

УДК 004.9
ББК 30

МЕТОД ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОТРАСЛИ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ

Баранов А. А.¹, Файзрахманов Р. А.²

(Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь)

В статье предложен прогностический метод оценки поведения комплекса параметров, содержащий комплекс математических моделей, также исследованы изменения показателей мировых производств стали и проведен анализ влияния технологического процесса термической обработки стали на эффективность отрасли.

Ключевые слова: прогностический метод оценки, показатели производства, термическая обработка.

1. Введение

Металлургия, несомненно, играет ключевую роль в развитии мировой экономики. Как известно [17], такие черные металлы, как сталь и чугун, в связи с большими масштабами и универсальностью их применения занимают особое место в структуре материальных затрат. Несмотря на расширение производства пластмасс, черные металлы остаются основным конструктивным материалом. В связи с этим актуальным является вопрос статистических и прогностических исследований показа-

¹ Антон Александрович Баранов, аспирант (baranov_anton@inbox.ru, 8(950)45-44-715).

² Рустам Абубакирович Файзрахманов, доктор экономических наук, профессор (fayzrahmanov@gmail.com, 8(912)88-100-86).

телей данной отрасли ведущих стран производителей, а также выявление основных факторов развития и повышения эффективности производства стали в российских условиях.

Мировая металлургия является результатом сложного взаимодействия и специфических особенностей развития металлургии в отдельных странах. Анализ развития мировой металлургии позволяет выделить основные тенденции и факторы, определяющие процессы развития металлургии в отдельных группах стран. В странах, находящихся на ранних стадиях индустриального развития, спрос на металлопродукцию растет более высокими темпами, что приводит к объективному сокращению доли индустриально развитых государств в мировом производстве металла. Страны, осуществляющие создание собственной металлургии, используют новейшие технологии, и это предполагает более высокий технический уровень производства и конкурентоспособности продукции по сравнению с металлургией развитых стран. Уступая позиции в мире по удельной доле производства металла, индустриально развитые страны стремятся сохранить абсолютный уровень производства металла, поддержать конкурентоспособность собственной металлургии [3, 15].

С целью получения возможности своевременно реагировать на изменения основных показателей, таких как объем производства, объем экспорта/импорта, цена и др., проводятся исследования с использованием математических моделей прогноза, при которых значения этих показателей вычисляются на несколько лет вперед.

Безусловно, основные показатели отрасли металлургии, рассмотренные на примере стали, напрямую зависят от составляющих технологических процессов производства: ресурсов, оборудования, специалистов, технологических режимов, уровня автоматизации и т.д. Одним из важнейших этапов производства изделий является термическая обработка, при проведении которой специалисты получают необходимые механические и физические свойства.

Рассмотрев мировую практику по прогнозам и оценкам подобных показателей различных отраслей, можно выделить следующие тенденции. При построении многофакторных моделей часто оценивается влияние как внешних условий, так и внутренних (внутри страны). Делается множество предположений о влиянии того или иного фактора. Выделяют краткосрочные, среднесрочные и долгосрочные прогнозы. Часто используется интервал возможных значений, подчеркивая критические значения. В качестве математического аппарата и инструмента исследования могут быть выбраны уже существующие средства или разработаны собственные модели, которые реализуются в таких программах для научно и проектной работы, как *MatLab* и др.

Для проведения нашего исследования была выбрана технология распределенной обработки данных – облачные вычисления, суть которых в предоставлении пользователям удаленного динамического доступа к программному обеспечению как к услуге (*SaaS, Software-as-a-Service*). Доступ осуществляется посредством браузера к интернет-порталу *ForecasterOnline.com* – это свободный ресурс, позволяющий проводить прогноз на основе уже встроенных математических моделей (модель развертывания – публичное облако).

Следующие страны – лидеры по производству стали на 2011 год [5], их общий объем производства составляет около 4/3 от мирового: Китай, Япония, Индия, Южная Корея, Россия, США, Германия (рис. 1).

На основе статистических данных отчета Мирового института стали с 2000 по 2011 годы было выполнено прогнозирование динамики изменений показателей на четыре последующих года, в качестве которых выбраны: объем производства стали, объем экспорта/импорта стали и мировые цены на сталь. Для последнего показателя в связи с отсутствием данных был взят другой временной период. Сервис, основанный на облачных технологиях, предлагает несколько видов математических моделей, из которых были выбраны: модель взвешенного скользяще-

го среднего, модель двойного экспоненциального сглаживания и полиномиальной регрессии.

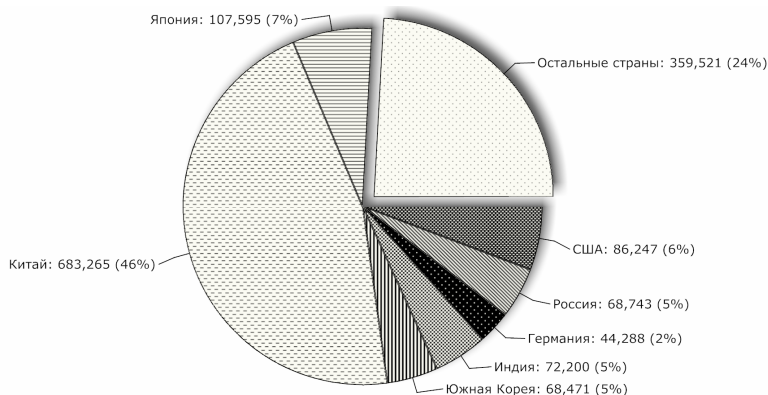


Рис. 1. Страны – лидеры по объему производства стали, Мт

2. Построение прогностического метода оценки поведения комплекса параметров

Предложенный метод включает комплекс моделей: модель взвешенного скользящего среднего (*Weighted Moving Average*), модель двойного экспоненциального сглаживания (*Double Exponential Smoothing*), модель полиномиальной регрессии (*Polynomial Regression*).

В первой модели при вычислении скользящего среднего значениям исходного ряда приписываются веса. Чем больше вес данного значения, тем больше его вклад в среднее значение. Взвешенное скользящее среднее определяется формулой:

$$(1) S_t = \frac{w_{-k}x_{t-k} + w_{-k+1}x_{t-k+1} + \dots + w_{k-1}x_{t+k-1} + w_kx_{t+k}}{w_1 + w_2 + \dots + w_k}$$

или

$$(2) \quad S_t = \frac{\sum_{i=-m}^m w_i x_{t+i}}{\sum_{i=-m}^m w_i}, \quad k = 2m + 1; t = m + 1, \dots, n - m.$$

Веса w_i могут быть заданы, а могут быть определены в результате решения системы нормальных уравнений.

Модель скользящего среднего обычно используется с данными временных рядов для сглаживания краткосрочных колебаний и выделения основных тенденций или циклов. При использовании взвешенного скользящего среднего некоторые значения исходной функции целесообразно сделать более значимыми, например, если внутри интервала сглаживания имеет место нелинейная тенденция или более актуальные данные весомее предыдущих. [1]

Модели экспоненциального сглаживания относятся к классу адаптивных методов прогнозирования, основной характеристикой которых является способность непрерывно учитывать эволюцию динамических характеристик изучаемых процессов, подстраиваться под эту динамику, придавая, в частности, тем больший вес и тем более высокую информационную ценность имеющимся наблюдениям, чем ближе они расположены к текущему моменту (для сглаживания будет применяться модель Хольта [9]).

Сущность метода заключается в том, что значения сглаживаются с помощью взвешенного скользящего среднего, в котором веса подчиняются экспоненциальному закону. Взвешенное скользящее среднее с экспоненциально распределенными весами характеризует значения процесса на конце интервала сглаживания, т.е. является средней характеристикой последних уровней ряда. Именно это свойство используется для прогнозирования [10].

Модель двойного экспоненциального сглаживания в общем виде может быть записана при помощи двух рекуррентных соотношений следующим образом:

$$(3) \quad S_t = \alpha y_t + (1 - \alpha) \cdot (S_{t-1} + b_{t-1}),$$

$$(4) \quad b_t = \gamma(S_t - S_{t-1}) + (1 - \gamma) \cdot b_{t-1}.$$

Первое соотношение сглаживает общий уровень ряда, второе – трендовую составляющую. Коэффициент сглаживания данных α и коэффициент сглаживания тренда γ принимают значения из диапазона $[0, 1)$.

Методика сглаживания такова, что вначале выбираются начальные значения уровня и тренда, а затем делается проход по всему ряду значений и на каждом шаге вычисляются новые значения по формулам [10, 14, 16].

Модель полиномиальной регрессии является одной из форм линейной регрессии, в которой взаимосвязь между независимой переменной x и зависимой переменной y представлена в виде полинома степени n . Полиномиальная регрессия соответствует нелинейному отношению между значениями x и условным математическим ожиданием y , которое обозначается $E(y|x)$. Модель полиномиальной регрессии общем виде может быть записана следующим образом:

$$(5) \quad y_i = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + \dots + a_m x_i^m + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Данная модель может быть выражена в матричной форме, через матрицу X , вектор измерений \vec{y} , вектор параметров \vec{a} и вектор случайных ошибок $\vec{\varepsilon}$. Строка i матрицы X и вектора \vec{y} содержит значения x и y для i – значения данных. Такая модель может быть записана как система:

$$(6) \quad \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \dots & x_1^m \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \dots & x_2^m \\ 1 & x_3 & x_3^2 & \dots & x_3^m \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \dots & x_n^m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}.$$

Или в матричном представлении:

$$(7) \quad \vec{y} = X \cdot \vec{a} + \varepsilon.$$

Модель полиномиальной регрессии относится к моделям, нелинейным по переменным, так как мы составляем линейное уравнение из некоторых преобразований независимых перемен-

ных [7, 18]. Существует несколько методов оценки качества модели данного вида, из которых нами был выбран коэффициент детерминации. Он рассчитывается по формуле

$$(8) \quad R^2 = 1 - \frac{\sum e_i^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}, \quad \text{где } e_i = y_i - \hat{y}_i.$$

Предложенный прогностический метод поведения комплекса параметров основан на применении всех трех моделей для оценки необходимого показателя. Использование метода предполагается с учетом и без учета составляющей производственного процесса, в данном случае рассматривается термическая обработка. Погрешность влияния составляющей вычисляется при применении математических моделей. Далее рассмотрим использование комплекса моделей для каждого из выбранных нами показателей производства.

3. Исследование изменения показателей мировых производств стали

3.1. ОБЪЕМ ПРОИЗВОДСТВА СТАЛИ

На рис. 2 представлены данные, полученные с помощью прогнозирования на основе модели полиномиальной регрессии [11]. На основе известных значений показателя объема производства для каждой страны был получен полином третьей степени, с использованием которого производилось моделирование. Ниже показаны полиномы, полученные для России (8) и Китая (9):

$$(8) \quad y = -2,00E_{11} + 2,99E_8 - 1,49E_5 + 2,47E_1,$$

$$(9) \quad y = 2,12E_{12} - 3,16E_9 + 1,58E_6 - 2,62E_2.$$

Для оценки качества уравнения использовался коэффициент детерминации, который для полинома третьей степени равен 0,54, – это выше, чем у других полиномов.

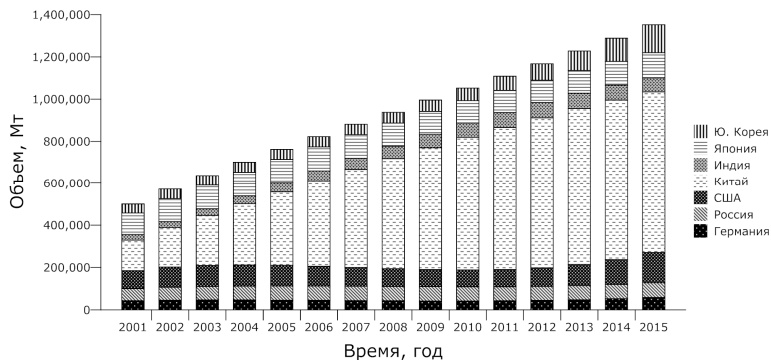


Рис. 2. Результаты прогноза с использованием модели полиномиальной регрессии

Прогнозирование с помощью данной модели полностью отражает указанные тенденции и факторы развития металлургии в определенных группах стран, в индустриально развитых наблюдается снижение объемов производства (США) или замедление роста (Китай).

Для всех моделей в качестве дескриптивной статистики используются следующие характеристики: математическое ожидание $M[X]$, дисперсия $D[X]$, медиана m . Их значения для каждой страны с использованием данной модели представлены в таблице 1.

Таблица 1. Дескриптивная статистика

Страна \ Характеристика	$M[X]$	$D[X]$	m
Германия	46077	2074	45190
Россия	66005	2865	66900
США	95354	8243	93350
Китай	497367	167872	524400
Индия	54249	14195	59140
Япония	110080	3733	109900
Южная Корея	64707	13048	50660

3.3. ОБЪЕМ ЭКСПОРТА И ИМПОРТА СТАЛИ

Такие показатели, как объем экспорта и импорта стали, зависят от производства, потребностей и возможностей обработки стали в каждой стране. Моделирование проводилось с помощью тех же математических моделей, а результат, полученный при помощи модели взвешенного скользящего среднего, представлен на рис. 3 в виде показателя «чистый экспорт», который отражает отношение между двумя показателями.

Чистый экспорт (NX) – разница между объемом экспорта и импорта. Соотношение экспорта и импорта показывает состояние торгового баланса. Если экспорт превышает импорт, то в стране профицит торгового баланса, если импорт превышает экспорт, то имеет место дефицит торгового баланса. [6]

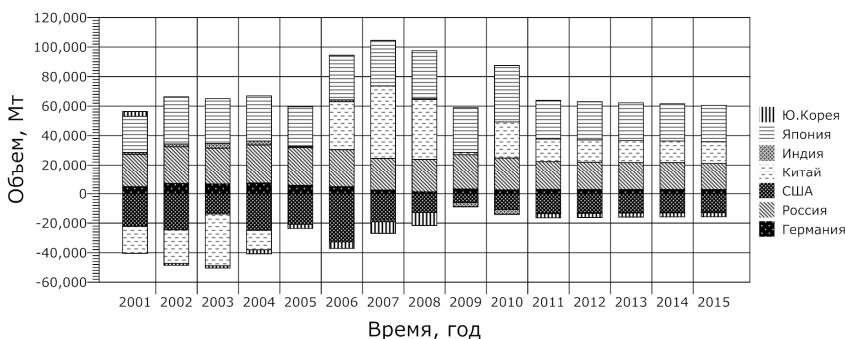


Рис. 3. Результаты прогноза с использованием модели взвешенного скользящего среднего

Статистика прогнозирования, проведенного с помощью модели взвешенного скользящего среднего, представлена в таблице 2.

Таблица 2. Дескриптивная статистика

Страна \ Характеристика	$M[X]$	$D[X]$	t
Германия	4726	1830	4841
Россия	22808	2822	24315

Страна \ Характеристика	$M[X]$	$D[X]$	t
США	-18698	6760	-20530
Китай	-635	22943	11402
Индия	860	1729	1003
Япония	28166	3693	29372
Южная Корея	-2084	2827	-2717

3.3. МИРОВЫЕ ЦЕНЫ НА СТАЛЬ

Данные по мировым ценам на сталь были взяты из архива информации Лондонской биржи металлов в период с июля 2008 года до июля 2012 года [4], прогноз выполнен до начала 2014 года с использованием математических моделей взвешенного скользящего среднего и двойного экспоненциального сглаживания; известные результаты представлены в таблице 3, прогнозируемые – на рис. 4.

Таблица 3. Архивные данные мировых цен на сталь

Дата	Цена	Дата	Цена
20.07.08	1035	20.10.10	475
20.10.08	280	20.01.11	540
20.01.09	325	20.04.11	520
20.04.09	315	20.07.11	590
20.07.09	351	20.10.11	530
20.10.09	339	20.01.12	509
20.01.10	420	20.04.12	476
20.04.10	530	20.07.12	370
20.07.10	400		

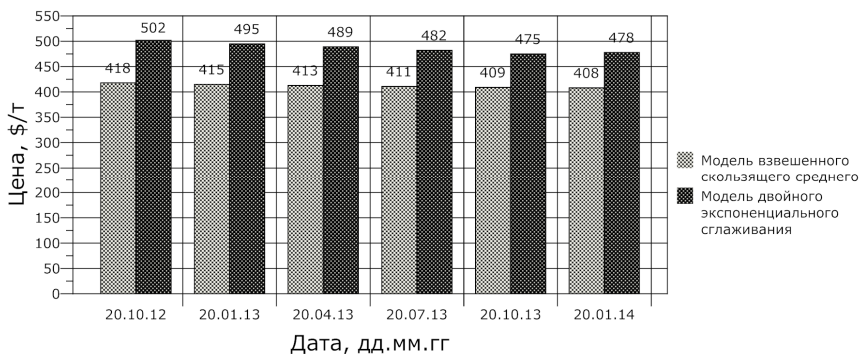


Рис. 4. Результаты прогноза цен с использованием двух моделей

Результаты прогнозирования с помощью модели полиномиальной регрессии не представлены, так как они имеют очень большую погрешность и неадекватно отражают возможные цены на сталь (настроить модель не представляется возможным, поскольку коэффициенты подбираются автоматически).

Дескриптивная статистика и значения коэффициента сглаживания данных α и сглаживания тренда γ представлены в таблице 4.

Таблица 4. Характеристики использованных моделей

Модель \ Статистика, коэффициенты	Дескриптивная статистика			Коэффициенты	
	$M[X]$	$D[X]$	m	α	γ
Взвешенное скользящее среднее	444	133	415	–	–
Двойное экспоненциальное сглаживание	312	352	475	0,4	0,3

О справедливости прогноза можно судить исходя из данных Лондонской биржи металлов за последний месяц (за август 2012 года), которые показывают четкую тенденцию к снижению цен на сталь, при этом темпы несколько выше, чем прогнозиру-

ет модель взвешенного скользящего среднего, и ниже, чем прогнозирует модель двойного экспоненциального сглаживания.

5. Анализ влияния процесса термической обработки стали на эффективность отрасли

Так как в исследовании были рассмотрены значения показателей по отношению к термически необработанной стали (*crude steel*, нерафинированная сталь), то они накладывают определенные ограничения на проведение термической и механической обработки (рис. 5).



Рис. 5. Схема производства изделия

По временным затратам термическая обработка занимает от нескольких минут (индукционный нагрев) до нескольких десятков часов, в зависимости от поставленных задач, мощностей оборудования и параметров изделия или заготовки. Таким образом, термическая обработка может занимать значительное время и требовать существенных денежных затрат в общем цикле производства изделия.

Страны – лидеры по производству стали, такие как Китай, Япония, США, очевидно, имеют явное преимущество перед другими по всем составляющим технологического процесса производства изделий из стали, в том числе и в технологии термической обработки. Страны, не входящие в первую пятерку, как показало проведенное исследование, даже в ближайшей перспективе не способны существенно сократить свое отставание.

На такой показатель, как мировые цены на сталь, сильно влияет объем производства, который остается стабильным или

немного снижается у лидеров и хоть и небольшими темпами, но растет у развивающихся стран, а также спрос на сталелитейную продукцию, который по данным последних аналитических статей [12, 13] в странах Европы уменьшается, а в странах АСЕАН сохраняет свои темпы роста на уровне 4–5%. Изменения мировых цен и объема производства стали в России с 2008 по 2012 год, представлены на рис. 6.

Цены на термически необработанную сталь сильно влияют на предприятия, непосредственно не занимающиеся производством стали, в первую очередь это металлообрабатывающие и машиностроительные предприятия. При изменении цен на входные ресурсы существует несколько случаев в стратегии действий данных предприятий: повышение цен на изделия с сохранением объемов их выпуска; снижение качества изделий с сохранением цен и объемов на прежнем уровне; снижение объемов выпуска с сохранением цен и качества изделия на соответствующем уровне.

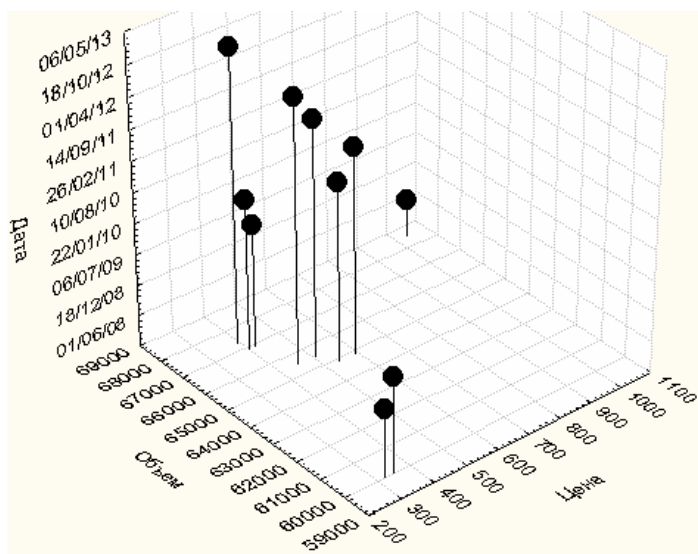


Рис. 6. Изменение основных производственных показателей в России

Для оценки уровня влияния технологического процесса термической обработки на основные показатели производства стали введем обобщенный коэффициент (10), который отражает стоимость всей стали (млн. \$), обрабатываемой и используемой для производства изделий на предприятиях внутри страны.

$$(10) K = f(V_c, P_w, NX_c, t_o, p_o) = (t_o \cdot (V_c - NX_c)) \cdot (P_w + p_o),$$

где V_c – объем производства стали в определенной стране, Мт; NX_c – объем чистого экспорта стали для определенной страны, Мт; P_w – средняя в расчетный год мировая цена за 1 тонну стали, \$; t_o – объем стали, подвергаемый термообработке, %; p_o – стоимость термообработки, \$.

Рассчитывая значения данного коэффициента для стран – лидеров по производству стали без термической обработки (не учитываем параметры t_o и p_o) в 2010 году, получили результаты, представленные на рис. 7.

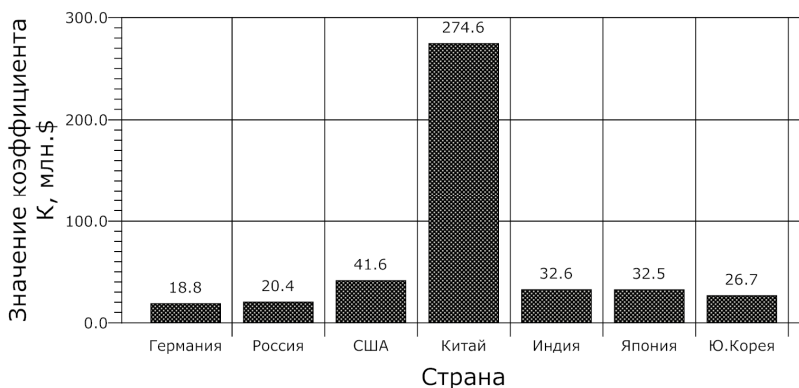


Рис. 7. Значения коэффициента K за 2010 год

Далее рассчитаем значения коэффициента K только для России (рис. 8) с учетом стоимости термической обработки и объемов стали, которые обрабатываются, от общего произведенного объема (от 10 до 90%).

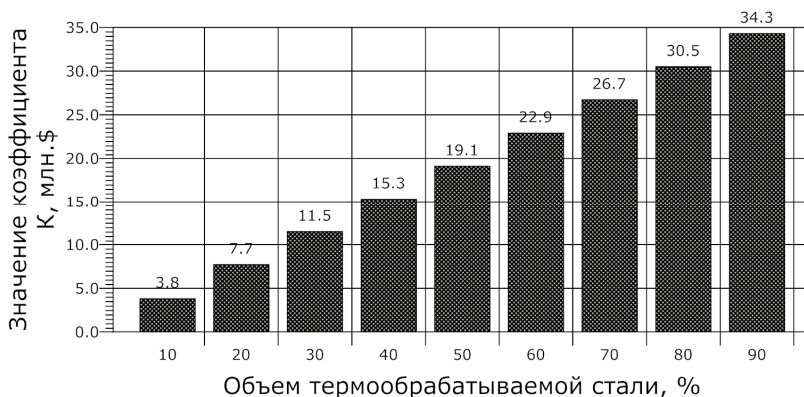


Рис. 8. Значения коэффициента K для России с учетом технологического процесса термической обработки

Из последней диаграммы видно, что при термообработке чуть более 50% всей стали коэффициент K становится равным стоимости всей стали в случае, если ее не обрабатывать, что еще раз подтверждает важность проведения исследований по улучшению данного технологического процесса и экономически их обосновывает.

6. Заключение

В подведении итогов проведенного исследования оценим погрешность предложенного метода на основании погрешностей прогнозирования каждой из использованных математических моделей.

Для всех значений показателей при помощи сервиса прогнозирования были рассчитаны следующие погрешности: медианное абсолютное отклонение MAD , средняя относительная ошибка прогноза $MAPE$, среднеквадратичная ошибка MSE . Значения данных погрешностей для различных моделей и показателей представлены в таблицах 5–6.

Таблица 5. Погрешности модели полиномиальной регрессии/взвешенного скользящего среднего при расчете объема производства стали/объема экспорта-импорта стали

Страна \ Погрешность	MAD , Мт	$MAPE$, %	MSE , Мт
Германия	2556/1388	6/64	3541/1884
Россия	2270/1100	3/5	3026/1579
США	6110/6596	8/55	8325/8174
Китай	10512/20393	3/2329	12524/26264
Индия	1235/1458	3/96	1843/1972
Япония	4950/1827	5/5	7321/2944
Южная Корея	1513/2665	3/777	2121/3271

Таблица 6. Погрешности моделей при расчете мировых цен

Модель \ Погрешность	MAD , Мт	$MAPE$, %	MSE , Мт
Взвешенное скользящее среднее	71	16	91
Двойное экспоненциальное сглаживание	271	71	377

Поскольку погрешности вычислены для производственных показателей, являющихся составными частями обобщенного коэффициента, то и погрешность влияния составной части производственного процесса, в нашем случае – термической обработки, на значения основных производственных показателей рассчитано с такой же погрешностью. Например, средняя относительная ошибка прогноза при расчете основных производственных показателей для России составляет: для объема производства 3%; для чистого экспорта 5%; для цены на сталь 16%. Следовательно, для коэффициента K относительная ошибка прогноза будет составлять 8%.

Таким образом, являясь необходимым процессом в производственном цикле, термообработка нуждается в постоянном совершенствовании своей технологии, в том числе посредством разработки и внедрения информационных систем [2, 8]

Литература

1. АЛЕХИН Е.И. *Основы анализа временных рядов*. Методические рекомендации. – Орел, 2005. – 56 с.
2. БАРАНОВ А.А. *Разработка автоматизированной системы для технологического процесса термической обработки заготовок из различных марок стали* // Молодежная наука в развитии регионов: Материалы Всерос. конф. студентов и молодых ученых с международным участием. – Березники, 2011. – С. 159–161.
3. БУДАНОВ И.А. *Черная металлургия в российской экономике*. – М.: МАКС-ПРЕСС, 2002. – 427 с.
4. *Официальный сайт лондонской биржи металлов* [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.lme.com> (дата обращения 14.05.2012).
5. *Официальный сайт мирового института стали* [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.worldsteel.org> (дата обращения 20.04.2012).
6. ФРОЛОВА Т.А. *Макроэкономика*. Конспект лекций. – Таганрог: ТРТУ, 2006.
7. ШАНЧЕНКО Н.И. *Лекции по эконометрике*. Учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2008.
8. BARANOV A.A. *Analytical review of software products for modeling process of heat treatment* // Современные вопросы науки – XXI век: Сб. науч. тр. по материалам VII междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 2011. – №2. – С. 3–4.
9. HOLT C.C. *Forecasting trends and seasonals by exponentially weighted moving averages* // O.N.R. Memorandum, Carnegie Inst. of Technology. – 1957. – №52. – P. 5–10.
10. <http://businessforecast.by/partners/publication/402> (дата обращения 12.05.2012).
11. <http://forecasteronline.com/index.php> (дата обращения 25.04.2012).
12. <http://www.metalika.ua/news/356192> (дата обращения 16.05.2012).

13. <http://www.metainfo.ru/ru/news/56346> (дата обращения 16.05.2012).
14. <http://www.planetcalc.ru/594> (дата обращения 20.05.2012).
15. <http://www.raexpert.ru/researches/metallurgy> (дата обращения 22.05.2012).
16. <http://scm-book.ru/HoltWinters> (дата обращения 12.05.2012).
17. http://www.srines.com/book_754_chapter_83_18.1._СHernaja_metallurgija.html (дата обращения 11.05.2012).
18. SRIVASTAVA R. *Polynomial Regression* // Technical report, Indian Agricultural Statistics Research Institute, 2004.

METHOD TO ESTIMATE INFLUENCE OF STEEL HEAT TREATMENT TECHNOLOGY LEVEL ON EFFICIENCY OF STEELMAKING INDUSTRY

Anton Baranov, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Postgraduate (baranov_anton@inbox.ru, 8(950)45-44-715).

Rustam Fayzrakhmanov, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Doctor of Science, professor (fayzrakhmanov@gmail.com, 8(912)88-100-86).

Abstract: We propose a formal method to forecast a complex of parameters describing heat treatment technology and perform analysis of technology parameters' dynamics for steelmaking industries worldwide. Than we investigate influence of steel heat treatment technology level on efficiency of steelmaking industry.

Keywords: prognostic evaluation method, production indicators, heat treatment.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Р. М. Нижегородцевым