіаційного об'єкта з запізнюванням $\tau_{вар}$.

На рис.3 показано перехідні процеси та АЧХ для САР з робастними налаштуваннями багато параметричних регуляторів для САР з ПІДД²Д³-регулятором та для структури з ПІД-регулятором і компенсатором.

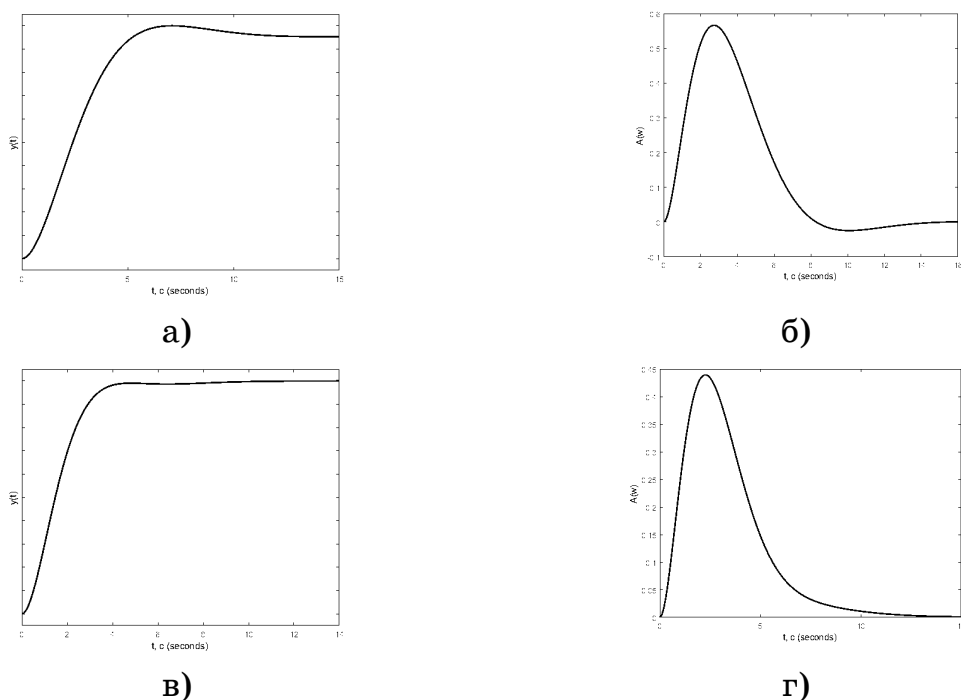


Рисунок 3 - Перехідні процеси та АЧХ для САР

з робастними налаштуваннями багато параметричних регуляторів:

а, б – для вихідного об'єкту з запізнюванням τ ;

в, г – для варіаційного об'єкту з запізнюванням τ_{var} .

Висновки

Якість САР з ПІДД²Д³-регулятором за інтегральним показником $I_{M,\lambda}$ покращується у 1,6 разів у порівнянні з ПІДД²-регулятором та у 3 рази у порівнянні з ПІД-регулятором. Збільшення часу запізнювання τ на 40% до τ_{var} за такого налаштування істотно знижує стійкість системи регулювання, де показник коливальності САР з ПІДД²Д³-регулятором збільшується в 3,2 рази, з ПІДД²-регулятором в 1,9 рази, а з ПІД-регулятором в 1,4 рази. Також погіршуються якісні показники $I_{M,\lambda}$, які збільшуються у САР з ПІДД²Д³-регулятором в 2,5 рази, з ПІДД²-регулятором в 1,8 рази, а з ПІД-регулятором в 1,3 рази.

За дотримання заданого запасу стійкості системи управління, де виконуються умови $M_{\partial\partial} \leq 1.617$, $M_{\partial\partial}^{var} \leq 1.617$, показник якості регулювання зменшується для ПІДД²Д³-регулятору в 1,4 рази, для ПІДД²-регулятору в 1,25 рази та для ПІД-регулятору в 1,12 рази. Різниця між перехідними процесами при звичайних налаштуваннях регулятору для відповідних τ та τ_{var} помітно зменшується, як за зви-

чайних налаштувань регулятору, так і при аналогічних варіативних налаштуваннях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сыромятников В. Ф. Наладка автоматики судовых энергетических установок./В.Ф. Сыромятников.:Справочник.– Л.:Судостроение, 1989. - 352с.
2. Сыромятников В. Ф. Основы автоматики и комплексная автоматизация судовых пароэнергетических установок. / В. Ф. Сыромятников. Учебник. – М.: Транспорт, 1983. – 312 с.
3. Ротач, В.Я. Расширение границ действия теории автоматического управления теплоэнергетическими процессами / В.Я. Ротач // Тепло- энергетика. – 2009. – № 10. – С. 25–31.
4. Штейнберг Ш.Е. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования./Ш.Е. Штейнберг, Л.П. Сережин, И. Е.Залуцкий и др.//Промышленные АСУ и контроллеры. Научтехлитиздат,2004.–№7.– С 1-7.
5. Дудников Е. Г. Автоматическое управление в химической промышленности: Учебник для ВУЗов./Под ред. Е.Г. Дудникова.–М.:Химия, 1987.– 368с.
6. Ротач В.Я. Теория автоматического управления; Учебник для вузов/ В. Я. Ротач - 2-е изд., перераб. и доп. – М.:МЭИ, 2004. –400 с.
7. Ротач В. Я. К расчету оптимальных параметров ПИД регуляторов по экспертным критериям / В. Я. Ротач // Промышленные АСУ и контроллеры. Научтехлитиздат, 2006. -№02. –С 22-29.
8. Денисенко В. ПИД регуляторы: принцип построения и модификации. <http://www.cta.ru/cms/f/342946.pdf>
9. Макаров И. М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал). /И. М. Макаров, Б. М. Менский - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 504 с.
- 10.Егупов Н. Д. Методы классической и современной теории автоматического управления./Под ред. Н. Д. Егупова, К. А. Пупкова: Учебник. В 5 т. Том 5. Синтез регуляторов систем автоматического управления. – М.:МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 616 с.
- 11.Уидброу Б. Адаптивная обработка сигналов / Б. Уитброу, С. Д. Стирнз // - М.: Радио и связь, 1989. - 440 с.
- 12.Morales L.G. (ed.) Adaptive Filtering InTech, 2011, – 410 pp.
- 13.Haykin S. Adaptive Filter Theory, 4th edition.–Prentice Hall, 2002.–936 p.
- 14.Attaway S. MATLAB: A Practical Introduction to Programming and Problem Solving. 4th Ed. –Butterwonh-Heinemann, 2017. – 598 p.
- 15.Ладанюк А.П. Показатели функционирования и устойчивости систем с многопараметрическими регуляторами / А.П. Ладанюк, Д.О. Крониковский // Проблемы управления и информатики, 2011. –№ 2. – С.122-129.
- 16.RT-flex Operation & Practical Training Curse. <http://dieselturbo.man.eu>

Ю.А. Бубликов, Г.А. Поляков, С.Н. Подгорный, С.Н. Селегей,
А.Н. Селегей

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ И СПОСОБОВ ЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ АЗОТОМ

Аннотация. Проанализированы существующие методы легирования азотом железо–углеродистых расплавов в промышленных условиях. Изучены механизмы ассимиляции азота металлическим расплавом в зависимости от вида применяемого азотоносителя и технологических факторов. Приведен принципиальный подход в составлении зависимостей позволяющих определить растворимость азота в металлическом расплаве на основании термодинамических величин и концентрации легирующих элементов.

Ключевые слова: азот, сталь, легирование, растворимость, нитриды.

Введение

В настоящее время металлурги уделяют особое внимание азоту, как перспективному легирующему элементу, для производства как коррозионностойких высокохромистых сталей так и низколегированных конструкционных сталей с карбонитридным упрочнением. При этом в первом случае азот вводят в качестве аустенитообразующего элемента, что позволяет экономить часть дорогостоящего никеля и заменить его на более доступный марганец. В то время как его применение в качестве микролегирующего элемента в низколегированных сталях с карбонитридным упрочнением позволяет снизить степень легированности такими элементами замещения как марганец, хром, никель при незначительном удорожании на ввод низких концентраций нитридообразующих металлов (титан, ванадий, ниобий) не превышающее сотых долей массового процента. В обоих случаях положительный эффект достигается за счёт значительного повышения прочностных свойств, при сохранении эксплуатационных характеристик.

Использование азота в качестве легирующего по сравнению с углеродом и другими упрочняющими элементами ограничено. Это

© Бубликов Ю.А., Поляков Г.А., Подгорный С.Н., Селегей С.Н., Селегей А.Н., 2016

связано с относительно большей технологической сложностью его введения в металл. Процесс может осуществляться либо твердыми высокоазотистыми материалами в процессе плавки или в ковше, либо из газовой фазы с применением внепечной обработки или методов специальной электрометаллургии. Схематически это отображено на рис. 1.



Рисунок 1 - Промышленные способы легирования стали азотом

Предпочтительность того или иного метода введения азота в жидкую сталь во многом определяется экономической целесообразностью, назначением и конечным содержанием азота в стали.

Анализ литературных данных и постановка проблемы

Методы специальной электрометаллургии применительно к производству азотсодержащих сталей можно классифицировать по величине давления газовой фазы в агрегатах, в которых происходят процессы легирования и получения слитка:

– при атмосферном давлении: продувка жидкого металла в ковше [1], вакуум и газокислородное обезуглероживание металла [2], электрошлаковый [3] плазменно–дуговой [4,5] и дуговой шлаковый переплав (ДШП) [6,7];

– при давлении ниже атмосферного: вакуумный дуговой (ВДП) [8] и плазменно–дуговой переплавы (ПДП) [4,5,8];

– при повышенном давлении (до 12МПа) – разливка под давлением [9], плазменно–дуговой переплав [4,5], электрошлаковый переплав [10] электрошлаковый обогрев жидкого металла под давлением (ЭШОД) [11], дуговой шлаковый переплав под давлением (ДШПД) [12] и индукционная плавка под давлением [9, 13].

Применение специальной электрометаллургии предусматривает использования дорогостоящего и относительно сложного оборудования, что находит применение только при производстве высоколегированных сталей и сплавов особо ответственного назначения, главным образом коррозионностойких, жаростойких и жаропрочных, в которых содержание азота может достигать ≥ 1 % мас. Эти экономические ограничения и область применения распространяются и на методы газо–, аргоно–, и вакуумкислородного рафинирования (ГКР, АКР и ВКР, соответственно [14–16]).

Агрегаты печь–ковш главным образом предназначены для внепечного рафинирования низколегированных сталей от серы и кислорода, доводки стали по химическому составу и температуре и в меньшей мере приспособлены для легирования металла азотом из газовой фазы. Их установка, безусловно, необходима в специализированных электросталеплавильных и конвертерных цехах, основной продукцией которых является непрерывнолитая заготовка. Данные о их использовании в литейных цехах в литературе отсутствуют. Соответственно выплавка низколегированных конструкционных сталей с карбонитридным упрочнением сегодня может быть реализована только на базе твердых высокоазотистых материалов, в качестве которых могут использоваться азотированные ферросплавы (табл. 1) и азотсодержащие вещества (карбамид, меламин, цианистые соединения и др.).

Одним из традиционных способов является применение азотированных ферросплавов, благодаря которому достигается:

- высокое и стабильное усвоение как азота, так и основных элементов базового ферросплава;

- возможность применения азотированных ферросплавов во всех действующих сталеплавильных цехах без какого либо дополнительного оборудования для ввода.

В работе [17] установлено, что при попадании твёрдых ферросплавов в жидкую сталь сначала происходит намораживание стальной корочки на поверхности кусков ферросплава, а затем плавление этого слоя и достижения тела ферросплава, усвоение которого в дальнейшем протекает по механизмам плавления и растворения.

Что касается первого из указанных процессов, то он зависит в первую очередь от теплопроводности ферросплава – чем больше теплопроводность, тем толще замороженный слой. Скорость же растворения ферросплава, по-видимому, определяется температурой его плавления и фракцией.

Таблица 1

Стандартные азотированные ферросплавы,
производимые в странах СНГ

Тип сплава	Нормативная документация	Химический состав, % мас.					Область применения
		Cr	Mn (V)	N	Si	C	
		не менее			не более		
Феррохром ФХН 100 ФХН 200 ФХН 400 ФХН 600	ГОСТ 4757-91	60 65 65 60	– – – –	1,0 2,0 4,0 6,0	1,0 1,0 1,0 1,0	0,06 0,06 0,06 0,03	Все хромистые стали с низким содержанием марганца
Ферромарганец ФМн–ПЛ ФМн–СП1 ФМн–СП2	ДСТУ 3547-97	– – –	80 78 78	1,5 4,0 4,0	2,0 2,0 2,0	0,5 0,5 0,5	Марганец содержащие стали
Марганец Мн87Н6 Мн89Н4 Мн91Н2 Мн92Н2	ГОСТ 6008-90	– – –	87 89 91 92	6,0 4,0 2,0 6,0	1,8 1,8 1,8 1,8	0,2 0,2 0,2 0,2	
Ферросилико–марганец СМн7Н СМн5Н	ТУ-14-144-63-92		60 60	7,0 4,0	9–17 9–17	3,5 3,5	
Феррованадий ФВдН2 ФВдН4 ФВдН6 ФВдН8 ФВдН10	ТУ-14-5-122-80	–	(34) (33) (33) (32) (32)	2,0 4,0 6,0 8,0 10	3,0 3,0 3,0 3,0 3,0	1,0 1,0 1,0 1,0 1,0	

Цель и задачи исследования

Целью работы является определение рациональных способов введения азота как легирующего элемента в сталь в промышленных условиях Украины с сохранением высоких прочностных и эксплуатационных характеристик при условии снижения себестоимости конечного продукта.

В соответствии с указанной целью были поставлены и решены следующие задачи:

- обоснована перспективность введения азота как легирующего элемента;
- рассмотрены основные способы введения азота в расплав для обеспечения необходимых характеристик;
- выявлены аналитические зависимости, позволяющие определить количественные и качественные показатели ввода азота;
- рекомендованы наиболее рациональные технологии производства азотсодержащих сталей с учетом конкретных условий.

Применение азотсодержащих материалов для легирования сталей

Теплофизические свойства азотированных ферросплавов таковы, что обеспечивают сравнительно быстрое их усвоение металлической ванной. Так они обладают пониженной теплопроводностью из-за пористой структуры и имеют невысокую температуру плавления из-за высокого содержания азота. Однако это не обеспечивает полное усвоение азота металлической ванной.

Механизм перехода азота из ферросплавов, где он находится в виде нитридов, в жидкий расплав может осуществляться после диссоциации либо непосредственно в металлическую фазу, либо с промежуточным образованием газовой фазы и дальнейшей ассимиляцией ее металлом по реакции (1). Можно предположить, что первый механизм легирования металлической ванны азотом обеспечивает более полное его усвоение металлической ванной, в то время как растворимость образовавшегося газообразного азота зависит от многих кинетических факторов и редко достигает больших величин.

Растворение азота в стали любого химического состава через газовую фазу описывается реакцией:



Константа равновесия которой имеет вид:

$$K_{(1)} = \frac{a_N}{P_{N_2}^{1/2}} = \frac{[N] \cdot f_N}{P_{N_2}^{1/2}}, \quad (2)$$

где a_N – активность азота в стали;

P_{N_2} – парциальное давление азота;

$[N]$ – равновесное содержание азота в стали;

f_N – коэффициент активности азота в стали.

В расчетах приняли температурную зависимость константы равновесия для чистого железа, полученную Пельке и Эллиотом [18]:

$$\lg K_N^{Fe} = -\frac{188}{T} - 1,25. \quad (3)$$

По известному уравнению Вагнера [19] коэффициент активности азота при постоянной температуре является функцией концентрации легирующих элементов, математическое выражение которой описывается рядом Тейлора:

$$\lg f_N = \sum_{i=1}^{i=n} e_N^i [\%i] + \sum_{i=1}^{i=n} r_N^i [\%i]^2 + \sum_{i=1}^{i=n} q_N^i [\%i]^3 + \dots + \sum_{i=1}^{i=n} m_N^i [\%i]^n, \quad (4)$$

где $[\%i]$ – концентрация i -го элемента в стали;

e_N^i, r_N^i, q_N^i – параметры взаимодействия азот-легирующий элемент первого, второго, третьего порядков при $t = \text{const}$.

Многочисленными работами [4, 20–22 и др.] показано, что для низколегированных сталей сходимость ряда (4) обеспечивается уже первым слагаемым, т.е. с учетом параметров взаимодействия только первого порядка, численные значения которых по обобщенным данным [22,23] приведены в табл. 2. В этом случае из (2)–(4) в общем виде получим:

$$\lg [N] = -\frac{188}{T} - 1,25 - \sum_{i=1}^{i=n} e_N^i [\%i] + \frac{1}{2} \lg P_{N_2}. \quad (5)$$

Таблица 2

Значения параметров взаимодействия первого порядка (e_N^i)
при 1873 К

Элемент	C	Ni	Si	Mn	Cr	Nb	Al	V	Ti
e_N^i	0,130	0,010	0,047	–0,020	–0,047	–0,065	–0,084	–0,10	–0,63

Для легированных и высоколегированных сталей, в которых содержание основных легирующих элементов превышает 10 %, необходимо учитывать не только параметры взаимодействия первого, второго и третьего порядка, но и их температурные зависимости. Это позволяет значительно повысить точность расчетов. Например, для хрома [24] найдены зависимости параметров взаимодействия трех порядков в широком диапазоне температур. Эти зависимости представлены уравнениями:

$$e_N^{Cr} = \frac{187}{T} - 0,058 \quad (6)$$

$$r_N^{Cr} = \frac{2,21}{T} - 0,0012 \quad (7)$$

$$q_N^{Cr} = \frac{1,32 \cdot 10^{-2}}{T} + 6,5 \cdot 10^{-6} \quad (8)$$

Из табл. 2 видно, что все нитридообразующие элементы, начиная от марганца, имеют отрицательную величину параметра взаимодействия, и как следует из выражения (5), увеличивают растворимость азота в жидкой стали, что иллюстрируется рис. 2 построенным для бинарных систем Fe–Me.

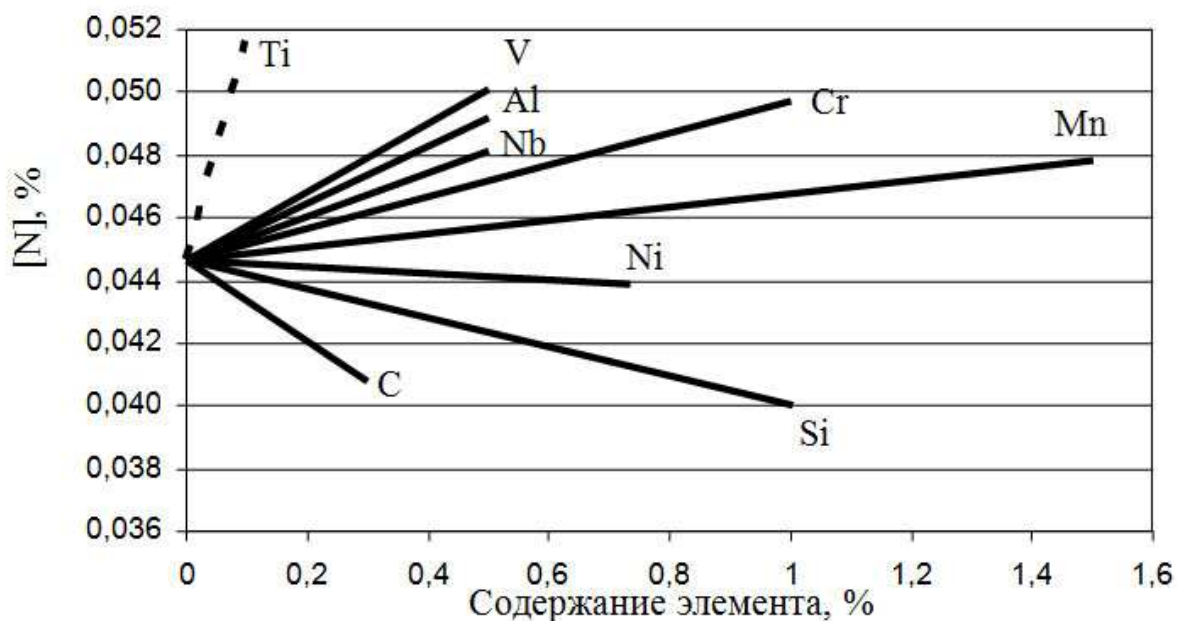


Рисунок 2 - Растворимость азота в бинарных системах Fe–Me_i при 1873 К

Однако это некорректно по отношению к элементам, которые образуют нитриды уже в жидкой стали например титану, который

даже при относительно малой концентрации в стали образует нитрид TiN, термодинамически устойчивый при температурах, существенно превышающих реальные температуры плавки. Соответственно в системах железо-титан-азот растворимость последнего будет определяться не только реакцией (1), а и равновесием реакции образования-диссоциации нитрида:



$$K_{(9)} = \frac{1}{a_{Ti} \cdot a_N} = \frac{1}{[Ti] \cdot [N] \cdot f_N}, \quad (10)$$

Численное значение константы $K_{(9)}$ для тройной системы определяли из табличных данных [25] для реакций (1), (11) и (12)



В соответствии с законом Гесса имеем:

$$\lg K_{(9)} = \lg K_{(11)} - \lg K_{(1)} - \lg K_{(12)}. \quad (13)$$

С учётом параметров взаимодействия первого порядка после несложных алгебраических преобразований даёт выражение для расчета равновесной концентрации азота в стали с титаном:

$$\begin{aligned} \lg [N] = & -\frac{19772}{T} + 6,4 - 0,13[C] - 0,047[Si] + 0,02[Mn] + 0,028[Al] + \\ & + 0,047[Cr] + 0,53[Ti] - \lg [Ti] \end{aligned} \quad (14)$$

Представленные на рис. 3 результаты расчетов по уравнениям (5) и (14) показывают, что при остаточном содержании титана $\geq 0,002\%$ мас. в низколегированных сталях с содержанием углерода 0,08–0,025%, кремния 0,9–0,4 % и марганца 0,5–1,2 % (стали 10САТЮ и 20ГЛ) растворимость азота в расплаве контролируется реакцией (9). Это обуславливает возможность образования нитридов титана в жидкой стали в области выше граничных кривых.

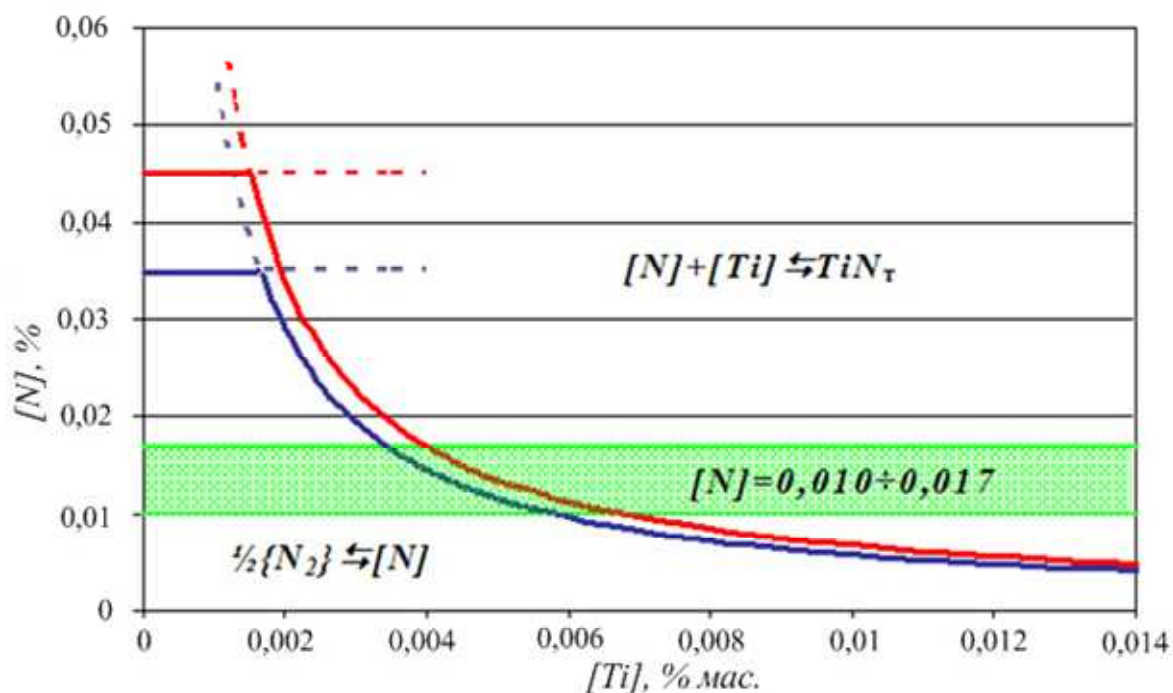


Рисунок 3 - Взаимодействие азота с титаном
в жидкой стали при 1873 К:

- сталь марки 10САТЮ — сталь марки 20ГЛ
 — реальные содержания азота в сталях
с карбонитридным упрочнением

На усвоение азота металлической ванной большое значение имеет состав металлического расплава и ряд технологических факторов, к которым относятся:

- температура процесса легирования стали азотом;
- степень насыщенности стали азотом относительно достижения растворимости;
- теплофизические свойства и состав ферросплавов;
- интенсивность перемешивания.

Процессы получения азотированных ферросплавов связаны с необходимостью дополнительного металлургического передела, включающем измельчение, азотирование и спекание, что приводит к значительному удорожанию материала и соответственно стали.

Производство всех представленных в табл. 1 ферросплавов на территории постсоветского пространства осуществлялось в условиях Запорожского (Украина), Аксузского (Казахстан), Челябинского (Россия) и Зестафонского Грузии) ферросплавных заводов. Однако с сере-

дины 90-х годов и сегодня поставляется главным образом только за счет импорта из КНР.

В последнее время появились публикации о производстве азотированных ферросплавов и нитридов промышленной чистоты методом СВС – самораспространяющийся высокотемпературный синтез. Сущность этого метода [26] заключается в инициировании нитридообразования с помощью локального нагрева участка шихты, в состав которой входят высокоазотистые органические добавки, а затем, благодаря высокому тепловому эффекту процесса, он распространяется самопроизвольно во всем объеме шихты. Метод СВС подобен алюмотермическому методу производства чистых металлов и ферросплавов в том числе и азотированных, но аппаратурно значительно сложнее и пока находит ограниченное применение.

Более доступный газообразный азот, которым продувают высоколегированные железоуглеродистые расплавы в конверторах с донным (ГКР) и боковым (АОД) дутьем. Как показали исследования автора [27] при производстве стали марки J4 (аналог 05X15AG9HD2), как наиболее распространенной среди коррозионностойких хромомарганцевых сталей в Китае, применение газообразного азота в восстановительном периоде процесса ГКР позволяет гарантированно получить его содержание 0,12–0,14 %, что соответствует требованиям стандарта. Однако, в связи с низкой эффективностью его использования и необходимости организации глубинной продувки в специальных агрегатах возможности использования газообразного азота ограничены, а его применение экономически целесообразно лишь при производстве низкоуглеродистых высоколегированных сталей в специальных агрегатах.

Возможность применения альтернативных азотоносителей для легирования стали

При отсутствии в Украине производства азотированных ферросплавов и необходимости больших затрат на обеспечение прямого легирования азотом из газовой фазы возникает потребность в разработке азотсодержащих материалов, которые при производстве углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с карбонитридным упрочнением удовлетворяли бы следующим условиям:

- относительно недорогие и простые в производстве;
- не требующие дополнительного оборудования для ввода в

процессе выплавки или внепечной обработке;

- обеспечивающие стабильное усвоение азота;
- организация их производства возможна непосредственно в

условиях сталеплавильного цеха.

Наиболее полно эти требованиям отвечают известные азотсодержащие лигатуры, получаемые совместным окускованием порошковых ферросплавов с недефицитными и относительно недорогими органическими и минеральными веществами. Например, патент «Лигатура для обработки стали» [28] предусматривает тщательное смешение мелкодробленого материала (≤ 2 мм) базового ферросплава с карбамидом и жидким стеклом дальнейшее брикетирование смеси под давлением не менее 10 МПа с последующей длительной сушкой брикетов.

К недостаткам этого метода относится необходимость мелкого дробления ферросплава, наличие балластной связки (до 10 % жидкого стекла) и длительное смешение для равномерного обволакивания мелких частиц ферросплава, а также создание специального производства по брикетированию смеси. К технологическим недостаткам применения такой лигатуры следует отнести наличие в ней только одного азотсодержащего вещества, что определяет его быструю диссоциацию в небольшом интервале температур при легировании стали и, соответственно, короткий промежуток времени контакта активного газообразного азота с жидким металлом. Это определяет относительно низкое его усвоение сталью, как правило, не превышающее 25 %.

Авторами патента на полезную модель [29] предложена замена карбамида на меламин с более высокой температурой разложения. Изобретение носит весьма перспективный характер, но использование предложенной азотсодержащей лигатуры ограничивается стоимостью меламина, как азотоносителя. Это связано прежде всего с тем, что сырьем для производства меламина является карбамид, поэтому стоимость его, как конечного продукта пиролиза мочевины при высоких давлениях, в 5 раз превышает стоимость более доступного карбамида. Кроме того, применение портландцемента (~8 %) в качестве связующего базового ферросплава с азотоносителем негативно сказывается на шлаковом режиме восстановительного периода плавки при дополнительном внесении серы из связующего.

Авторами работы [30] предложено в качестве связки, цементи-

рующей базовый ферросплав, целесообразнее использовать сам азотсодержащий материал – карбамид, имеющий температуру плавления 132,7°C. Технология предусматривает более крупное дробление ферросплава (≤ 20 мм), его смешение с карбамидом при комнатной температуре, подогрев во вращающемся барабане до температуры, превышающей температуру плавления карбамида не более чем на 5–10 °C и разливку двухфазной системы (жидкий карбамид и твердый ферросплав) в плоские изложницы глубиной ~ 100 мм. При 20 % карбамида в смеси получают весьма прочные куски лигатуры ($\sigma_{\text{разруш.}} \geq 4 \text{ МПа}$) с содержанием азота ~ 6 % мас., которые транспортируются практически без образования мелочи и удобны для легирования стальной ванны в печи или ковше при выпуске. Однако степень усвоения азота из такой азотсодержащей композиции (АЛК) остается на одном уровне с брикетированной лигатурой.

В работе предложено [31] в состав композиции вводить два азотсодержащих материала, обладающих существенной разницей температур диссоциации. Так, например, карбамид начинает разлагаться с образованием аммиака и атомарного азота при температуре ≥ 150 °C, а натриевая селитра – при 380 °C. Это обеспечивает более продолжительный период разложения связки, соответственно, более длительный контакт металла с газообразным азотом и более полное его усвоение.

Дробленный до фракции – 20 мм углеродистый ферромарганец ФМн78 (80 % мас.) смешивали с карбамидом (10 % мас.) и натриевой селитрой (10 % мас.) и нагревали по описанной выше технологии до температуры 135–145°C. При этом расплавляется только карбамид, но 10% жидкой фазы при относительно крупных частицах ферросплава оказывается достаточно для их сцепления. По прочности такая композиция практически не уступает чисто карбамидной, но усвоение из нее азота оказалось выше на 5–7 % и достигало 32–35 %.

В отличие от брикетированной лигатуры производство разработанной азотсодержащей легирующей композиции (АЛК) не требует сложного оборудования и может быть реализовано непосредственно в условиях сталеплавильного цеха в смесителе, оборудованном газовой горелкой для подогрева смеси до указанных температур.

Применение материалов на базе органических азотоносителей (карбамид, натриевая селитра, меламин и др.) является наиболее ра-

циональным при производстве низколегированных конструкционных сталей с карбонитридным упрочнением в которых содержание азота не превышает 0,016 % мас., а учитывая наличие процессов ассимиляции азота жидким металлом в процессе выплавки возникает необходимость его дополнительного ввода на 0,004–0,010 % мас. в зависимости от способа выплавки и конструкции применяемого плавильного агрегата.

Применение результатов исследования введения азота в легированные стали и перспектива данного способа

Учитывая актуальность вопроса, авторы считают, что проблематика статьи указывает на необходимость дальнейших исследований и требует инновационных разработок при производстве сталей нового поколения. Материалы статьи могут быть полезны при производстве вагонного литья и других, не менее важных металлоконструкций. Исследования, проведенные в работе, учитывая ссылки на литературу являются продолжением соответствующей тематики и требует дальнейшего всестороннего развития.

Выводы

1. Проведенный глубокий обзор металлургических способов и приёмов ввода азота в жидкие железо–углеродистые расплавы позволил их систематизировать в зависимости от аппаратного обеспечения и технологических особенностей процесса, что позволило выделить основные рекомендации по обеспечению оборудованием в тех или иных производственных условиях.

2. Изучены механизмы ассимиляции азота металлическим расплавом в зависимости от вида применяемого азотоносителя и технологических факторов. Это дало возможность определять наиболее рациональный вид материала, при помощи которого вводится азот как легирующий элемент.

3. Представлен принципиальный подход в составлении зависимостей позволяющих определить растворимость азота в металлическом расплаве на основании термодинамических величин и концентрации легирующих элементов. Параметры растворимости азота могут быть использованы при предварительном расчете сырьевой базы и экономической целесообразности процесса легирования.

4. Показано, что для производства легированных низкоуглеродистых коррозионностойких сталей наиболее целесообразно приме-

нять продувку металла газообразным азотом, в то время как микролегирование низколегированных конструкционных сталей с карбонитридным упрочнением в отсутствие в Украине производства стандартных азотированных ферросплавов, наиболее рационально применение нетрадиционных азотсодержащих лигатур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Легирование стали газообразным азотом [Текст] / А. И. Пастухов, С. К. Дземьян, Л. А. Смирнов, Ю. А. Дерябин. // В сб. «Производство стали», Свердловск. – 1972. – труды Уральского НИИ черных металлов. – Т.16. – С.108–119.
2. Выплавка высокоазотистых хромоникельмарганцевых сталей методом газокислородного рафинирования [Текст] / В.А. Лейбензон, С. С. Казаков, Ю. В. Садовник и др. // Сталь. – 1999. – №8. – С.18–20.
3. Легирование азотом из газовой фазы в процессе ЭШП [Текст] / А. Д. Рябцев, А. А. Троянский, Е. Л. Корзун и др.// Современная электрометаллургия. – 2003. – №4. – С.3–8.
4. Григоренко Г.М. Водород и азот в металлах при плазменной плавке [Текст] / Г. М. Григоренко, Ю. М. Помарин. – Киев: Наукова думка. 1989. – 200 с.
5. Измайлов В. А. К вопросу о растворимости азота в железе при плазменно-дуговом переплаве [Текст] / В. А. Измайлов, В. А. Истомин, А. В. Измайлов // Электрометаллургия. – 2004. – №1– С.3–8.
6. Процессы азотирования при дуговом шлаковом переплаве [Текст] / Ю. Е. Патон, Б. И. Медовар, Г. М. Григоренко и др. // Проблемы спец. электрометаллургии. – 1991. – №3. – С.14–16.
7. Готин В. Н. Вакуумный дуговой переплав стали и сплавов с регламентированным содержанием азота [Текст] / В. Н. Готин, А. Г. Шалимов // Сталь. – 1993. – №11. – С.32–35.
8. Кац Я.Л. Взаимодействие азота с металлическими расплавами при вакуум-плазменном нагреве. Часть 1. [Текст] / Я. Л. Кац, А. В. Лактионов, Г. Н. Окороков // Проблемы спец. электрометаллургии. – 1990. – №3. – С.82–87.
9. Рашев Ц. Производство легированной стали / Ц. Рашев. – М.: Металлургия, 1981. – 248с.
10. Митчелл А. Электрошлаковый переплав высокоазотистых сталей [Текст] / А. Митчелл, Х. Фредериксон // Проблемы спец. электрометаллургии. – 2005. – №1. – С.4–11.
11. О месте электрошлаковой технологии в производстве сверхазотистых сталей [Текст] / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Я. Саенко, В. А. Тихонов // Проблемы спец. электрометаллургии. – 1990. – №3. – Р.4–13.
12. Патон Б. Е. Азотирование жидкого металла азотом из газовой фазы при дуговом шлаковом переплаве под давлением / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. К. Лебедев и др. [Текст] // Проблемы спец. электрометаллургии. – 1990. – №3. – С.14–18.
13. Получение высокоазотистых сталей и их свойства [Текст] / Б. Е. Патон, В. И. Лакомский, Г. Ф. Торхов, В. А. Слышанкова // Проблемы спец. электрометаллургии. – 1975. – №1. – С.18–20.
14. Выплавка в конвертере азотсодержащих нержавеющей сталей легированных газообразным азотом [Текст] / А. А. Минаков, Ю. В. Садовник, Ю. А. Нефедов и др. // Бюллетень «Черметинформация». – 1983. – №10. – С.31–33.
15. Валерс Ф. Й. Производство коррозионностойких сталей фирмой KRUPP THYSSEN NIROSTA [Текст] / Ф. Й. Валерс, М. Вальтер, Х. Церхер // Черные металлы. – 1999. – №2. – С.13–18

16. Новый завод по производству коррозионной стали фирмы UGINE & ALZ : (Обзор проекта после года эксплуатации) [Текст] / Й. Штайнц, С. Димитров, М. Хиблер и др. // «Черные металлы». – 2004. – №5. – С.73–77
17. Офепгенден А. М. К вопросу о кинетике растворения ферросплавов в жидкой стали [Текст] / А. М. Офепгенден, В. Н. Явойский. // В сб.: Тр. МИСиС. – 48 : Теория и технология новых процессов в производстве стали – М.: Металлургия, 1968. – С.151–155.
18. Pehlke R. D. Solubility of nitrogen in liquid iron alloys. – Thermodynamics [Текст] / R. D. Pehlke, J.F. Elliot. Trans. Met. Soc. ASME, 1960, v.216, p. 1088–1101.
19. Вагнер Г. Термодинамика сплавов [Текст] / Г. Вагнер – М.: Metallurgizdat, 1957. – 194с.
20. Помарин Ю. М. Вплив газів на структуру та властивості металів і сплавів: підруч [Текст] : [для студ. вищ. навч. зал.] / Ю. М. Помарин, О. М. Бялік, Г. М. Григоренко. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 128с.
21. Линчевский Б. В. Термодинамика и кинетика взаимодействия газов с жидкими металлами [Текст] / Б. В. Линчевский. – М.: Металлургия, 1986. – 222с.
22. Азот в металлах [Текст] / В. В. Аверин, А. В. Ревякин, В. И. Федорченко, Л. Н. Козина. – М.: Металлургия, 1976. – 224 с.
23. Лакомский В.И. Взаимодействие диатомных газов с жидкими металлами при высоких температурах [Текст]/В.И. Лакомский, – Киев:Наук.думка,1992.– 232с.
24. Лакомский В. И. Влияние хрома и никеля на растворимость азота в сплавах железа при высоких температурах [Текст] / В. И. Лакомский, Г. И. Григоренко, Г. Ф. Торхов, Ю. И. Помарин. – В сб.: Взаимодействие газов с металлами. Тр. 3 советско-японского симпозиума по физико-химическим основам металлургических процессов. – М.: Наука, 1973, с.125–134.
25. Турдоган Е. Т. Физическая химия высокотемпературных процессов [Текст] / Е. Т. Турдоган. – М., 1985. – 344с.
26. Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Левашов Е. А., Рогачев А. С., Юхвид В. И., Боровинская И. П. – М.: «Издательство БИНOM», 1999. – 176с.
27. Нефедов Ю.А. Освоение газокислородного рафинирования в КНР / Ю.А. Нефедов, Ю.В. Садовник, Х. Ян, О.Д. Бровко, И.М. Ушенин // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 2008. - №3. - С. 20-22.
28. Пат. 2000349 Российская Федерация, МКИ С22 С35/00. Лигатура для обработки стали / Паршин В. А., Захаров В.А., Лякишев Н.П., Тишаев С.И., Чернега Н.И., Галкин М.В., Горячев В.Н., Мусатов А.С., Киричков А. А., Могутнов Б. М. – №5022021/02; Заявл. 08.01.1992; Опубл. 07.09.1993; Бюл.№33–36.– 5с.
29. Пат. 43747 U Україна, МПК (2009) С22С 35/00. Азотовмісна лігатура / Панченко Г.М., Учитель О.Д., Гасик М.І. – № u200903896; Заявл. 21.04.09; Опубл. 25.08.09, Бюл.№ 16.
30. Разработка технологии низкотемпературного жидкофазного синтеза окискованных азотсодержащих лигатур / Г.Н. Трегубенко, Б.А. Нижегородов, Н.В. Игнатов и др.//Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – №4. – С.24–27.
31. Пат. 59276 А Україна, МПК⁷ С22С35/00. Спосіб одержання азотовмісної лігатури / Рабинович О.В., Трегубенко Г.М., Тарасьєв М.І., Ігнатов М.В., Пучиков А.В., Бубликов Ю.О. – № 20021210430; Заявл. 23.12.02; Опубл. 15.08.03, Бюл.№ 8.

R.V. Barsuk, O.A. Ryadno

CONSTRUCTION OF THE CHOICE FUNCTION OF THE PREFERENCE SOLUTIONS FOR THE PELLET BURNER

Annotation. Object modeling – the burner with fuel granules (pellets) for heating. It was investigated the effect of the five physical parameters on the three output parameters of the burners. The experimental results are compared with each other, and with the help of expert estimates it was constructed the complete matrix of the binary choice relation. It was constructed the mathematical model of the choice function. As arguments – the values of physical parameters of the compared pairs solutions, as functions – the value 1 or 0 depending on whether a pair physical parameters is preferable.

Key words: choice function, binary relation, mathematical model, expert evaluation.

Problems formulation

There are considered tubular gas heater [7]. This heaters design is burner, pipe for supplying primary air, pipe for supplying fuel and tubular heater. As fuel could be used different fuels. But the article deals with using biofuels such as pellets. According to the authors it is the most promising and needy research.

Burner design characterized by following components: burner area and effective area for primary air penetration. Heater is certain pipe diameter. In the interval between tubular part and burner gets secondary air. Traction creates by ejector at the tubular heater outlet.

Fig. 1 shows principle tubular gas heater pellets burner block diagram and shows main elements.

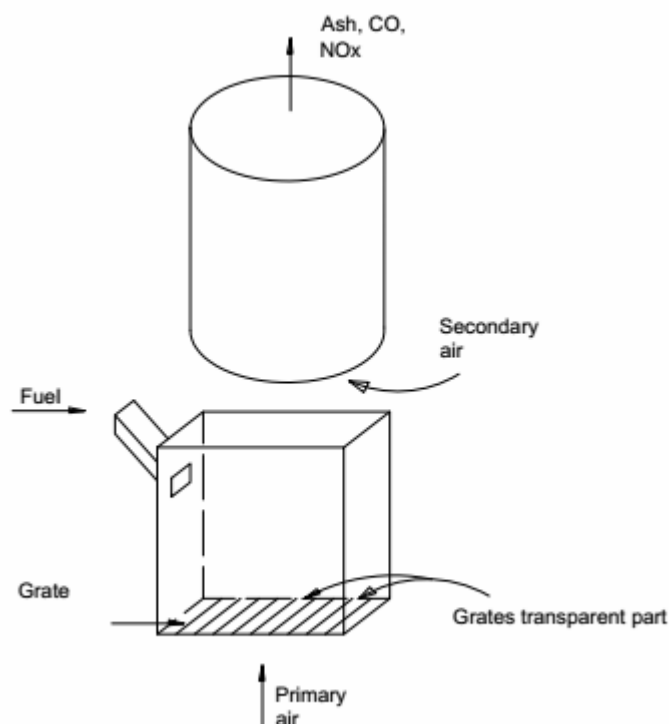


Fig. 1 Tubular heater pellets burner principle block diagram

Tubular heaters design parameters are below:

- Burner area, S ;
- Useful area for primary air passage, S_{fir} ;
- Primary air flow, L_1 ;
- Total air flow, L_{tot} ;
- Burner power, W .

Also it could be shown criteria by witch being heaters work evaluation:

- Ash transfer by the time, A ;
- Concentration CO at exhaust gases, C_{CO} ;
- Concentration NO_x at exhaust gases, C_{NOx} .

There are following requirements for parameters that characterize tubular heaters work: for CO it is less than 130 mg/m^3 and for NO_x – less than 250 mg/m^3 . Therefore such tags as CO and NO_x are shown at tubular heater schematically block diagram. Also such parameter as ash is typical because of strengthened primary air supply creates unintended carrying out ash from the burner. It leads to tube clogging, which degrades heat transfer and reduces tube efficiency.

Thus, to the input parameters that characterized tubular heaters working include following: burner characteristic size, pellets using, primary and total air flow. To output parameters include following: ash transfer by the time burner works and CO and NO_x concentrations in exhaust gases.

There are conducted research and decided to build choose function mathematical model for this heaters. For this experimental data were transformed tubular heater in pair comparison matrix type work.

Recently research analysis

Tubular heaters have been widely used in late twentieth century. They used mostly for industrial facilities autonomous heating systems [9] such as greenhouses [3], workshops. Using these heaters in residential and public buildings is not allowed [1].

There are various heaters construction schemes including air heating systems [8], systems with recirculation, etc.

One of the perspective directions is tubular heater using in building construction [11].

There are various approaches for tubular heaters modeling [2, 4, 10, 14]. But these article problems substantially differ from current.

Article aims

Authors set goal to build full choose function [5, 12]. For accomplishing this aim was built pair comparison table by experimental points. Each of these points represents experimental mode for which were made relevant measurements.

Main material

As researches result were obtained experimental data table. It present in table 1.

Table1

Experimental data converted into dimensionless kind and in relative form from 0 to 1

							max=130	max=250
№	S	S пер	L _{заг}	L ₁	W	З	C _{CO}	C _{NOx}
1	0,5	0,572	0,7155	0,440252	0,335	0,175	0,012	0,964
2	0,5	0,572	0,6795	0,430464	0,313	0,240	0,153	0,681
3	0,5	0,572	0,6795	0,397	0,547	0,231	0,001	0,852
4	1	0,643	0,792	0,738	0,18	0,018	0,102	0,845
5	1	0,643	0,8145	0,828	0,32	0,039	0,016	0,674
6	1	0,643	0,855	0,736	0,355	0,458	0,003	0,757
7	1	0,643	0,7785	0,924	0,828	0,233	-	-
8	0,5	0,254	0,8865	0,38	0,26	0,024	-	-
9	0,5	0,245	0,7425	0,484	0,32	0,018	-	-
10	0,5	0,254	0,7515	0,509	0,36	0,010	-	-
11	1	0,287	0,819	0,769	0,3	0,083	-	-
12	1	0,287	0,774	0,872	0,6	0,278	-	-
13	1	0,287	0,742	0,787	0,94	0,202	-	-
14	0,5	0,572	0,723	0,218	0,18	-	0,051	0,431
15	0,5	0,572	0,671	0,134	0,2	-	0,016	0,753
16	0,25	0,084	0,25125	0,134	0,064	0,298	0,063	0,293
17	0,25	0,084	0,21	0,244	0,09	0,583	0,066	0,441
18	0,25	0,084	0,20625	0,26	0,18	0,833	0,164	0,359
19	0,25	0,084	0,188	0,337	0,18	0,583	0,178	0,411
20	0,25	0,084	0,268	0,102	0,047	0,133	0,032	0,48
21	0,25	0,084	0,25125	0,139	0,113	0,408	0,03	0,635
22	0,25	0,084	0,245	0,153	0,1	0,417	0,023	0,691
23	0,25	0,084	0,2275	0,214	0,128	0,300	0,018	0,697
24	0,25	0,084	0,2225	0,14	0,053	0,150	0,018	0,661
25	0,25	0,084	0,208	0,167	0,045	0,058	0,049	0,526

The following table 1 below shows pair comparisons. If the point that compared better comparison point than we get 1. Vice versa we get 0. This method (matrix task) is the best for such problem [6].

Experimental modes comparison (Column mode compared to line regime,
if its better than 1, on the contrary – 0)

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0
4	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1
5	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
7	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
11	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1
12	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1
13	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1
14	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1
16	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
21	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
22	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
23	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
24	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
25	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1

Experimental modes comparison (Column mode compared to line regime,
if its better than 1, on the contrary – 0)

№	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
2	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
17	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
18	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
21	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0
22	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
23	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
24	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
25	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1

Formally chose function [13] can be written in following form:

$$C_R(X) = \{x \in X / \forall y \in X, xRy\} \quad (1)$$

where:

$C_R(X)$ - chose function;

x – single presentation;

X – incoming presents amount;

R – binary choice relation.

Table 1 at fact is matrix setting choice function R but only on conducted experimental set.

It is interest to expand choice function (extrapolation) on investigation area. It is applicable different approaches. In this article proposed for specify choice used indicator choice function form as:

$$Y(x^{(1)}, x^{(2)}) = \text{int}\left(\frac{Z(a_1, a_2, \dots, a_6, x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_5^{(1)})}{Z(a_7, a_8, \dots, a_{11}, x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, \dots, x_5^{(2)})}\right) \quad (2)$$

$$Y \in \{0, 1\}$$

де:

$x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_5^{(1)}$ – parameters values at the point 1;

$x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, \dots, x_5^{(2)}$ – parameters values at the point 2;

$a_1, a_2, \dots, a_{11}$ – choice function parameters.

Thus if $Y=1$ than value $x^{(1)}$ preferable than $x^{(2)}$.

Thus if $Y=0$ than value $x^{(2)}$ preferable than $x^{(1)}$.

Recovery choice indicator function (2) task formulated as follows.

It is necessary to find unknown parameters $a_1, a_2, \dots, a_{11}$ meaning such that the indicator choice function value at experimental data (table 1) points best correspond to comparison table 2.

Specific depending form (2) may be different. There are studied as linear and nonlinear dependings. For example for construction dependence:

$$Z^1(a_1, a_2, \dots, a_6, x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_5^{(1)}) = a_1 + a_2 x_1^1 + a_3 x_2^1 + a_4 x_3^1 + a_5 x_4^1 x_5^1 + a_6 x_5^1 x_6^1$$

and:

$$Z^2(a_7, a_8, \dots, a_{11}, x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, \dots, x_5^{(2)}) = a_6 + a_7 x_1^2 + a_8 x_2^2 + a_9 x_3^2 + a_{10} x_4^2 x_5^2 + a_{11} x_5^2 x_6^2$$

As values deviation minimizing results for indicator function (2) from table 2 comparison matrix meanings obtained parameters that presented at table 3:

Table 3

Choice function models parameters

№	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}
Koef	-28.27	-3.46	20.65	-5.07	2.07	0.56	-0.37	42.93	15.83	-0.15	-15.87

Thus choice function identification achieved percent is 78%.

Conclusions

There are choice function's construction's sequence are sets. There are posed point comparison results that characterized tubular gas heater's condition with expert's evaluation using. Also posed output functions comparisons by which can be characterize improving tubular gas heater's performance or vise versa.

REFERENCES

1. Горелки газовые промышленные. Общие технические требования : ГОСТ 21204-97 / Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Изд. офиц. ; [введ. 1998-07-01 ; взамен ГОСТ 21204-83]. – Минск, 1998. – 35 с.:табл. – (Межгосударственный стандарт).
2. Дудкин К. В. Математическое моделирование трубчатых газовых нагревателей для безопасного нагрева воды в объеме со свободной поверхностью / К. В. Дудкин, В. В. Ткачева, Ю. В. Бобырь // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры”; под общ.ред. В. И. Большакова. – Днепропетровск, 2011. – Вып. 62 : Безопасность жизнедеятельности 2011. – С. 166–170.
3. Дудкин К. В. Воздушно-водяная система теплоснабжения теплиц с трубчатыми газовыми нагревателями / Дудкин К. В., Ткачова В. В., Данишевский В. В. // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 3, № 8(63). – С. 57–60.
4. Іродов В. Ф. Регуляризація часткових описів при еволюційному пошуку рішень на основі самоорганізації / Іродов В. Ф., Барсук Р. В. // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. академии стр-ва и архитектуры; под общ. ред. В. И. Большакова. – Днепропетровск, 2015. – Вып. 84. – С. 111–116.
5. Литваков Б. М. Аппроксимация функций выбора. / Литваков Б. М. // Автоматика и телемеханика. – 1984. – Вып. 9. – С. 138-146. – Режим доступа:
<http://www.mathnet.ru/links/6c3faa9f1f8e0e4abf8580f75055ba32/at4847.pdf>
6. Теория выбора и принятия решений / Макаров И. М., Виноградская Т. М., Рубчинский А. А., Соколов В. Б. – Москва: Наука, 1982. – 328 с.
7. Пристрій для променевого обігріву та нагрівання повітря : пат. 61594 Україна (UA), МПК F24D 10/00, F24C 15/00 / Іродов В. Ф., Осетянська Д. Є., Хацкевич Ю. В.; заявник та власник Придніпр. акад. буд-ва і архітектури. – № u201015435; заявл. 20.12.2010 ;опубл. 25.07.2011, Бюл. № 14

8. Пристрій для променевого обігріву та нагрівання повітря : пат. 92674 Україна (UA), МПК F24D 10/00, F24D 15/00, F24C 15/00 / винахідники та власники : Барсук Р. В., Іродов В. Ф., Чорнойван А. А. – № u201403524 ; заявл. 05.04.2014 ; опубл. 26.08.2014, Бюл. № 16.
9. Система повітряно-променевого опалення : пат. 83475 Україна (UA), МПК F24D 10/00, F24D 15/00 / винахідники та власники : Дудкін К. В., Іродов В. Ф., Ткачова В. В., Чорноморець Г. Я. – № u 201304161 ; заявл. 03.04.2013 ; опубл. 10.09.2013, Бюл. № 17.
10. Ткачова В. В. Індуктивне моделювання трубчастого газового нагрівача та пальника на пелетах / Ткачова В. В., Барсук Р. В. // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднeпр. гос. акад. стр-ва и архитектуры ; подбщ. ред. В. И. Большакова. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 78 : Компьютерные системы и информационные технологии в образовании, науке и управлении. – С. 275–281.
11. Чорноморець Г. Я. Техніко-економічне обґрунтування використання трубчастих нагрівачів розташованих у будівельних конструкціях / Чорноморець Г. Я. // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднeпр. гос. акад. стр-ва и архитектуры ; подбщ. ред. В. И. Большакова. – Днепропетровск. – Вып. 76 : Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве. – С. 293–298.
12. Юдин Д. Б. Вычислительные методы теории принятия решений / Юдин Д. Б. – Москва: Наука, 1989. – 320 с.
13. Salama A. S. Accurate topological measures for rough sets / Salama A. S. // International Journal of advanced research in artificial intelligence. – 2015. – Vol. 4, iss. 4. – P. 31–37. – Available at:
https://thesai.org/Downloads/IJARAI/Volume4No4/Paper_5-Accurate_Topological_Measures_for_Rough_Sets.pdf
14. Taler D. Mathematical modeling of tube heat exchanger with complex flow arrangement / Dawid Taler, Marcin Trojan, Jan Taler // Chemical and Process Engineering. – 2011. – Vol. 32, iss. 1. – P. 7-19. – Available at:
[http://www.degruyter.com/dg/viewarticle.fullcontentlink:pdfeventlink/\\$002fj\\$002fcpe.2011.32.issue-1\\$002fv10176-011-0001-y\\$002fv10176-011-0001-y.pdf/v10176-011-0001-y.pdf?t:ac=j\\$002fcpe.2011.32.issue-1\\$002fv10176-011-0001-y\\$002fv10176-011-0001-y.xml](http://www.degruyter.com/dg/viewarticle.fullcontentlink:pdfeventlink/$002fj$002fcpe.2011.32.issue-1$002fv10176-011-0001-y$002fv10176-011-0001-y.pdf/v10176-011-0001-y.pdf?t:ac=j$002fcpe.2011.32.issue-1$002fv10176-011-0001-y$002fv10176-011-0001-y.xml)

Т.В. Селиверстова, В.Ю. Селиверстов

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ БЛОКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ИЗ СТАЛИ Р18Л В ОБОЛОЧКОВОЙ ФОРМЕ

Аннотация. Представлены результаты компьютерного моделирования герметизации блока отливок цилиндрической формы из стали Р18Л, получаемых по действующей технологии в формах литья по выплавляемым моделям. Показана возможность использования газодинамического воздействия на затвердевающий металл при условии изменения конструкции блока.

Введение. Как известно, специальные способы литья позволяют резко снизить трудозатраты и металлоемкость получаемых отливок, способствуют достижению более высоких физико-механических характеристик и эксплуатационных свойств литого металла. Наряду с дальнейшим усовершенствованием специальных способов гравитационного литья (кокили, керамические, оболочковые, графитовые и др.), проводится разработка новых эффективных методов воздействия на кристаллизующийся металл, к числу которых можно отнести технологию газодинамического воздействия на расплав в форме ЛВМ.

Анализ предыдущих публикаций и постановка задачи. При реализации данной технологии в течение всего процесса затвердевания на жидкий металл оказывается воздействие за счет создания регулируемого газового давления в герметизированной системе отливка-устройство для ввода газа. Процесс предполагает в качестве необходимого условия осуществления наличие на поверхности рабочей полости литейной формы слоя затвердевшего металла к моменту подачи газа в систему отливка-устройство для подачи газа [1 - 3]. Толщина этого увеличивающегося во времени слоя должна обеспечивать по своим прочностным характеристикам герметичность системы отливка-устройство для ввода газа, находящейся под нарастающим давлением, вплоть до полного затвердевания отливки. При осуществлении

газодинамического воздействия на протяжении всего процесса затвердения необходимо поддерживать максимально возможный уровень газового давления, величина которого, в свою очередь, будет обуславливаться прочностными характеристиками образующегося на поверхности отливки герметизирующего затвердевшего слоя металла. По мере увеличения толщины затвердевшего слоя его прочность будет расти, что дает возможность повышать давление [4, 5]. Результаты ранее проведенных работ показали эффективность данного метода активного физического воздействия на затвердевающий в литейной форме металл при изготовлении отливок как в кокиле [6 - 8], так и в керамической оболочковой форме ЛВМ [9]. При этом наибольшая эффективность метода может быть достигнута путем создания таких теплофизических условий затвердевания отливки, которые предполагают герметизацию системы отливка-устройство для ввода газа за счет равномерного формирования на всей поверхности отливки затвердевшего слоя. Кроме того, эффективность зависит от возможности встраивания технологии в действующий технологический процесс без значительных его корректировок, дополнительного оборудования и персонала. Учитывая также разнообразие конфигуративных особенностей отливок, получаемых литьем по выплавляемым моделям, актуальной задачей является оценка пригодности конструкции блока, используемого по действующей технологии и разработка рациональной конструкции блока ЛВМ с точки зрения возможности реализации процесса газодинамического воздействия.

Целью работы является определение условий герметизации блока цилиндрических отливок из сплава Р18Л, затвердевающих в форме ЛВМ, для осуществления газодинамического воздействия на расплав.

Результаты исследований. Схема блока отливок, изготавливаемых по традиционной технологии ЛВМ, представлена на рис.1. Отливки цилиндрической формы из сплава Р18Л (табл.1) изготавливаются в восьмислойных оболочковых формах. Материал – кристаллический кварц.

Химический состав стали

Содержание элементов, %							
C	Cr	W	V	Mo	S	P	Fe
0,75	4,7	18,5	1,17	0,17	0,03	0,02	ост.

Для определения термовременных параметров процесса герметизации блока отливок и получения численного решения задачи расчета процесса затвердевания использовали метод конечных элементов в программной реализации системой компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «Полигон». При моделировании методами конечных элементов выделяются следующие основные этапы: препроцессинг, расчет и постпроцессинг. Препроцессинг включает в себя построение твердотельной модели объекта и построение конечно-элементной модели объекта. Расчет созданной конечноэлементной модели блока отливок осуществляли в соответствии с алгоритмом теплового расчета, реализованным в программе. На этапе постпроцессинга происходила обработка результатов расчета и их интерпретация в терминах предметной области.

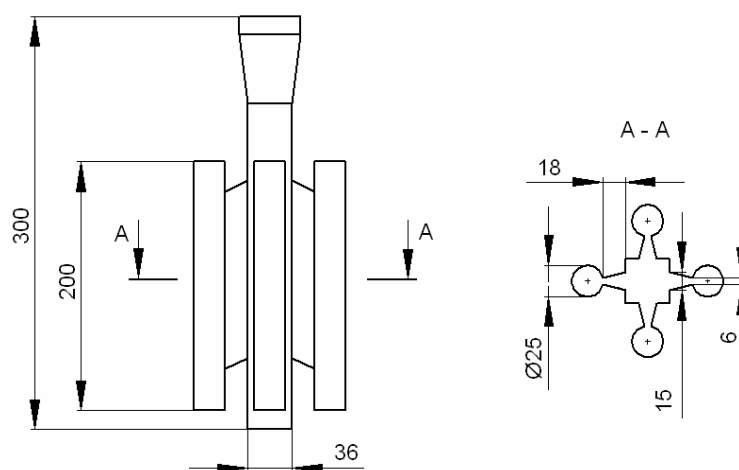


Рисунок 1 - Схема блока, изготавливаемого по действующей технологии

Для проведения моделирования были выбраны исходные параметры и свойства материалов отливки и литейной формы, основные из которых представлены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные для проведения моделирования
в СКМ ЛП «Полигон»

Параметры	Значение
Теплофизические свойства быстрорежущей стали Р18Л	
Плотность, кг/м ³	8800
Теплоемкость, Дж/кг К	460
Теплопроводность, Вт/мК	27
Скрытая теплота кристаллизации, кДж/кг	260
Температурный интервал кристаллизации, °С	1310 – 1380
Теплофизические свойства материала формы	
Объемная теплоемкость, кДж/м ³ К	2100
Теплопроводность, Вт/мК	0,52
Параметры теплообмена (коэффициент теплопередачи на границе), Вт/(м²·К)	
Отливка – Форма	4000
Форма – Отливка	4000
Отливка – Среда	200
Форма – Среда	180
Начальные температуры отливки и формы, °С	
Отливка	1450
Форма	900

На рис. 2 представлены визуализированные результаты теплового расчета процесса затвердевания блока отливок, изготавливаемых по действующей технологии.

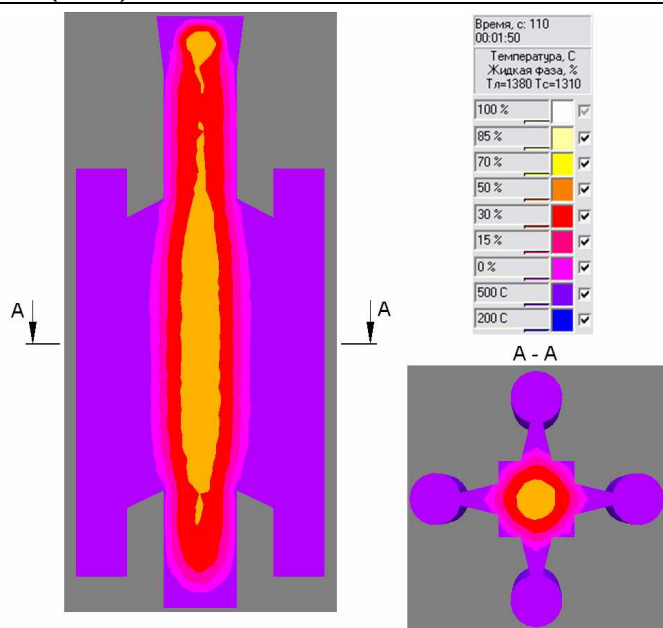


Рисунок 2 - Визуализированные результаты теплового расчета процесса затвердевания блока отливок на 110 – й секунде:
вертикальный разрез и горизонтальное сечение

Приведенные данные свидетельствуют о том, что к моменту формирования затвердевшего слоя на поверхности стояка, отливки оказываются полностью затвердевшими. Данная конструкция блока не обеспечивает условия реализации варианта технологии газодинамического воздействия, основанного на соответствии толщины затвердевшего слоя создаваемому давлению в системе отливка-устройство для ввода газа. При действующей конструкции блока ЛВМ возможно использовать только прочностные свойства материала литейной формы. Соответственно, реализация технологии газодинамического воздействия возможна в диапазоне давлений 0,1 – 0,3 МПа.

Измененная конструкция блока отливок представлена на рис. 3. Была изменена форма и размеры стояка, питателей, а также утеплены отдельные части формы за счет нанесения дополнительных слоев огнеупорной оболочки. На рис. 4 представлены результаты теплового расчета процесса затвердевания блока измененной конструкции.

Из рисунка видно, что на поверхности блока практически равномерно образуется герметизирующий слой затвердевшего металла.

СКМ ЛП «Полигон» позволяет получить данные о процессе затвердевания в любой точке отливки при установке в соответствующих местах виртуальных термодатчиков. На рисунке 5 представлена схема расположения виртуальных термодатчиков, находящихся в горизонтальном сечении блока на расстоянии 1,5 мм от поверхности отливки, а также соответствующие кривые охлаждения.

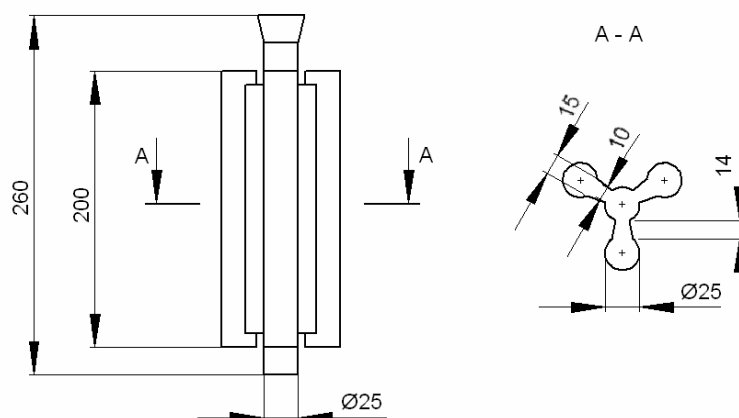


Рисунок 3 - Схема блока измененной конструкции

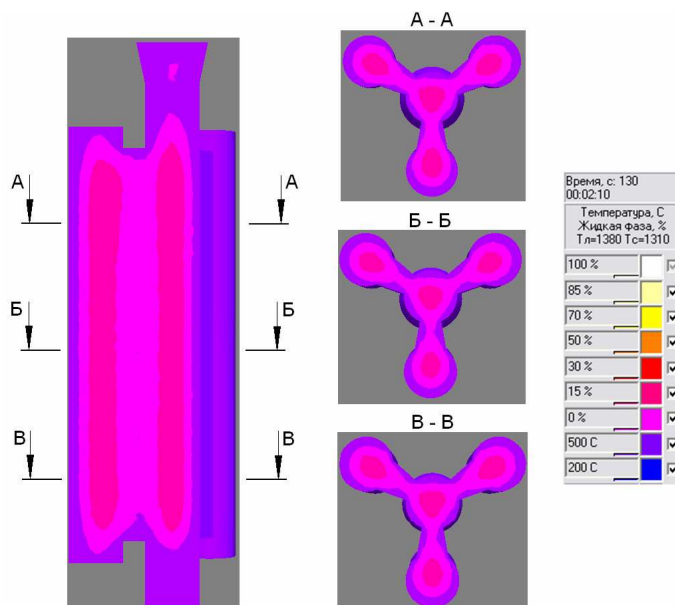


Рисунок 4 - Визуализированные результаты теплового расчета процесса затвердевания блока отливок измененной конструкции на 130 – й секунде:

вертикальный разрез и горизонтальные сечения

Полученные результаты компьютерного моделирования процесса затвердевания рассматриваемого блока отливок позволяют утверждать, что через 130 секунд после окончания заливки на всей поверхности формы образуется твёрдый слой металла, т.е. блок отливок оказывается полностью герметичным за счет формирования равномерной корки. Это дает возможность осуществлять газодинамическое воздействие вплоть до полного затвердевания отливок.

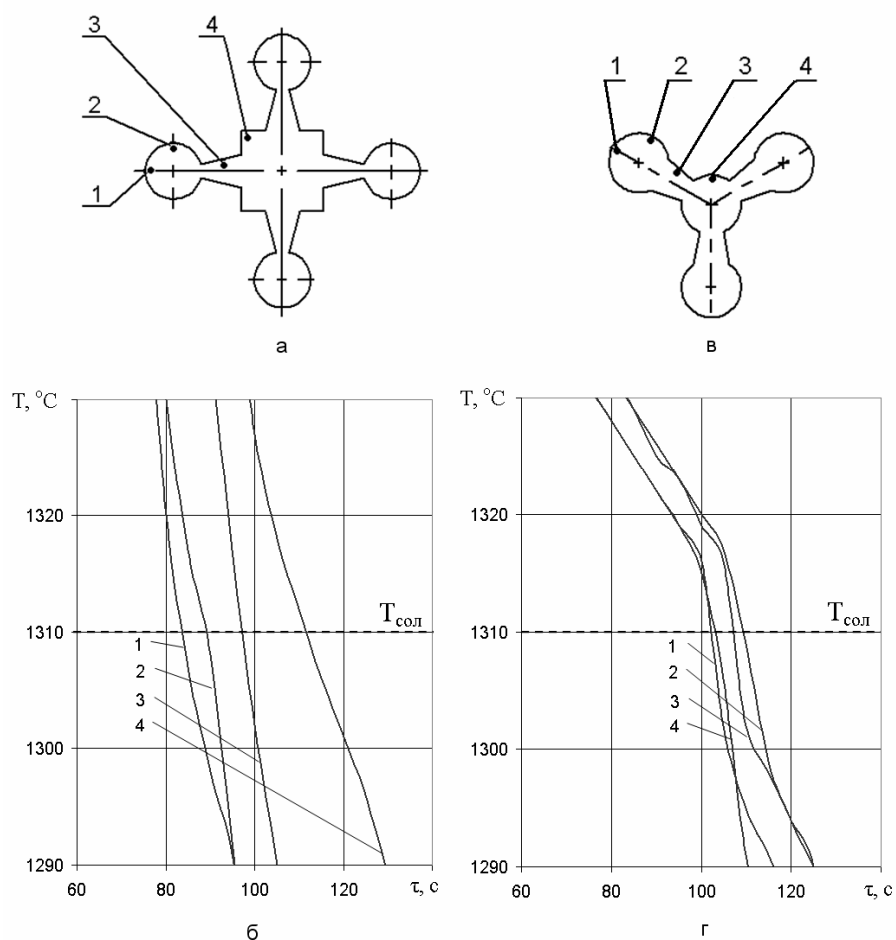


Рисунок 5 - Схема размещения виртуальных термодпар в сечении блоков и кривые охлаждения отливок в соответствующих местах: по действующей технологии (а, б), измененной конструкции (в, г)

Плотность температурных кривых, полученных в варианте измененной конструкции блока отливок, показывает, что на различных участках поверхности блока герметизирующая корка формируется практически одновременно, в отличие от действующей конструкции,

где зафиксирована значительная разница во времени формирования герметизирующего слоя затвердевшего металла одной толщины.

Выводы:

1. Проведено моделирование в СКМ ЛП «Полигон» процесса герметизации блока цилиндрических отливок из стали Р18Л, изготавливаемых по действующей технологии в форме ЛВМ. Установлено, что к моменту формирования затвердевшего слоя на поверхности стояка, отливки оказываются полностью затвердевшими. Данная конструкция блока не обеспечивает условия реализации варианта технологии газодинамического воздействия, основанного на соответствии толщины затвердевшего слоя создаваемому давлению в системе отливка-устройство для ввода газа.

2. Расчеты показали, что при действующей конструкции блока ЛВМ возможно использовать только прочностные свойства материала литейной формы. Соответственно, реализация технологии газодинамического воздействия возможна в диапазоне давлений 0,1 – 0,3 МПа.

3. Установлена возможность изменения конструкции блока отливок, что позволит, согласно результатам проведенного моделирования, осуществлять «полноценное» газодинамическое воздействие на затвердевающий расплав в литейной форме. Установлено также, что процесс герметизации блока при этом закончится через ~ 130 секунд формированием затвердевшей поверхностной корки толщиной 1 - 2,5 мм, что дает возможность в дальнейшем увеличивать давление в системе отливка-устройство для ввода газа в соответствии с кинетикой увеличения слоя вплоть до полного затвердевания отливок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Деклараційний патент, Україна МПК (2006) В22D 18/00 Спосіб отримання виливків/ Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Доценко Ю.В. № 28858 заявл. 03.08.2007, опубл. 25.12.2007 Бюл. № 21.
2. Деклараційний патент, Україна МПК (2006) В22D 18/00 Пристрій для отримання виливків/ Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., До-

- ценко Ю.В. № 28859 заявл. 03.08.2007, опубл. 25.12.2007 Бюл. № 21.
3. Селиверстов В.Ю. Технология газодинамического воздействия на расплав в литейной форме – один из перспективных способов повышения качества металла отливок // Сучасні проблеми металургії. Наукові праці. 2007. – Том 10. – С. 25 – 35.
4. Селиверстов В.Ю. Особенности определения технологических параметров газодинамического воздействия на расплав в литейной форме // Системні технології: Регіональний міжвузівський збірник наукових праць / МОН України. Національна металургійна академія України. Вип. 4 (63): Системні технології обробки інформації. Системне моделювання технологічних процесів – Дніпропетровськ: ДНВП «Системні технології», 2009. – С. 91-98.
5. Селиверстов В.Ю., Михайловская Т.В. Методика расчета параметров газодинамического воздействия на затвердевающий металл в литейной форме// Системні технології: Регіональний міжвузівський збірник наукових праць / МОН України. Національна металургійна академія України. Вип. 3 (68): Інформаційні технології в процесах одержання матеріалів із заданими властивостями. Інтелектуальні інформаційно-управляючі системи – Дніпропетровськ: НМетАУ, кафедра Інформаційних технологій і систем, 2010. – С. 186-192.
6. Селиверстов В.Ю., Михайловская Т.В., Доценко Ю.В., Мушенков Ю.А. Влияние газодинамического воздействия на распределение сульфидных включений в цилиндрической отливке из углеродистой стали, затвердевающей в кокиле // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. - №5. - С. 40 – 43.
7. Селівьорстов В.Ю., Хричиков В.Є., Куцова В.З., Носко О.А., Доценко Ю.В., Куц П.Д. Особливості структуроутворення литої вуглецевої сталі при газодинамічному впливі // Теорія і практика металургії. – 2009. - № 5-6. – С. 80-85.
8. Селівьорстов В.Ю. Дослідження газодинамічного впливу на властивості литої вуглецевої сталі // Теорія і практика металургії. – 2007. - № 4-5. – С. 22 - 25.
9. Селівьорстов В.Ю., Куц П.Д. Використання технології газодинамічного впливу на розплав при литті по витоплюваним моделям // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» - 2010. - № 4 – С. 89 – 94.

СОДЕРЖАНИЕ

Волковский О.С., Ковылин Е.Р.

Анализ современных подходов к задаче автоматической генерации текста на естественном языке 3

Шулькевич Т.В., Селін Ю.М.

Проблеми прогнозування негативних процесів різної природи 12

Данилов В.Я., Слюсар А.В., Гусев О.А.

Вейвлет аналіз рядів валютних котирувань 20

Худяков О.Ю., Бойко М.М., Полякова Н.В., Петренко В.І., Ващенко С.В., Баюл К.В.

Розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності огрудкування агломераційних шихт 27

Егоров А.П., Зворыкин В.Б., Михалев А.И., Кузьменко М.Ю., Балакин В.Ф.

Моделирование многосвязных систем управления скоростным режимом прокатки на непрерывном мелкосортном стане 36

Strelkovskaya L.A.

Ship management internal combustion engines with regard to its technical state based theory of fuzzy sets 45

Кучеренко А.Е.

Аппроксимация момента инерции и поиск оптимальной формы Сечения стержня 54

Танцура Т.О., Коробочка О.М., Білоус О.І.

Системні дослідження напружень в матеріалі шліфувального круга 61

Швачка А.И., Бородулин А.В., Чернецкий Е.В., Олейник О.Ю., Довгополый Я.А.

Применение информационных технологий в теплоэнергетической модели домы и повышение ее энергоэффективности 68

Узлов К.І., Мовчан О.В., Михайлова К.І.

Обґрунтування вибору раціонального профілю прокату та ефективного матеріалу для виготовлення обв'язки вантажних вагонів 76

Nechyporenko Alina S.

Method of biomedical time series processing for pathology classification 85

Скалозуб В.В., Паник Л.А.

О построении обобщенных моделей планирования неоднородных транспортных потоков 94

Тимошенко М.А.

Аналіз сучасних методів автоматизованого керування процесами збагачення залізної руди..... 102

Сіманенков А.Л., Рожков С.О.

Аналіз використання ПІДД²Д³-регуляторів в суднових енергетичних установках..... 114

Бубликов Ю.А., Поляков Г.А., Подгорный С.Н., Селегей С.Н., Селегей А.Н.

Анализ технологических особенностей и способов легирования стали азотом 124

Barsuk R.V., Ryadno O.A.

Construction of the choice function of the preference solutions for the pellet burner..... 139

Селиверстова Т.В., Селиверстов В.Ю.

Компьютерное моделирование затвердевания блока цилиндрических заготовок из стали Р18Л в оболочковой форме..... 148

РЕФЕРАТЫ

УДК 004.738.52

Волковський О.С., Ковилін О.Р. **Аналіз сучасних підходів до задачі автоматичної генерації тексту на природній мові** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (106). - Днепр, 2016. - С.3 - 11.

Розглянуто сучасні реалізації систем автоматичної генерації тексту і фундаментальні підходи до процесу автоматичної обробки текстів. На основі проведеного аналізу здійснено вибір найбільш підходящої технології побудови систем синтезу осмисленого тексту.

Бібл. 7, табл. 1.

УДК 57-77

Селин Ю.М. **Проблемы прогнозирования негативных процессов различной природы** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (106). - Днепр, 2016. - С.12 - 19.

В статье рассматривается вопрос анализа показателя «качества жизни» в качестве основного критерия социально-экономического развития общества и факторы, влияющие на его формирование. Анализируются экономические и экологические составляющие, которые могут негативно повлиять на уровень качества жизни. Делается вывод о необходимости разработки математического аппарата для одновременного прогнозирования экономических и экологических процессов для предотвращения ухудшения уровня.

Библ. 8, ил. 1.

УДК: 004.023

Данилов В.Я., Слюсар А.В., Гусев О.А. **Вейвлет аналіз рядів валютних котирувань** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (106). - Днепр, 2016. - С.20 - 26.

Належним чином спроектовані алгоритми для аналізу рядів валютних котирувань, виявлення хвиль Елліотта і подальшого прогнозування поведінки фінансових ринків, що надають можливість передбачити стан економіки. Розроблено індикатор на основі вейвлет перетворення, який дозволяє виділяти та досліджувати хвилі Елліотта. Для розв'язання поставлених задач використано такі методи: MACD та показник Херста для аналізу проміжків сталого тренду для хвиль Елліотта; дискретне вейвлет перетворення для згладжування хвилі; неперервне вейвлет перетворення для виділення хвиль Елліотта на часовому ряді.

Бібл. 10, іл. 11, табл. 0.

УДК 622.788

Худяков О.Ю., Бойко М.М., Петренко В.І., Полякова Н.В., Ващенко С.В., Баюл К.В. **Розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності огрудкування агломераційних шихт** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (106). - Днепр, 2016. - С.27 - 35.

У статті представлені результати дослідження сукупного впливу еквівалентного діаметра і коефіцієнта варіації крупності гранул шихти на порізність шару. Вперше запропо-

новано новий структурний показник, який може бути використаний при оцінці ефективності процесу огрудкування. Розроблено рекомендації щодо підвищення ефективності огрудкування агломераційних шихт.

Бібл. 10, іл. 2, табл. 1.

УДК 621.771.685.5

Егоров О.П., Зворикін В.Б., Михальов О.І., Кузьменко М.Ю., Балакін В.Ф. **Моделювання багатозв'язних систем управління швидкісним режимом прокатки на безперервному дрібносортному стані** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (106). - Днепр, 2016. - С.36 - 44.

Розглянуто питання зниження різношірінності сортового прокату шляхом управління швидкісним режимом прокатки в чорновій групі клітей і оцінки якості цього управління зі зміни величини петлі прокату перед чистової групою клітей. Запропоновано оригінальний алгоритм управління. Застосування системи дозволяє знизити практично до нуля різношірінність готового прокату і стабілізувати роботу контурів петлерегулювання в чистовий групі клітей.

Результати роботи можуть використовуватися в існуючих системах управління швидкісним режимом прокатки, без зміни технічної частини, з доопрацюванням програмного забезпечення.

Бібл. 5.

УДК681.518:65.011.56

Стрелковская Л.А. **Управление судовым двигателем внутреннего сгорания с учетом его технического состояния на основе теории нечетких множеств** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (106). - Днепр, 2016. - С.45 - 53.

В работе представлена нечеткая модель определения текущего состояния судового двигателя внутреннего сгорания на основе установленных производителем критериев. Проектирование модели и определения оптимального режима ее работы производилось по алгоритму нечеткого логического вывода Мамдани в пакете FuzzyLogicToolbox вычислительной среды MATLAB. Использование аппарата нечеткой логики позволяет использовать обобщенный и формализованный опыт большого числа специалистов в области эксплуатации судовых дизельных энергетических установок, как при создании базы правил, так и для определения текущего технического состояния двигателя.

Библ.15, ил. 1, табл. 2.

УДК 624.04+519.6+624.07

Кучеренко О.Є. **Апроксимація моменту інерції та пошук оптимальної форми перерізу стержня** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (106). - Днепр, 2016. - С.54 - 60.

Розглядається проблема кусочно-лінійної апроксимації моментів інерції плоских перерізів в контексті оптимізації топології стрижневий системи. Також представлений алгоритм пошуку оптимальної форми перерізу. Моделювання виконувалося в середовищі Matlab.

Бібл. 11, іл. 4, табл. 1.

УДК 621.746

Танцура Т.О., Коробочка А.Н., Белоус Е.И. **Системные исследования напряжений в материале шлифовального круга** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (106). - Днепр, 2016. - С.61 - 67.

Рассмотрено распределение напряжений в материале шлифовального круга при действии на него нормальной и касательной сил. Установлено что, напряженное состояние шлифовального круга, вызванное совместным действием нормальных и касательных напряжений, может определяться сложением напряжений.

Библ. 5, илл. 2.

УДК 629.1

Швачка А.І., Бородулін А.В., Чернецький Є.В., Олійник О.Ю., Довгополий Я.А. **Застосування інформаційних технологій у теплоенергетичного моделі домни та підвищення її енергоефективності** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (106). - Днепр, 2016. - С.68 - 75.

Теплоенергетична модель доменної плавки на даному етапі розвитку є-ється багатозонним балансової-статистичним методом розрахунку, заснованому на комплексних енергетичних параметрах (теплова потужність, коефіцієнт використання палива, теплової дефіцит, втрати тепла в робочому просторі). У розвиток моделі запропоновані інформаційні методи. Пошук перспективних енергозберігаючих режимів пов'язаний з оцінкою компромісів по основним показників плавки. Додаткова інформація по витраті коксу може бути напів-чена в результаті обліку зовнішніх теплових втрат. Ефективність прийнятих рішень в базових режимах визначається стійкістю в системі подачі дуття з урахуванням принципу стабілізації.

Бібл. 9.

УДК 621.774.3:629.4

Узлов К.І., Мовчан О.В., Михайлова К.І. **Обґрунтування вибору раціонального профілю прокату та ефективного матеріалу для виготовлення об'язки вантажних вагонів** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (106). - Днепр, 2016. - С.76 - 84.

Запропоновані для виготовлення об'язки вантажного вагону із прямокутної труби ефективні – основна 09Г2 та альтернативні 09Г2С, 16Г2АФ марки сталі, які відрізняються вмістом легуючих компонентів, завдяки чому мають різну кінетику структуроутворення і, як наслідок, кінцеву структуру, яка дозволяє прогнозно забезпечувати широкі можливості варіювання класу міцності виробу – 295, 345 та 440, відповідно.

Бібл. 16.

УДК 004.93

Нечипоренко А.С. **Метод обробки часових рядів біомедичних даних для класифікації патологій** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (106). - Днепр, 2016. - С.85 - 93.

Стаття присвячена розробці методу обробки часових рядів біомедичних даних, що дозволяє здійснювати ідентифікацію патернів патології. Метод оснований на апроксимації фазових портретів часових рядів за допомогою F-перетворення. Пропонується рішення задачі класифікації на прикладі сигналів носового дихання.

Бібл. 18.

УДК 629.4

Скалозуб В.В., Панік Л.О. **Про побудову узагальнених моделей планування неоднорідних транспортних потоків** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (106). - Днепр, 2016. - С.94 - 101.

У статті побудовані і досліджені математичні моделі економічних принципів рівноваги для неоднорідних транспортних потоків. Моделі узагальнюють принципи Вардропа, і призначені для аналізу та планування неоднорідних потоків у транспортних мережах.

Бібл. 9, іл. 1.

УДК 622.7: 658.562

Тимошенко М.А. **Анализ современных методов автоматизированного управления процессами обогащения железной руды** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (106). - Днепр, 2016. - С.102 - 113.

Рассмотрено современные методы контроля и управления процессами обогащения железной руды и проведено их критический анализ. Обосновано использование средств мультиагентного управления в комплексе с интеллектуальными средствами управления, в особенности аппарата нечеткой логики. Сформулированы направления дальнейших исследований. Они предполагают более глубокое исследование связи между механизмами разных стадий обогащения железной руды и разработку соответствующей автоматизированной системы управления.

Библ. 14, илл. 1, табл. 0.

УДК 629.12.066(076)

Симаненков А. Л. **Анализ использования ПИДД²Д³-регуляторов в судовых энергетических установках** / А. Л. Симаненков, С. А. Рожков // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (106). - Днепр, 2016. - С.114 - 123.

Представлен анализ эффективности применения систем автоматического регулирования (САР) с многопараметрическим регулятором и с регулятором и компенсатором в судовой энергетической установке (СЭУ). Установлено, что САР с многопараметрическим регулятором имеет в несколько раз, лучшие показатели регулирования по сравнению с системой регулирования, которая включает регулятор и компенсатор.

Библ. 10, ил. 3

УДК 669.187-194.52:001.73

Бубликов Ю.О., Поляков Г.А., Підгорний С.М., Селегей С.М., Селегей А.М. **Аналіз технологічних особливостей і способів легування сталі азоту** // Системные технологии.

Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (106). - Днепр, 2016. - С.124 - 138.

Проаналізовано існуючі методи легування азотом залізовуглецевих розплавів в промислових умовах. Вивчено механізми асиміляції азоту металевим розплавом в залежності від виду застосовуваного азотоносія і технологічних факторів. Наведено принциповий підхід у складанні залежностей дозволяють визначити розчинність азоту в металевому розплаві на підставі термодинамічних величин і концентрації легуючих елементів.

Бібл. 31.

УДК 519.816

Барсук Р.В., Рядно О.А. **Побудова функції вибору переважних рішень для пальника на пелетах** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (106). - Днепр, 2016. - С.139 - 147.

Об'єкт моделювання – пальник на паливних гранулах (пелетах) для теплопостачання. Експериментально досліджено вплив п'ятифізичних параметрів на три вихідні параметри роботи пальників. Експериментальні результати сопоставлені один з одним, за допомогою експертних оцінок отримана повна матриця бінарного відношення вибору. Побудована математична модель функції вибору. У якості аргументів – значення фізичних параметрів сопоставляємих пар рішень, у якості функцій – значення 1 або 0 у залежності від того, яка пара фізичних параметрів переважніша.

Бібл. 14, іл. 1, табл. 3.

УДК 621.744.52

Селівьорстова Т.В., Селівьорстов В.Ю. **Комп'ютерне моделювання затвердіння блоку циліндричних заготовок з сталі Р18Л в оболонкової формі** // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 5 (106). - Днепр, 2016. - С.148 - 156.

Представлені результати комп'ютерного моделювання герметизації блоку виливків циліндричної форми із сталі Р18Л, одержуваних за діючою технологією у формах лиття по витоплюваним моделям. Показана можливість використання газодинамічного впливу на твердіючий метал за умови зміни конструкції блоку.

Бібл. 9.

UDK 004.738.52

Volkovsky O.S., Kovylin E.R. **Analysis of the modern approaches to the task of automatic text generation in the natural language** // System technologies. N 5(106) - Dnipro, 2016.- P.3 - 11.

The modern implementation of the system of the automatic text generation text and fundamental approaches to the process of automatic text processing has been considered. Based on the analysis, the most suitable technology for building the systems of synthesis of a meaningful text has been chosen.

Lib. 7, table 1.

UDC 57-77

Selin Y.M. **Problems forecasting negative processes of different nature** // System technologies. N 5(106) - Dnipro, 2016.- P.12 - 19.

The article discusses the analysis of indicators of "quality of life" as the main criterion of social and economic development of society and the factors affecting its formation. Analyzes economic and environmental components that could adversely affect the quality of life. The conclusion on the need for developing mathematical tools for simultaneous economic and environmental forecasting processes to prevent the deterioration of life

Bibl. 8, il. 1.

UDK: 004.023

Danilov V.Ya., Slesar A.V., Gusev A.A. **Wavelet analysis for elliott waves** // System technologies. N 5(106) - Dnipro, 2016.- P.20 - 26.

Properly designed algorithms to analyze the series of currency, detection of Elliott Waves and further prediction of the behavior of financial markets, which makes the predictions of economy possible. This leads to better quality of developed models and estimates of forecasts.

The main purpose of this research is to develop an indicator based on wavelet transform, which will highlight and analyze the Elliott wave.

To solve the tasks, the following techniques are used: MACD indicator and Hurst exponent and analysis gaps sustainable trend for waves Elliott; discrete wavelet transform filtering and smoothing wave; continuous wavelet transform to highlight the Elliott Wave for some time.

Bibl. 10, il. 11.

UDC 622.788

Khudyakov A. Yu., Boyko M.M., Petrenko V.I., Polyakova N.V., Vashchenko S.V., Baiul C.V. **Development of recommendations for improving the efficiency of pelletizing the agglomeration charge mixtures** // System technologies. N 5(106) - Dnipro, 2016.- P.27 - 35.

The results of investigation of cumulative impact of the equivalent diameter and the charge granules size variation coefficient on the layer's fractional void volume are presented in the article. A new structural parameter, which can be used in estimating the effectiveness of the pelletizing process, is proposed. Recommendations for improving the efficiency of pelletizing of the agglomeration charge mixtures are developed.

Bibl. 10, pics. 2, tab. 1.

UDC 621.771.685.5

Zvorykin V.B., Egorov A.P., Mikhalyov A.I., Kuzmenko M.U., Balakin V.F. **Modeling multiply connected control system of high-speed rolling mode to continuous light-section mill** // System technologies. N 5(106) - Dnipro, 2016.- P.36 - 44.

The problems of reducing of various widths metal rolling by controlling the speed mode of rolling in the roughing mill. Determination of the quality of this control to change the value of rolling loop before finishing mill. The original control algorithm is propose. Application of the system reduces to almost zero various widths finished steel and stabilize the rolling loop contours finishing mill.

The results can be used in existing high-speed rolling schedule control systems, without changing the technical part with rework software.

Bibl. 5.

UDK 681.518:65.011.56

Strelkovskaya L.A. **Ship management internal combustion engines with regard to its technical state based theory of fuzzy sets** // System technologies. N 5(106) - Dnipro, 2016.- P.45 - 53.

The paper presents a fuzzy model of determining the current status of marine internal combustion engine on the basis of criteria established by the manufacturer. Design model and determine the optimal mode of work was carried out by the algorithm of fuzzy inference Mamdani package Fuzzy Logic Toolbox computing environment MATLAB. Using fuzzy logic allows the use of a generalized and formalized experience of a large number of experts in the field of ship diesel power plants, both in the creation of the rule base and to determine the current condition of the engine.

Ref. 15, fig.1, tab. 2.

UDC 624.04+519.6+624.07

Kucherenko A. E. **Area Moment of Inertia Approximation and Optimal Section Shape** // System technologies. N 5(106) - Dnipro, 2016.- P.54 - 60.

The problem of area moment of inertia approximation in the context of truss topology optimization is regarded. The algorithm of finding of cross-section optimal geometry is presented. Modelling has been performed in Matlab.

Bibl. 11, il. 4, tab. 1.

UDK 621.746

Tantsura T.O., Korobochka O.N., Bilous O.I. **System studies tension in material of grinding circle** // System technologies. N 5(106) - Dnipro, 2016.- P.61 - 67.

Distribution of tensions is considered in material of grinding circle at operating on it of normal and touched force. It is set that the tense state of grinding circle is caused by a compatible action normally and tangent loading it can be determined by the assembling of tensions.

Bibl. 5, il.2

UDK 629.1

Shvachka A.I., Borodulin A.V., Chernetsky E.V., Oleinik O.Yu., Dovgopoly Ya.A. **Impression of information technologies in the heat-power engineering model of domna and improvement of its energy efficiency** // System technologies. N 5(106) - Dnipro, 2016.- P.68 - 75.

Heat Energy model blast furnace at this stage of development is etsya multiband balance-statistical method of calculation, based on a comprehensive energy parameters (heat capacity, coefficient is-use fuels, heat deficit, the loss of heat in the working space). The development model proposed information practices. Search Advanced power saving modes associated with the assessment of trade-offs by major long-melting exponent. Additional information about the consumption of coke may be semi-Chen by accounting for external heat losses. Effective decision-making in re-determined by the stability of basic modes in the system supplying the blast, taking into account the principle of stabilization.

Bibl. 9.

UDC 621.774.3:629.4

Uzlov K.I., Movchan A.V., Mykhailova K.I. **Fundamentals of rolling rational profile choosing and effective material implementation for the bindings of freight car manufacturing** // System technologies. N 5(106) - Dnipro, 2016.- P.76 - 84.

There were proposed for the manufacturing of freight car bindings using rectangular pipe effective – the basic 09G2 and alternative 09G2S, 16G2AF steel grades which, due to difference in content of alloying components, have different kinetics of structure formation and, as a consequence, the final structure, which allows for forecasting provide wide possibilities of class strength product variation – 295, 345 and 440, respectively.

Bibl. 16.

UDC 004.93

Nechyporenko A.S. **Method of biomedical time series processing for pathology classification** // System technologies. N 5(106) - Dnipro, 2016.- P.85 - 93.

The article is devoted to developing a method of processing biomedical time series that allows identification of disease patterns. The method is based on approximation of phase portraits of time series by F-transform. Proposed solution of classification problem is realized using signals of nasal breathing.

Fig. 5, table. 1.Ref.:18 items.

UDK 656.211.3:656.211.5

Skalozub V.V., Panik L.A. **The construction of generalized models for planning heterogeneous transport flows** // System technologies. N 5(106) - Dnipro, 2016.- P.94 - 101.

Mathematical models of economic equilibrium principles for planning non-uniform flows are constructed and investigated. Models generalize Wardrop's principles, and are designed for the analysis and planning of inhomogeneous traffic in the transport networks.

Bibl. 9, silt. 1.

UDC 622.7: 658.562

Tymoshenko M.A. **Analysis of modern methods of automated control of iron ore enrichment process** // System technologies. N 5(106) - Dnipro, 2016.- P.102 - 113.

The modern methods of control and regulation of iron ore enrichment processes are considered their critical analysis is carried out. Using tools of multi-agent control in combination with intelligent control means, in particular the apparatus of fuzzy logic is substantiated. Directions for further research are formulated. They suggest a deeper study of relationships between the mechanisms of different stages of iron ore enrichment and the development of appropriate automated control system.

Byblos 14, fig. 1 table 0.

UDC 629.12.066(076)

Simanenkov A. L. **PIDD²D³-controllers usage synthesis in ship power plant** / A. L. Simanenkov, S. O. Rozhkov // System technologies. N 5(106) - Dnipro, 2016.- P.114 - 123.

The analysis of the effectiveness of automatic control systems (ACS) with multi-parametric regulator and regulator and compensator of ship power plant (SPP) presented. Established, that the ACS with multi-parametric regulator has, several times best regulating indicators comparing with the control system, which includes the controller and compensator.

Bibl. 10, ill. 3.

UDC 669.187–194.52:001.73

Bublikov Y.A., Polyakov G.A., Podgorniy S.N., Selegej S.M., Selegej A.M. **Analysis of technological features and is capable of alloying of steel nitrogen** // System technologies. N 5(106) - Dnipro, 2016.- P.124 - 138.

The existing methods of nitrogen doping of iron-carbon melts in industrial conditions are analyzed. The mechanisms of nitrogen assimilation by a metallic melt are studied depending on the type of nitrogen carrier used and technological factors. A principled approach to the derivation of the dependences allowing one to determine the solubility of nitrogen in a metallic melt on the basis of thermodynamic quantities and the concentration of alloying elements is given.

Bibl. 31.

UDK 519.816

Barsuk R.V., Ryadno O.A. **Preferred solutions choice function building for pellets burner** // System technologies. N 5(106) - Dnipro, 2016.- P.139 - 147.

Object modeling - the burner with fuel granules (pellets) for heating. It was investigated the effect of the five physical parameters on the three output parameters of the burners. The experimental results are compared with each other, and with the help of expert estimates it was constructed the complete matrix of the binary choice relation. It was constructed the mathematical model of the choice function. As arguments - the values of physical parameters of the compared pairs solutions, as functions - the value 1 or 0 depending on whether a pair of physical parameters is preferable.

Bibl. 14, il. 1, table. 3

UDK 621.744.52

Seliverstova T.V., Seliverstov V.Yu. **Computer modeling of a block of cylindrical billets of steel R18L of solidification in shell form** // System technologies. N 5(106) - Dnipro, 2016.- P.148 - 156.

The results of computer design of pressurizing of block of casts of cylindricity from steel of P18Л are represented, got on operating technology in the forms of casting on the smelted models. Possibility of the use of gaz-dynamyc influence is rotined on a solidifiable metal on condition of change of construction of block.

Bibl. 9.

АВТОРЫ ВЫПУСКА

Волковський Олег Степанович - доцент кафедри АСОІ факультету фізики, електроніки та комп'ютерних систем. Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара.

Ковилін Єгор Романович - аспірант спеціальності «Інформаційні технології», кафедра АСОІ факультету фізики, електроніки та комп'ютерних систем. Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара.

Селін Юрій Миколайович - к.т.н., с.н.с., Науково-навчальний комплекс «Інститут прикладного системного аналізу».

Данилов Валерій Яковлевич – д.т.н, професор кафедри Математичних Методів Системного Аналізу ННК ІПСАНТУУ «КПІ», м. Київ.

Слюсар Андрій Вячеславович – студент Інституту прикладного системного аналізу НТУУ «КПІ», м. Київ.

Гусев Олександр Андрійович – студент Інституту прикладного системного аналізу НТУУ «КПІ», м. Київ.

Худяков О.Ю. – Національна металургійна академія України.

Бойко М.М. – Національна металургійна академія України.

Петренко В.І. – Національна металургійна академія України.

Полякова Н.В. – Національна металургійна академія України.

Ващенко С.В. – Національна металургійна академія України.

Баюл К.В. – Національна металургійна академія України.

Егоров А.П. – Національна металургійна академія України.

Зворыкин В.Б. – Національна металургійна академія України.

Михалев Александр Ильич – д.т.н., професор Национальная металлургическая академия Украины.

Кузьменко М.Ю. – Національна металургійна академія України.

Балакин Владимир Федорович – д.т.н., професор Национальная металлургическая академия Украины.

Стрелковская Лилия Александровна - аспірант, Херсонская государственная морская академия.

Кучеренко Александр Евгеньевич - Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, г. Днепр, Украина.

Танцура Тимофій Олегови - студент, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське.

Коробочка Олександр Миколайович - професор кафедри автомобілів і автомобільного господарства, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське.

Білоус Олена Іванівна - доцент кафедри машинобудування, Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське.

Швачка Александр Иванович – к.т.н., доц. каф. КИТиМ «УГХТУ», г. Днепр.

Бордулин Александр Васильевич - д.т.н., с.н.с., ИЧМ НАН Украины, г. Днепр.

Чернецкий Евгений Вячеславович – к.т.н., доц. каф. КИТиМ «УГХТУ», г. Днепр.

Олейник Ольга Юрьевна – к.т.н., доц. каф. КИТиМ «УГХТУ», г. Днепр.

Довгопольний Ярослав Александрович – аспірант каф. КИТиМ «УГХТУ», г. Днепр.

Нечипоренко Аліна Сергіївна - к.т.н., доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, ХНУРЕ, доцент кафедри Біомедичної інженерії, м. Харків.

Узлов Костянтин Іванович - доктор технічних наук, професор, професор кафедри матеріалознавства Національної металургійної академії України.

Мовчан Олександр Володимирович - кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Національної металургійної академії України.

Михайлова Катерина Ігорівна - студентка групи МВ - 01 - 11 спеціальності 132 - матеріалознавство Національної металургійної академії України.

Скалозуб Владислав Васильевич - доктор технических наук, профессор, декан факультета «Техническая кибернетика» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. ак. В. Лазаряна.

Паник Леонид Александрович - ст. преп. кафедры КИТ Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. ак. В. Лазаряна.

Тимошенко Максим Анатолійович - аспірант кафедри інформатики, автоматизації та систем управління, Криворізький національний університет.

Сіманенков Андрій Леонідович – магістр, Херсонська державна морська академія, аспірант кафедри Експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматизації, м. Херсон

Рожков Сергій Олександрович – доктор технічних наук, професор, Херсонська державна морська академія, завідувач кафедри Експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматизації, м. Херсон.

Бубликов Юрій Олександрович - доцент, кандидат технічних наук, кафедра електрометалургії, Національна металургійна академія України.

Поляков Георгій Анатолійович - старший викладач, кафедра електрометалургії, Національна металургійна академія України.

Підгорний Сергій Миколайович – асистент, кафедра електрометалургії, Національна металургійна академія України.

Селегей Світлана Миколаївна – асистент, кафедра машин та агрегатів металургійного виробництва, Національна металургійна академія України.

Селегей Андрій Миколайович - доцент, кандидат технічних наук, кафедра теоретичної механіки та опору матеріалів, Національна металургійна академія України.

Рядно Олександр Андрійович - д.т.н., проф. каф. прикладної математики та інформатики Університету Митної Справи та фінансів, м.Дніпро.

Барсук Роман Володимирович - асистент каф. системного аналізу та моделювання у теплогазопостачанні Придніпровської Державної Академії Будівництва та Архітектури.

Селиверстов В.Ю. - д-р техн. наук, профессор, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр.

Селиверстова Т.В. - канд. техн.наук, доцент, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр.