

УДК 519.7:681.51

*В.О. Агеев, Т.Л. Качанова,
 Б.Ф. Фомин, О.Б. Фомин*

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА РЕИНЖИНИРИНГА ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛОПРОДУКТОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО ЗНАНИЯ

Производство металлопродуктов рассматривается как открытая производственная система (ПС). В качестве исходного представления ПС используется эмпирическое описание (ЭО). В ЭО отражаются: все этапы производственного цикла; все доступные регулярно контролю показатели процесса производства товарной продукции; все характерные актуальные состояния ПС. На основе ЭО методами физики открытых систем (ФОС) автоматически генерируется научное знание: о состояниях ПС; об изменчивости ее показателей; о внутрисистемных механизмах, формирующих изменчивость показателей. Полученное знание используется при подготовке реинжиниринга ПС, направленного на устранение, предупреждение или снижение риска возникновения проблем и на повышение качества, безопасности и эффективности производственных процессов.

Подходы и методы ФОС

ФОС — посткибернетическая парадигма системологии [1, 2]. ФОС предложила новый подход, в рамках которого преодолевается сложность открытых систем [3–5]. Научные основания и те-

оретические положения ФОС привели к созданию информационных технологий, обеспечивших: научное понимание и рациональное объяснение системной организации; автоматическую генерацию системного знания; выявление и оформление на основе системного знания внутрисистемных закономерностей [6–9].

Производство знания на базе технологий ФОС осуществляется на двух онтологических уровнях — системном и предметном (рис. 1).

Формирование контекста. В контексте представлены эмпирические и экспертные знания об открытой системе, жизнедеятельность которой тесно сопряжена с исследуемыми проблемами. Формирование контекста связано с полным отображением жизнедеятельности системы: через эмпирические данные мониторинга ее состояний; через данные контроля изменений ее внешнего окружения; через данные, полученные при отслеживании трендов глобальных ограничений.

Системные реконструкции. Технология ФОС, осуществляющая системные реконструкции, создает ЭО, генерирует *информационный ресурс знания*, производит *базовое знание* о системе [6].

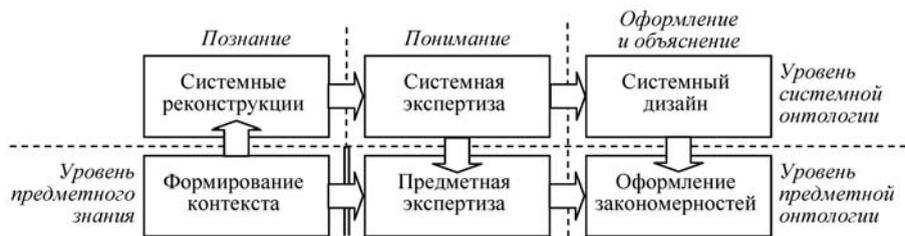


Рис. 1. Технологическая схема производства, понимания, объяснения и оформления системного знания

Базовое знание (*интеллектуальный ресурс знания*) образуют: семейство *системных моделей*, определяющих систему во всех ее качественных определенностях; семейство *моделей взаимодействия*, определяющих систему во всех возможных реальных формах проявления всех ее свойств и качеств.

Системная экспертиза. Технология ФОС, осуществляющая системную экспертизу, выполняет смысловой анализ системы, достигает научного понимания, объяснения и детерминации всех элементов системного знания, проводит квалиметрическое оценивание полученного знания, формирует *когнитивный ресурс знания* о системе и проблемах [5].

Системный дизайн. Технология ФОС, осуществляющая системный дизайн, синтезирует *модели состояний* системы, определяет *эмерджентные свойства* системы, выявляет, описывает и оценивает *механизмы формирования* состояний системы, свойств и уровней значений ее показателей, моделирует *эволюцию состояний* и *поведение показателей* системы, создает *технологический ресурс знания* о системе и проблемах [7].

Предметная экспертиза. Технология ФОС, осуществляющая предметную экспертизу, преобразует знание о состояниях и механизмах системы уровня системной онтологии в унифицированные *когнитивные схемы* предметной онтологии. Когнитивные схемы дают состояниям и механизмам содержательное оформление, направляющее и организующее деятельность экспертов-предметников. Знание о системе становится *когнитивным ресурсом решений* системных проблем [7–9].

Оформление закономерностей. Технология ФОС, осуществляющая оформление закономерностей, работает с системным знанием уровней

системной и предметной онтологий. Она актуализирует ресурсы знания, формирует, организует и предоставляет *технологический ресурс решений* проблем [7].

Исходные данные о системе и системной проблеме

В статье приводится решение задачи аналитической подготовки реинжиниринга металлургического производства на основе системного знания, полученного методами и технологиями ФОС. Объектом реинжиниринга является процесс производства стального листа [7].

Показатели производственного процесса:

Этап процесса	Показатели
Загрузка и расплавление шихты	C _{PI} , Mn _{PI} , P _{PI} , S _{PI} , Cr _{PI} , Ni _{PI} , Cu _{PI} , Mo _{PI} (по расплавлению), %
Окислительный период	t _{Ok} (длительность окислительного периода), мин
Восстановительный период	t _{Вос} (длительность восстановительного периода), мин
Выпуск стали	T _p (температура металла перед выпуском), °C
Разливка стали	CaO, SiO ₂ , FeO, Al ₂ O ₃ , MgO (в шлаке), % C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, Cu, Mo, Ti, Al (в стали), %
Затвердевание стали	T _p (температура металла в ковше), °C MasSI (масса слитка), т t _{От} , t _{Ор} (время отливки: тела слитка; прибыли), мин Vacuum (вакуум) (1 — есть; 2 — нет)
	t _{Izl} (время выдержки в изложнице), мин

Передача слитков на ковку	tPoc (время посадки в печь), мин tKop (время копежа), мин
Нагрев слитков под ковку	TPech (температура печи при посадке), °C tNagr, tVud (время: нагрева; выдачи), мин
Ковка	tKov (время ковки), мин d (диаметр слитка), мм d_1 (отношение диаметра слитка к толщине брамы), — TMetal (температура металла в конце ковки), °C
Прокатка брамы на лист	Weight (масса), т L1, L2, L3 (длина, ширина, толщина листа), (мм) l_L3 (отношение толщины брамы к толщине листа)
Оценка механических свойств листа	Rpo, Rm (предел текучести, предел прочности), МПа Udl (относительное удлинение), %

ЭО системы. Формат ЭО — таблица наблюдений. Строки таблицы — состояния системы. Столбцы таблицы — показатели, характеризующие состояние, внешнее окружение и глобальные ограничения системы. Каждое состояние системы описывает историю производства какого-то одного стального листа. Количество строк характеризует представительность ЭО, количество столбцов — полноту ЭО.

ЭО содержит 288 строк и 50 столбцов. В ЭО представлены 288 историй производства готовых изделий (весом от 1,1 до 20 т), полученных при прокатке брам (толщиной от 0,45 до 0,95 м), откованных из слитков (массой от 3 до 56 т; диаметром от 0,89 до 1,5 м), выплавленных в 110 плавках. Сдаточными показателями товарного стального листа являются: C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, Cu, Mo, Ti, Al — показатели химического состава металла; Rpo, Rm, Udl — показатели механических свойств листа.

Проблема воспроизводимости производственного процесса. Рынок предъявляет определенные требования к сдаточным показателям товарного стального листа, а именно: 1) значения сдаточных показателей каждого стального листа должны принадлежать регламентированным диапазонам; 2) выборочные распределения значений

сдаточных показателей товарной продукции должны отвечать нормальному закону. Все сдаточные показатели в ЭО удовлетворяют первому требованию и не удовлетворяют второму. Значимые отличия выборочных распределений сдаточных показателей от нормального закона свидетельствуют о нарушении воспроизводимости производства. Восстановление воспроизводимости — системная проблема. Для ее решения проводят реинжиниринг производственного процесса, задачами которого на этапе анализа проблемной ситуации являются: 1) выяснение несоответствий фактического функционирования производственного аппарата и действующих регламентов производства; 2) определение множественных внешних и внутренних факторов влияния, интегральным эффектом которых могла стать потеря воспроизводимости; 3) раскрытие, описание, научное понимание и рациональное объяснение множественных механизмов, действующих внутри ПС и детерминирующих значения сдаточных показателей.

Третья задача — наиболее сложная. В случае ее решения реинжиниринг производственного процесса будет основан на научном знании.

Решение

Производство знания о внутрисистемных механизмах формирования изменчивости сдаточных показателей показано на примере показателей механических свойств стального листа (Rpo, Rm, Udl), контролируемых на последнем этапе производственного процесса. Их изменчивость зависит от результатов выполнения всех этапов производственного процесса. Внутрисистемные корреляции этих показателей со всеми другими показателями отображаются через парные связи, вычисленные по данным, представленным в ЭО (рис. 2). На рис. 2 типы стрелок выделяют группы показателей, имеющих значимую статистическую парную связь с Udl, Rm, Rpo; во вложенных блоках указаны показатели, общие для Udl и Rm или для Rm и Rpo.

Информационный ресурс знания. Информационный ресурс создается в результате формирования и паспортизации ЭО системы. Паспортизация связана с сертификацией качества и потенциала ЭО. При сертификации качества оцениваются полнота и представительность ЭО. При сертификации потенциала для каждого по-

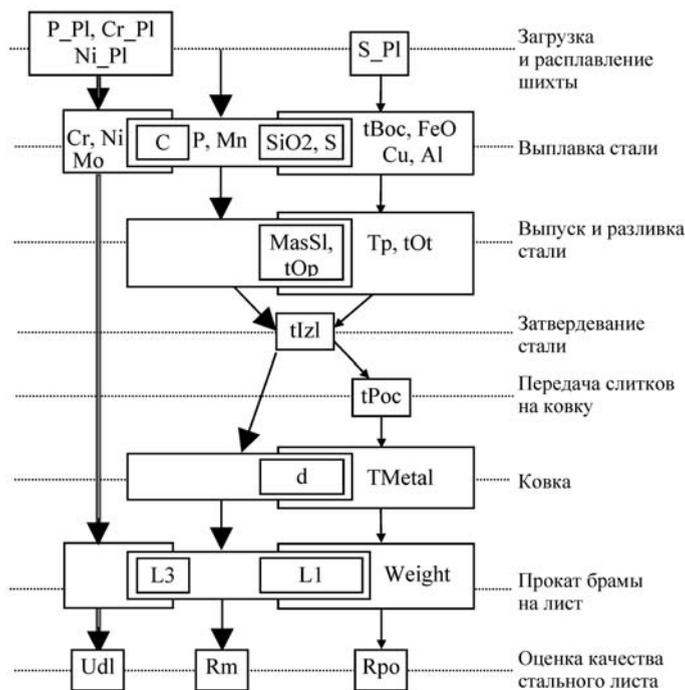


Рис. 2. Схема парных взаимосвязей показателей Rpo, Rm, Udl с другими показателями производственного процесса

казателя определяются: количественные оценки представительности, коррелятивности, осуществленности, системной обусловленности, представительности типичного и особенного, выражения внутрисистемных корреляций, акцентирования существенного; 1-й и 2-й информационные ранги; потенциалы адекватности

1-му и 2-му информационным рангам [5, 7]. В наименованиях классов показателей по 1-му и 2-му информационным рангам приняты обозначения: В — высокий, СР — средний информационный ранг; П — позитивный, НТ — нейтральный потенциалы адекватности информационному рангу (табл. 1).

Таблица 1

Фрагмент сертификата потенциала для слаточных показателей

Свойство	Показатели*				
	лучшие	хорошие	средние	плохие	худшие
Представительность		Mn > Rpo	Si > Ni > Cr > Cu	Al > S ~ P > Mo	Rm > Udl > C > Ti
Коррелятивность	Cu > P > Ni > Al > S	Mn	Cr > Mo	Si > C	Rpo > Rm > Ti > Udl
Осуществленность	Mn	P ~ S ~ Cr > C	Si > Al > Cu > Ni	Mo	Udl > Ti > Rpo > Rm
1-й информационный ранг	Mn	P ~ Cr > Cu > Ni > Al	S > Si	Mo	C > Rpo > Rm > Udl > Ti

Окончание табл. 1

Свойство	Показатели*				
	лучшие	хорошие	средние	плохие	худшие
Системная обусловленность	Cu > Rpo	Ni > Mn > P	Al > S > C	Mo	Cr > Si > > Rm > Ti > > Udl
Представительность типичного и особенного	Rpo > Rm > > Udl > Si > > Mn	Ni	P > S > C > > Cr	–	Cu > Mo > > Al > Ti
Выражение внутрисистемных корреляций	Rm > Udl > > Ti	Rpo > Cr ~ ~ Mo > C	S	Si > Ni > P	Cu > Mn > Al
2-й информационный ранг	Rm > Rpo ~ ~ Udl > Si	Cr > C ~ Ni	P ~ S	Mn ~ Cu ~ ~ Mo	Ti > Al
Акцентирование существенного	Rm > Rpo > > Udl > C	S	Cr > Cu > Ni	–	Al > P > > Mo > Mn
Потенциал адекватности	Класс показателей				
	П/В		П/СР		НТ/В
По 1-му информационному рангу	–		–		P
По 2-му информационному рангу	–		S		Rpo, Rm, Udl, Cr

Показатели механических свойств выделены в табл. 1 жирным шрифтом.

Интеллектуальный ресурс знания. Первым компонентом интеллектуального ресурса является множество *системных моделей*, раскрывающих внутрисистемные механизмы, ответственные за формирование значений сдаточных показателей. Изменчивость 50 показателей ПС

описывают 33 системные модели [7]. В таб. 2 системные модели обозначены именем особой вершины и выделены курсивом. Жирным шрифтом выделена информация о показателях Rpo, Rm, Udl и вхождении этих показателей в системные модели.

Таблица 2

Вхождение сдаточных показателей в системные модели

Сдаточный показатель	Имя модели	Модели, в которых показатель формирует ядро	Модели, в которых показатель играет вспомогательную роль
Cu	<i>Cu</i>	<i>tBoc, CaO, Al2O, MgO, Si, Mn, Ni, Al, d, Weight, Rpo, tKop</i>	<i>P_Pl, S_Pl, tOk, FeO, L3, tPoc, d_1</i>
Ni	<i>Ni</i>	<i>P_Pl, Tp, CaO, Al, TMetal, tPoc</i>	<i>tOk, tBoc, FeO, Al2O, MgO</i>
Rpo	<i>Rpo</i>	<i>S_Pl, tBoc, Cu, Al, TMetal, d_1</i>	<i>d, Weight, tIzI, I_L3</i>
Mn	<i>Mn</i>	<i>CaO, SiO2, Al2O, d, L3</i>	<i>C_Pl, tOk, FeO, MgO, Si, TMetal, Weight, Rm, tPoc, tKop, d_1</i>

Сдаточный показатель	Имя модели	Модели, в которых показатель формирует ядро	Модели, в которых показатель играет вспомогательную роль
Al	<i>Al</i>	<i>tIzl</i>	<i>P_Pl, S_Pl, Ni_Pl, tOk, tBoc, Tp, CaO, FeO, Al2O, MgO, Si, Ni, Cu, TPech, TMetal, Rpo, d_l</i>
Rm	<i>Rm</i>	<i>L3</i>	—
Si	<i>Si</i>	—	<i>tOk, CaO, Al2O, Mn, Al, tPoc</i>
P	—	<i>P_Pl, S_Pl, Al, tOk, CaO, Al2O, Rm, tPoc, tKop</i>	<i>FeO, MgO, Si, Mn, Ni, L2, L3, tIzl</i>
S	—	<i>tOk, Al2O, Cu, Al, tIzl, Weight, L3, Rm, Rpo</i>	<i>C_Pl, P_Pl, S_Pl, Ni_Pl, Tp, CaO, Ni, d_l</i>
C	—	<i>P_Pl, tBoc, CaO, Mn, Al, Rm</i>	<i>Si, Ni, TPech</i>
Cr	—	<i>tBoc, Al2O, Al, TMetal, tVud</i>	<i>P_Pl, Ni</i>
Mo	—	<i>tBoc, Tp, Mn, Al</i>	<i>P_Pl, tOk, FeO, Ni</i>
Ti	—	<i>CaO</i>	<i>TMetal</i>
Udl	—	—	<i>P_Pl</i>

Показатели Cu, Ni, Rpo, Mn, Al, Rm, Si породили системные модели и тем самым раскрыли свои ведущие системные механизмы. Показатели P, S, C, Cr, Mo, Ti, Udl не создали системных моделей, но вошли в состав ядер многих моделей. Сдаточный показатель Udl фактически не проявил себя как элемент ПС — не породил собственной модели, не вошел в состав ядер системных моделей. Все показатели характеризуются сложностью (количеством механизмов, формирующих их изменчивость) и неопределенностью детерминации значений (табл. 3).

Изменчивость Rpo описывают системные модели *Rpo, S_Pl, tBoc, Cu, Al, TMetal, d_l, d, Weight, tIzl, l_L3*, изменчивость Rm — системные модели *Rm* и *L3*, изменчивость Udl —

системная модель *P_Pl*. Каждая системная модель представлена ее графическим образом [7] (рис. 3).

Каждая системная модель ПС порождает уникальные эталонные состояния, каждое из которых раскрывает характерное качество системы. Неэталонные формы состояний системы порождаются моделями взаимодействия — *синглетами, дублетами, триплетами* [6]. Эти модели образуют второй компонент интеллектуального ресурса, в составе которого: 212 синглетов; 91 дублет подобия — *SIM*; 79 дублетов переключения — *SWI*; 67 дублетов поглощения — *ABS*; 18 триплетов взаимного влияния — *INT* (табл. 4).

Модели взаимодействия расширяют знание о внутрисистемных механизмах. В эталонной

Таблица 3

Сложность и неопределенность сдаточных показателей

Сдаточные показатели	Cu	Ni	Rpo	Mn	Al	Rm	Si	P	S	C	Cr	Mo	Ti	Udl
Число формирующих механизмов	20	12	11	17	19	2	7	17	17	9	7	8	2	1
Число неразрешенных противоречий	64	61	2	41	51	3	33	47	42	20	32	25	9	7

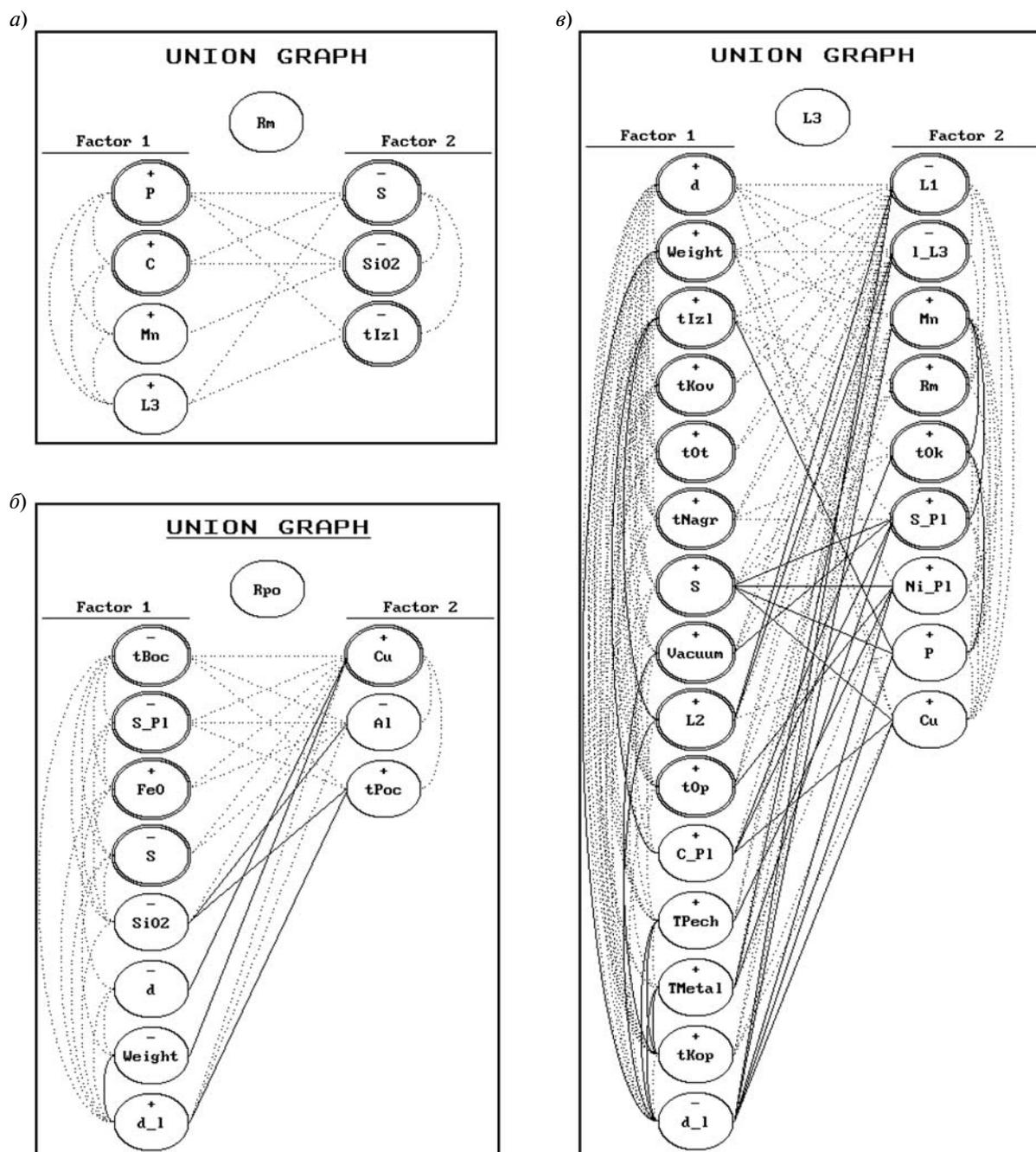


Рис. 3. Системные модели R_m , R_{po} и $L3$: двойным контуром обведены вершины ядра

Таблица 4

Вхождение сдаточных показателей в модели взаимодействия

Показатель	Модели взаимодействия			
	<i>SIM</i>	<i>SWI</i>	<i>ABS</i>	<i>INT</i>
Cu	9	9	13	0
Ni	7	8	6	0
Rpo	6	12	12	0
Mn	2	4	2	0
Al	11	1	3	0
Rm	0	0	0	4
Si	1	0	0	0
P	7	2	1	0
S	6	6	7	0
C	0	2	1	0
Cr	8	1	1	0
Mo	4	1	0	0
Ti	0	0	0	0
Udl	0	0	0	0

модели система дана в условиях равновесия в одном ее уникальном качестве. Модели взаимодействия проявляют равновесия системы при неравновесных ограничениях.

Когнитивный ресурс знания. Научное понимание и рациональное объяснение интеллектуального ресурса знания выполняется путем: оце-

нивания качества, законченности, пригодности системных моделей; учета влияния моделей взаимодействия; определения качеств *эталонных и идеалов состояний* системы; сопоставления системных моделей с эталонами и идеалами; оценивания достоверности, актуальности, пригодности *эталонных форм представления состояний* системы [5].

Законченность структурной формы системной модели интегрально характеризуют количественные оценки *выраженности смысла* и *завершенности устройства*. Взятые вместе, они определяют *1-й системный ранг* модели. Воплощение системного смысла, раскрытого в системной модели, во множестве актуальных состояний (*кластер данных*) интегрально характеризуют количественные оценки *координированной раздельности* и *опознания состояний*. Взятые вместе, эти оценки задают *2-й системный ранг*.

Проблема воспроизводимости раскрывается: через упорядоченное множество *целевых* системных моделей, имеющих в своем составе сдаточные показатели; через оценки вклада каждой целевой системной модели в объяснение ключевых механизмов формирования изменчивости сдаточных показателей; через количественную оценку целевой системной модели по ее способности к *обособлению* и *фокусированию существенного*; через *1-й целевой системный ранг* целевой модели; через количественную оценку *контрастности выражения*, характеризующую основные признаки эталона локальности — симметризованность, внутреннюю согласованность, самодостаточность системной модели; через оценку *близости целевой системной модели к ее эталону* (табл. 5).

Таблица 5

Фрагмент сертификата когнитивного ресурса знания: свойства и ранги моделей

Свойство	Системные модели				
	лучшие	хорошие	средние	плохие	худшие
Выраженность смысла	<i>Al > L3 > >CaO ~ d_l > >Al2 ~ Mn > > tOk ~ tVoc</i>	<i>tIzl ~ tKop > >Si ~ TMetal ~ ~ tPoc</i>	<i>Ni ~ Weight > >TPech ~ P_Pl ~ ~ Rpo > MgO ~ ~ C_Pl ~ FeO</i>	<i>l_L3 > Rm ~ ~ Tp ~ tVud ~ ~ Ni_Pl</i>	<i>Cu ~ S_Pl > > d > SiO2</i>
Завершенность устройства	<i>Rm > l_L3 > > Cu > d_l > > Rpo > d ~ ~ C_Pl</i>	<i>Ni_Pl > > Weight > > P_Pl</i>	<i>TMetal > tVud > > tIzl > SiO2 > > tPoc > tOk > > L3 > tKop</i>	<i>TPech > Mn > > MgO > S_Pl</i>	<i>Al > Tp > Ni > > FeO > Si > > CaO > Al2O > tVoc</i>

Свойство	Системные модели				
	лучшие	хорошие	средние	плохие	худшие
1-й системный ранг	$L3 \sim d_1 > tOk \sim \sim TMetal \sim$	$Mn \sim Al \sim \sim C_Pl \sim Rm \sim \sim tKop \sim P_Pl$	$tPoc > Cu \sim \sim TPech \sim \sim Ni_Pl > d \sim \sim MgO \sim tVud \sim \sim CaO$	$Al2O \sim Ni$	$TP \sim tBoc \sim \sim S_Pl \sim FeO \sim \sim SiO2 \sim Si$
Координированная раздельность	$Al > L3 > d_1 > \sim tBoc > Al2O > \sim TMetal > \sim TPech \sim tPoc$	$tIzl > CaO \sim \sim S_Pl > \sim Weight$	$tKop > Mn > \sim tOk > Si > \sim P_Pl > Ni > \sim MgO > Ni_Pl$	$Rpo > FeO \sim \sim tVud$	$l_L3 > Rm > \sim TP > Cu > \sim C_Pl > d \sim \sim SiO2$
Опознание состояний	$Al > Al2O > \sim CaO > tKop > \sim tBoc > Mn > \sim Rm \sim tPoc$	$Si > FeO > Ni > \sim d_1$	$TP > tOk > \sim TMetal > \sim Rpo > S_Pl \sim \sim MgO > tIzl > \sim C_Pl > Cu$	$P_Pl > l_L3 > \sim d > tVud$	$SiO2 \sim Ni_Pl > \sim L3 > TPech \sim \sim Weight$
2-й системный ранг	$Al > tBoc \sim \sim Al2O > CaO \sim \sim tPoc \sim d_1 > \sim tKop > Mn \sim \sim TMetal$	$Si \sim tOk > Ni \sim \sim tIzl \sim S_Pl$		$Ni_Pl \sim Cu \sim \sim C_Pl \sim \sim TPech$	$Weight \sim d > \sim SiO2$
Обособление суще- ственного	$Rpo > Rm > Cu > \sim S_Pl$	$TMetal \sim d_1$	$Al \sim tBoc > L3$	$l_L3 \sim d$	$tIzl \sim Weight > \sim P_Pl$
Фокусы существен- ного	$Al > d_1 > Rpo > \sim Cu$	S_Pl	$TMetal > tBoc > \sim L3 > Rm$	$Weight$	$tIzl > l_L3 > d > \sim P_Pl$
1-й целевой систем- ный ранг	$Rpo > Cu > \sim S_Pl \sim d_1$	$Al \sim TMetal$	$Rm \sim tBoc > L3$	$l_L3 \sim Weight$	$tIzl \sim d > P_Pl$
Контрастность выражения	$tVud \sim d_1 > \sim TMetal \sim \sim Weight > Rm > \sim Ni_Pl \sim l_L3 > \sim Al \sim L3$	$CaO > tPoc$	$Rpo > tBoc \sim \sim TP \sim P_Pl > \sim d > Cu > tKop > \sim Al2O \sim tOk \sim \sim Ni$	$C_Pl > FeO$	$MgO > SiO2 > \sim tIzl \sim Mn > \sim Si > TPech > \sim S_Pl$
Близость целевой модели к эталону	$d_1 > TMetal \sim \sim Weight > Rm > \sim l_L3 > Al \sim L3$		$Rpo > tBoc \sim \sim P_Pl > d > Cu$		$tIzl > S_Pl$
Итоговый целевой ранг	d_1, Al, Rm	$Cu, TMetal, L3$	$tBoc, Rpo, S_Pl$	$tIzl, P_Pl, Weight$	l_L3, d

Проблема воспроизводимости ПС далее раскрывается через интегральные количественные оценки качеств *оформленности* и *однородности* системной модели. По каждому из этих свойств определяются классы хороших, средних и плохих моделей (табл. 6).

На основе 1-х системных рангов системных моделей выявляется множество «сильных» моделей (носители *доминирующих механизмов*)

и формируются три класса моделей (П/В, П/СР, НТ/В), обладающих высоким или средним значением 1-го системного ранга и позитивным или нейтральным *потенциалом адекватности 1-му системному рангу*. На основе 2-х системных рангов моделей выявляются множества кластеров данных высокого и среднего качества, а также формируются три класса кластеров (П/В, П/СР, НТ/В), характеризующих *перспективы верифи-*

Таблица 6

Фрагмент сертификата когнитивного ресурса знания: качество моделей

Свойства	Класс		
	хороших моделей	средних моделей	плохих моделей
Оформленность	<i>Tr, SiO2, d, C_Pl, l_L3, Cu, Rm, Ni_Pl, tVud, Rpo, d_l</i>	<i>FeO, Ni, L3, CaO, Al, Mn, tPoc, tKop, Si, Al2O, tOk, tIzl, MgO, Weight, S_Pl, TMetal, P_Pl, tBoc</i>	<i>TPech</i>
Однородность	<i>Tr, d, l_L3, Cu, Rpo, Rm, C_Pl, Ni_Pl, SiO2, Ni, tOk, tVud, d_l, tPoc, FeO, tIzl, Mn, Al2O, Si, MgO, CaO, Weight, S_Pl</i>	<i>tBoc, tKop, L3, P_Pl, TPech, Al, TMetal</i>	—

кации эталонных состояний, обладающих позитивным и нейтральным потенциалом адекватности 2-му системному рангу (табл. 7).

Каждая системная модель порождает эталонные модели поведения (стереотипы поведения): *Right*; *Left* (рис. 4). Каждый стереотип *Right* порождает эталонные модели состояний *High/Right* (краткая форма — *HR*); *Low/Right* (*LR*) (рис. 5). Каждый стереотип *Left* порождает эталонные модели состояний *High/Left* (*HL*); *Low/Left* (*LL*).

Эталонные модели состояний описаны через показатели, для которых определены: системные роли; уровни значений; системные значимости. Каждая эталонная модель отображается в кластер данных (набор представителей эталонного состояния в наблюдаемой реальности).

Технологический ресурс знания. История производства каждого стального листа описывает одно актуальное состояние ПС. В ЭО представлены 288 актуальных состояний системы. В технологическом ресурсе каждое актуальное состояние задано формальной моделью — реконструкцией состояния, а ПС в целом — множеством реконструкций всех актуальных состояний системы.

Технологический ресурс аккумулирует системное знание:

- о формальных моделях актуальных состояний ПС, имеющих вид *сборок моделей форм воплощения эталонов* системы;

- об *общей форме описания* ПС в состояниях, через которую получают рациональное объяснение *правил, ограничений, системных механизмы*, порождающие состояния системы;

- о применимости формальных моделей реконструкций состояний ПС для объяснения *системных закономерностей* совместной согласованной изменчивости каждого показателя в каждом актуальном состоянии;

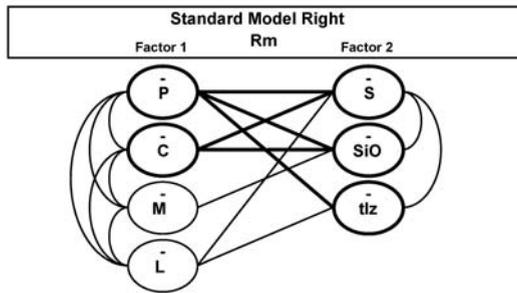
- о *системной и предметной значимости* каждого показателя, объясняющих степень сопряжения понятого смысла и эмпирического факта;

- о формальном определении каждого показателя через *наборы моделей системных механизмов*, отвечающих за *детерминацию уровня значения* показателя в каждом конкретном состоянии ПС, за выявление *потенциалов подвижности* показателей, за *неустойчивость частных механизмов* в этом состоянии (табл. 8, рис. 6).

Таблица 7

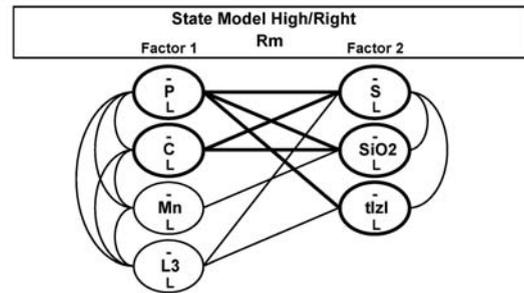
Фрагмент сертификата когнитивного ресурса знания: классы моделей

Потенциал	Класс		
	П/В	П/СР	НТ/В
Для моделей	—	<i>C_Pl, Rpo, l_L3</i>	<i>TMetal, tPoc, d_l</i>
Для кластеров	<i>CaO</i>	<i>Si, Mn, Ni, tKop</i>	<i>tBoc, Al2O, Al, tPoc</i>



Значимость вершин фактора 1: $P > C > L3 > Mn$.
 Значимость вершин фактора 2: $S > SiO2 > tIz$.
 Вершины ядра обведены жирным контуром.
 Подтверждена роль всех вершин ядра

Рис. 4. Стереотип поведения *Rm (Right)*



Значимость вершин фактора 1: $P \sim C > Mn > L3$.
 Значимость вершин фактора 2: $tIz > S \sim SiO2$.
 Вершины ядра обведены жирным контуром.
 Подтверждена роль всех вершин ядра

Рис. 5. Эталонная модель *Rm (HR)*

Таблица 8

Формальное определение уровней значений сдаточных показателей (фрагмент)

Показатель	Актуальное состояние	Значение	Механизмы, формирующие уровень значения	Уровень значения	Надежность уровня
Rm	147585	493.8	<i>L3 (HL)</i>	3	Надежный
	148172	510	<i>L3 (HR)</i>	10	Допустимый
	148378	530	<i>Rm (HR), L3 (HR)</i>	14	Надежный
Rpo	147585	274.5	<i>Cu (HL), d_1 (HR)</i>	3	Надежный
	148183	310	<i>S_Pi (HR), tIzI (HR), tBoc (HL)</i>	13	Ненадежный
	148408	315	<i>Rpo (HR)</i>	14	Надежный
			<i>Rpo (HL), d (HR), Cu (LL)</i>	14	Надежный

Когнитивный ресурс решений. Основной компонент когнитивного ресурса решений — когнитивные схемы внутрисистемных механизмов, формирующие качественные определенности системы. Внешними образами качественных определенностей служат системные модели, образующие интеллектуальный ресурс системного знания. Научное понимание системных моделей получено на этапе генерации когнитивного ресурса системного знания. Механизм одной отдельно взятой качественной определенности реконструируется по ее системной модели. Для этого генерируются когнитивные схемы механизмов факторов системной модели и синтезируется единая когнитивная схема механизма двухфакторного взаимодействия. Эту задачу автоматически решает технология предметной экспертизы (рис. 7).

На схеме: вершина *d* выражает идею фактора; блоки (*d, tIzI*), (*tOp, tOt, tKov*), (*Weight, L2*), (*TMetal, C_Pi*) связаны *отношением равнознач-*

ности; блоки (*d, tIzI*) и (*TMetal, C_Pi*) связаны *отношением несовместности*; элементы ядра связаны *отношением доминирования*; *отношения подчинения* распространяют смысл ядерных элементов на дополнительные вершины фактора. Элементы схемы наполнены конкретно-предметным содержанием (табл. 7).

Конкретно-предметное знание об элементах когнитивной схемы:

Главные элементы

d — процессы ликвации, размеры дендритов и междендритных объемов;

tIzI — время затвердевания металла слитка, измельчение литого зерна, более полное выделение карбидов, нитридов, сульфидов, фосфидов по границам зерен;

tOp — «работа» прибыли, снижение загрязненности металла, увеличение плотности слитка;

tOt — развитие структурной, химической и физической неоднородностей металла слитка;

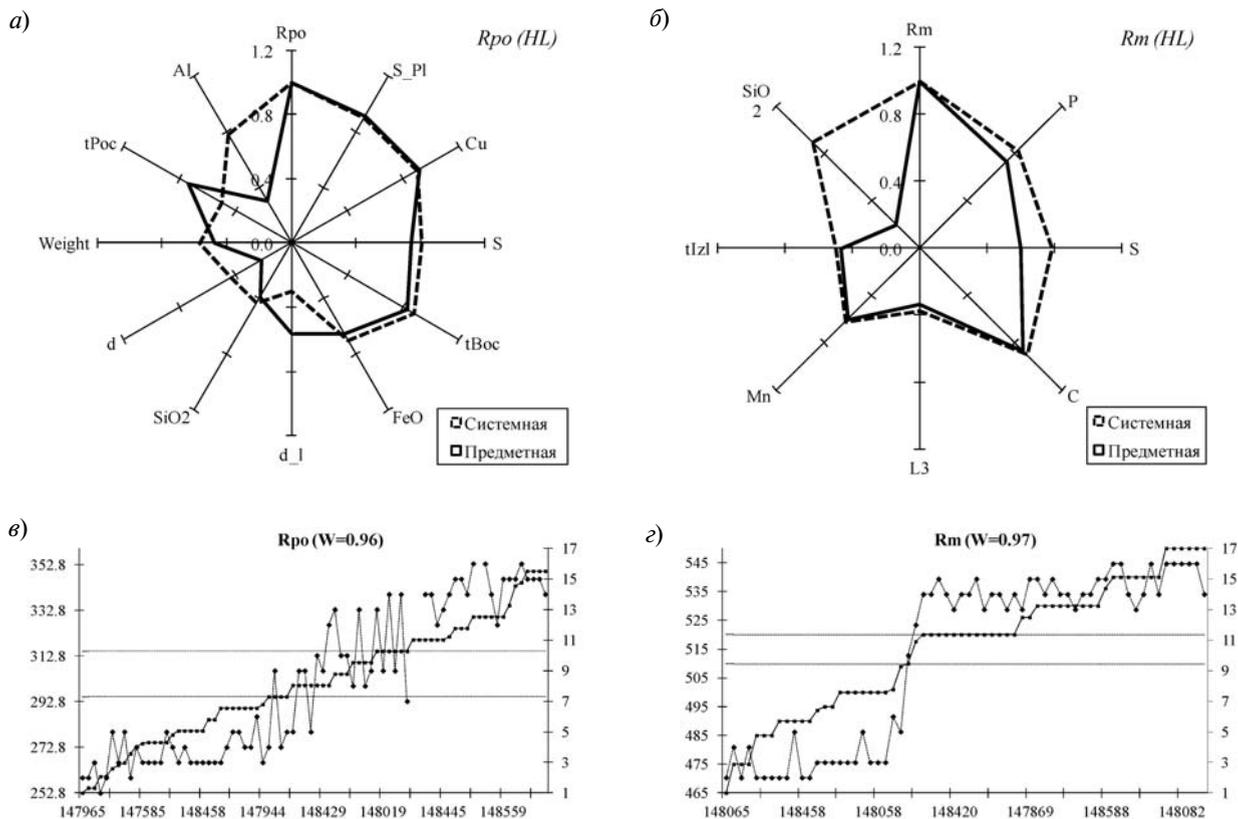


Рис. 6. Элементы технологического ресурса знания:

a — системная и предметная значимость R_{po} ; *б* — системная и предметная значимость R_m ; *в* — значения (сплошная линия) и уровни значений (пунктирная линия) R_{po} ; *г* — значения и уровни значений R_m ; W — значение коэффициента конкордации (оценки качества моделирования значения показателя уровнем его значения)

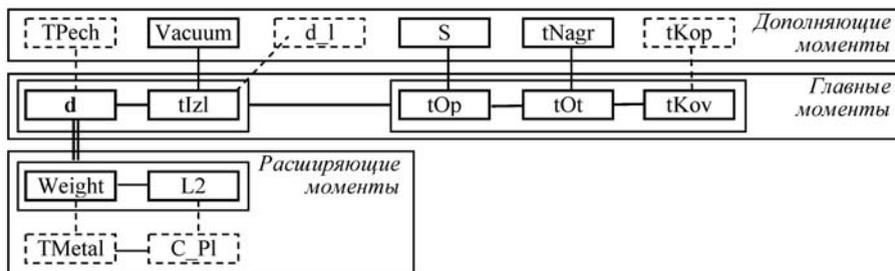


Рис. 7. Когнитивная схема механизма 1-го фактора системной модели L_3 (см. рис. 3)

tKov — разрушение дендритной структуры, формирование структуры ковального металла

Дополняющие элементы

TResch — окисление поверхности металла, выгорание углерода в поверхностных слоях, окисление поверхности трещин и подкорковых дефектов;

Vacuum — содержание водорода, азота и кислорода в металле;

d_1 — измельчение литого зерна и заваривание дефектов;

S — ликвация элементов химсостава, загрязненность металла неметаллическими включениями, продолжительность затвердевания, размеры литого зерна, образование микропористости;

tNagr — фазовая перекристаллизацию, интенсивный рост аустенитного зерна;

tKop — организация производства, размеры слитков

Расширяющие элементы

Weight — ликвация;

L2 — структура зерна;

TMetal — фазовые превращения, разрушение аустенитного зерна при окончательном охлаждении;

C_P1 — росту предела прочности с увеличением содержания углерода в стали

Аналогичным образом строится когнитивная схема фактора 2 модели L3. При построении

когнитивной схемы двухфакторного взаимодействия дополнительно вводятся *отношения консолидации, ассоциации, разделенности, сопряженности*. В когнитивном ресурсе решений представлены когнитивные схемы всех механизмов, отвечающих в системе за формирование ее качественных определенностей.

Технологический ресурс решений. Каждый стальной товарный лист описывается формальной моделью — *реконструкцией состояния ПС*, с которым был связан процесс изготовления этого листа. Реконструкция любого состояния характеризует каждый показатель ПС в данном состоянии набором атрибутов: рангом, уровнем значения, предопределенностью, важностью, подвижностью. Реконструкция состояния задает модель значения показателя в данном состоянии. Технологический ресурс решения исчерпывающим образом характеризует результаты моделирования наблюдаемой изменчивости всех показателей ПС (табл. 9).

Из табл. 9 следует, например, что наблюдаемая изменчивость показателей Rpo, Cu, Ni, P, S моделируется с высоким качеством, тогда как изменчивость Rm, Udl, Ti, Si моделируется с низким качеством. В ЭО имеется 158 актуаль-

Таблица 9

Оценки результатов моделирования значений сданных показателей

Показатель	Количество значений	Доля значений, не охваченных моделями	Число уровней значений		
			неопределенные	возмущенные	надежные
Cu	286	0,03	1	48	228
Ni	286	0,07	6	60	200
Rpo	158	0,03	2	43	108
Mn	286	0,06	0	103	165
Al	282	0,04	0	141	131
Rm	158	0,59	0	18	46
Si	286	0,41	1	75	92
P	286	0,05	2	60	209
S	286	0,03	5	101	171
C	286	0,21	6	85	134
Cr	286	0,22	0	93	131
Mo	281	0,12	0	81	166
Ti	281	0,80	2	33	20
Udl	158	0,77	3	21	12

Таблица 10

Модели механизмов, формирующих значения показателя R_{po} в актуальных состояниях ПС

Актуальное состояние	Классы моделей			Комментарий
	1	3	4	
147585	$Cu (HL)$	$d_l (HR)$	—	Надежный низкий уровень значения R_{po} обеспечен моделью класса 1 и подтвержден моделью класса 3
148183	$R_{po} (HR)$	$S_{Pl} (HR)$ $t_{Boc} (HL)$	$tIzI (HR)$	Ненадежный высокий уровень значения R_{po} обусловлен моделью класса 4
148408	$d (HR)$ $R_{po} (HL)$	$Cu (LL)$	—	Надежный высокий уровень значения R_{po} обеспечен моделями класса 1; модель класса 3 действует в направлении понижения уровня

ных значений R_{po} . Из них: 108 значений надежно моделируются уровнями значений (см. рис. 6, в); 43 значения моделируются *надежными, допустимыми* или *предельными* уровнями значений в зависимости от характера проявления свойственного этому показателю потенциала изменчивости в данных конкретных актуальных состояниях; два значения по моделям для R_{po} уровнями значений не определяются; для пяти значений R_{po} модели не были получены.

По реконструкциям всех актуальных состояний ПС известны все системные модели, детерминирующие состояния ПС. Множество системных моделей разбивается на пять классов. Классы моделей образуют две группы: классы 1 и 2 описывают механизмы, детерминирующие состояния системы; классы 3, 4 и 5 описывают механизмы, ответственные за изменчивость и подвижность состояний (табл. 10).

В табл. 8 для показателя R_{po} приведены механизмы, формирующие уровни его значений в трех конкретных актуальных состояниях. В табл. 10 эти механизмы, представленные в каждом состоянии соответствующими наборами моделей механизмов, разбиты на классы. Уровень значения R_{po} в каждом состоянии ПС получил рациональное объяснение.

Системное знание о состояниях ПС и внутрисистемных механизмах, определяющих ее

жизнедеятельность, представлено сертифицированными ресурсами знания о системе и ресурсами решения проблемы воспроизводимости производства.

Достигнуто научное понимание механизмов формирования изменчивости сдаточных показателей. Каждый механизм определен в его полноте, завершенности, сложности, способности раскрывать сущность процесса формирования значений сдаточных показателей, его вклад в надежную детерминацию или в изменение значений показателей в определенных производственных условиях и обстоятельствах.

Выявлены критические моменты производственного аппарата, связанные с потерей воспроизводимости: недостаточная наблюдаемость и управляемость производства по сдаточным показателям (см. R_m , U_{dl} , T_i , S_i); несовершенство производственных регламентов (несогласованность временных, температурных и массогабаритных параметров); многообразие и сложность внутрисистемных механизмов, определяющих значения сдаточных показателей и конечные свойства товарного стального листа (см. Cu , Al , P , S , Mn).

Полученное системное знание служит основой при разработке эффективных научно обоснованных мероприятий реинжиниринга, обеспечивающих воспроизводимость производства стального листа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fomin, B.F.** Physics of Systems is a postcybernetic paradigm of systemology [Текст] / B.F. Fomin, T.L. Kachanova // Proc. the Intern. Sympos. Science 2.0 and Ex-

pansion of Science: «S2ES» in the context of The 14th World-Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics: «WMSCI 2010», June 29th– July 2nd,

2010 / Orlando, Florida, USA.— P. 244–249.

2. **Качанова, Т.Л.** Физика систем— посткибернетическая парадигма системологии [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин // Научно-технические ведомости СПбГПУ.— 2011. № 3 (121).— С. 29–36.

3. **Качанова, Т.Л.** Основания системологии феноменального [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин.— СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1999.— 180 с.

4. **Качанова, Т.Л.** Метатехнология системных реконструкций [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин.— СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002.— 336 с.

5. **Качанова, Т.Л.** Введение в язык систем [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин.— СПб.: Наука, 2009.— 340 с.

6. **Качанова Т.Л.** Технология системных реконструкций [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин // Про-

блемы инновационного развития.— Вып. 2.— СПб.: Политехника, 2003.— 146 с.

7. **Качанова, Т.Л.** Методы и технологии генерации системного знания [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин.— СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012.— 132 с.

8. **Fomin, V.F.** Physics of Open Systems: Generation of System Knowledge [Текст] / V.F. Fomin, T.L. Kachanova // Proc. the 3rd International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics: «IMCIC 2012», March 25th – 28th, 2012 /Orlando, Florida, USA.— P. 41–48.

9. **Качанова, Т.Л.** Физика систем: производство системного знания [Текст] / Т.Л. Качанова, Б.Ф. Фомин // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2012.— № 2 (147). Т. 2.— С. 291–299.