

С. П. Павлинич, А. С. Горюхин, Е. С. Гайнцева

## БАЗА ЗНАНИЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННОЙ ОТЛИВКИ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ

В статье рассматриваются вопросы проектирования баз знаний экспертных систем в области литейного производства для разработки технологии отливки лопаток турбин, поиска причин возникновения дефектов и методов их предупреждения. *Экспертная система; база знаний; поле знаний, отливка; качество*

Технологический процесс получения охлаждаемых лопаток является одним из наиболее трудоемких и сложных в литейном производстве авиационного двигателестроения. При литье лопаток имеет место совокупность температурных, деформационных, усадочных и других процессов, предопределенных спецификой технологии и определяющих качество получаемой отливки. Сложность технологического процесса получения внутренней полости лопатки приводит к необходимости длительной доводки разработанной технологии в производственных условиях.

Изменение геометрии системы стержень – отливка – оболочка при заливке, последующей кристаллизации и остывании определяет конечную пространственную точность лопатки. Наиболее полно в теоретическом плане этот вопрос разработан на кафедре МТЛП УГАТУ. Согласно основным положениям этих работ, геометрия литой лопатки искажается в результате деформационных процессов конструкции стержень–отливка–оболочка. В то же время данная проблема изучена не полностью. Целесообразно при решении задач управления сложными многопараметрическими и сильносвязанными системами, к которым относится проблема прогнозирования изменения геометрии отливки на этапах заливки и кристаллизации, пользоваться экспертными системами (ЭС).

Основой любой ЭС является совокупность знаний, структурированных в целях упрощения процесса принятия решения [1]. База знаний является ядром ЭС, которое в процессе функционирования системы расширяется, накапливая новые знания. Знания выражены в явном виде и организованы так, чтобы упростить при-

нятие решений. Накопление и организация знаний – одна из самых важных задач ЭС.

### 1. ПОЛЕ ЗНАНИЙ

Центральным понятием на стадиях получения и структурирования знаний является поле знаний, которое может быть представлено как совокупность концептуальной структуры, отражающей понятийную структуру предметной области, и функциональной структуры.

Основными понятийными элементами поля знаний предлагаемой ЭС получения качественной отливки охлаждаемой лопатки являются оболочка, сплав и стержень. Пространственная точность внутренней полости рассматривается с точки зрения системы стержень – отливка – оболочка. На качество и точность внутренней полости влияют все технологические процессы, воздействующие на указанную выше систему. На технологических этапах сушки и прокаливания формы ее элементы (стержень и оболочка) находятся под воздействием неравномерного, постоянно меняющегося температурного поля, что приводит к механическому взаимодействию между стержнем и формой в результате неравномерного их расширения. При заливке формы в систему оболочка – стержень включается жидкий сплав, а затем и кристаллизующийся, оказывая дополнительное термомеханическое воздействие. Возникает сложное напряженно-деформированное состояние системы стержень–отливка–оболочка, которое и определяет в конечном итоге пространственную точность полученной лопатки. От правильности выбранных технологических параметров зависит качество отливки. Все описанные выше понятия входят в поле знаний рассматриваемой проблемы (рис. 1).

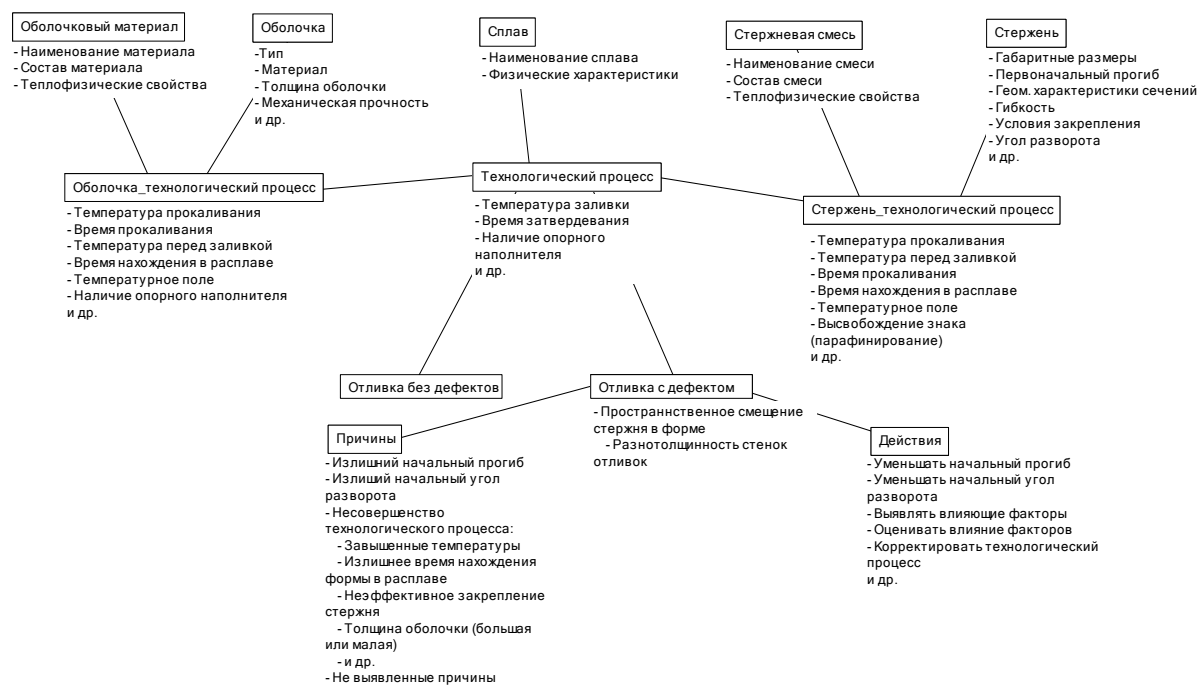


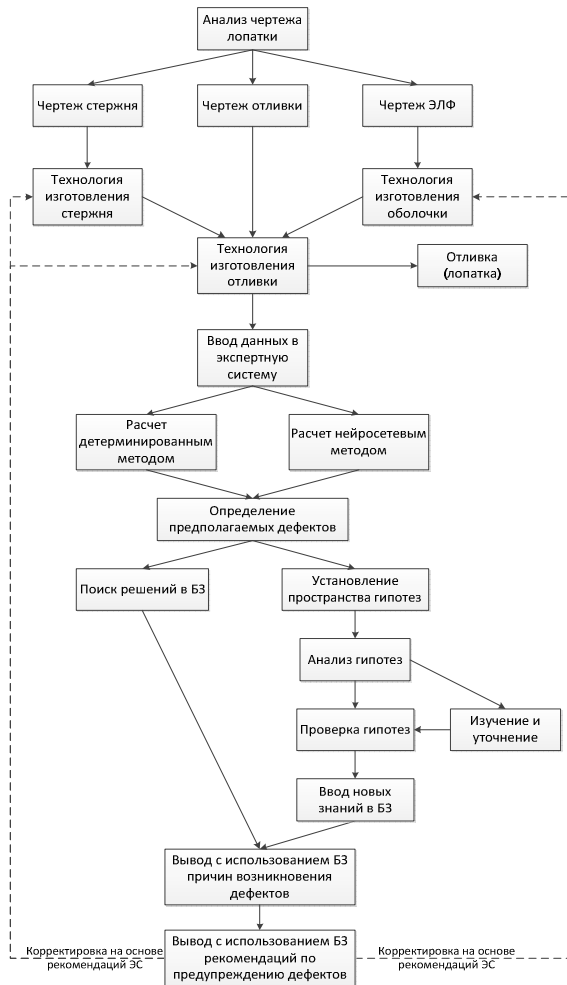
Рис. 1. Концептуальная составляющая поля знаний получения лопатки

Функциональная составляющая поля знаний моделирует схему рассуждения эксперта (рис. 2). Основой для разработки технологического процесса изготовления отливки является чертеж детали. Разработка конструкции отливки начинается с анализа рабочего чертежа детали, технических требований, а также обуславливается возможностями оборудования цеха [2]. С точки зрения рассматриваемой системы стержень–отливка–оболочка технолог проектирует чертеж элементов литейной формы (ЭЛФ), чертеж отливки (или чертеж модели) и чертеж стержня (или стержневого ящика). На основе чертежа стержня составляется технология его изготовления, а на основе чертежа ЭЛФ – технология изготовления оболочки. Технология изготовления отливки содержит в себе все технологические этапы, затрагивающие систему стержень–отливка–оболочка и описывает технологические процессы получения литой лопатки.

Наличие ЭС позволяет рассчитать пространственную точность детерминированным и нейросетевым методами. На основе выполненного расчета и статистического анализа по аналогичным технологиям получения лопаток система прогнозирует дефекты, которые могут возникнуть в отливке. Далее происходят два процесса, идущих параллельно, – поиск причин возникновения дефектов в базе знаний и, на основе срав-

нения детерминированных расчетов с нейросетевыми, определяются параметры процесса, вносящие наибольший вклад в формирование дефектов. Зная коэффициенты влияния основных технологических параметров, технолог может рассмотреть гипотезы их появления, не учтенные детерминированным методом (установление пространства гипотез). Гипотезы подвергаются анализу с целью поиска новых знаний и при необходимости уточняются. Далее идет проверка гипотез на практике. Особенностью проверки гипотез является то, что они могут осуществляться в рамках рабочего процесса получения лопаток, без отдельных опытных плавок, так как на этапе уточнения технолог, изменяя технологический процесс, проверяет его ЭС. В случае подтверждения гипотезы новые знания вносятся в базу знаний в виде продукционных правил, либо в виде корректировки детерминированного метода расчета.

Важным моментом является невозможность учета всех факторов и высокая зашумленность исходных данных. При переходе с одного оборудования на аналогичное зачастую меняется уровень брака при соблюдении той же технологии. Выявить причины изменений сложно и в ряде случаев нецелесообразно. ЭС позволит уже после нескольких плавок дать рекомендации по корректировке технологического процесса при переходе на другое оборудование.



**Рис. 2.** Функциональная составляющая поля знаний получения лопатки с заданной пространственной точностью

После определения ЭС причин возникновения дефектов происходит формирование перечня рекомендаций по их предупреждению. На основе рекомендаций технолог изменяет технологические параметры.

## 2. СТРУКТУРА БАЗЫ ЗНАНИЙ

После описания концептуальной и функциональной составляющей поля знаний следует этап структурирования и описания базы знаний, который является своеобразным переходом между стадиями структурирования и формализации при разработке прототипа ЭС.

Экспертную систему оценки качества получаемых охлаждаемых лопаток с уверенностью можно отнести к сложным системам, поскольку она обладают основными признаками сложности (иерархия понятий, внутриэлементные и межэлементные связи и пр.). Проектирование

сложных систем и методы структурирования информации традиционно использовали методологический прием расчленения формально описанной системы на уровни (блоки или модули).

Структуру базы знаний получения охлаждаемых лопаток турбин можно представить как совокупность формул, таблиц, графиков и неформализованных зависимостей. В процессе работы ЭС происходит непрерывное изменение базы знаний. Знания из графических, табличных форм и из неформализованных зависимостей переходят в формализованный вид [3].

На высших уровнях иерархии при структурировании базы знаний используются наименее детализированные представления, отражающие общие черты и особенности проектируемой системы. К высшим уровням можно отнести такие структуры фрагментов базы знаний как расчет величины прогиба стержня и расчет величины угла разворота стержня. Окончательный прогиб и угол разворота стержня в отливке определяют пространственную точность внутренней полости литой лопатки, а значит, определяют ее качество.

На следующих уровнях структурирования базы знаний степень подробности возрастает, при этом система рассматривается не в целом, а отдельными блоками. На величину прогиба стержня оказывают влияния множество факторов: величина первоначального прогиба –  $f_0$ ; разность коэффициентов термического расширения формы и стержня  $\Delta\alpha$  и распределение температуры по их высоте –  $\Delta\alpha T \xi \frac{12e_z b^2}{\pi^2 h^2}$ ; распределение температуры по толщине стержня –  $\alpha_{cm} \Delta T_z \xi \frac{b^2}{12\pi^2 h}$ ; эксцентricность приложения возникающей осевой нагрузки –  $\Delta\alpha T \psi \frac{\Phi_n b^2 e_x}{\pi^2 h^2}$ ; распределение температуры по ширине стержня –  $\alpha_{cm} \Delta T_x \psi \frac{\Phi_n a b^2}{12\pi^2 (1-\nu) h^2}$ ; уровень осевой нагрузки (осевой деформации стержня) –  $\frac{z(y)}{1 - \psi \frac{\lambda^2}{\pi^2} \{P\}}$ . Структура фрагмента базы знаний представлена на рис. 3.

**Формула**

$$\omega = \left\{ f_0 + \Delta\alpha T \xi \frac{12e_z b^2}{\pi^2 h^2} + \alpha_{cm} \Delta T_z \xi \frac{b^2}{12 \pi^2 h} + \Delta\alpha T \psi \frac{\Phi_n b^2 e_x}{\pi^2 h^2} + \alpha_{cm} \Delta T_x \psi \frac{\Phi_n a b^2}{12 \pi^2 (1-\nu) h^2} \right\} \times z(y) \times \left[ \Delta\alpha T - \frac{\lambda^2}{\pi^2} \left\{ \Delta\alpha T - \frac{[\Delta\alpha T 12 e_x (1-\nu) + \alpha_{cm} \Delta T_x a]^2 2ah (1+\nu)}{[12(1-\nu)]^2 [J_{kr} \Delta\alpha T (J_x - J_z) 2(1+\nu)]} \right\} \right]$$

**Неформализованные зависимости**

Факторы, влияющие на прогиб:

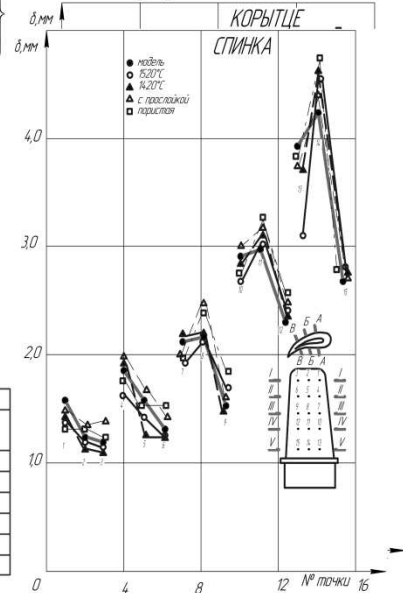
- при увеличении температуры заливаемого металла прогиб увеличивается;
  - увеличение толщины оболочки приводит к увеличению прогиба;
  - с увеличением температуры формы перед заливкой прогиб уменьшается;
  - при заливке формы с дополнительной теплоизоляцией прогиб увеличивается;
  - высвобождение стержня за счет парафинирования приводит к увеличению прогиба;
  - увеличение времени нахождения формы в прокалочной печи приводит к увеличению прогиба
- и др.

**Расчет величины прогиба стержня**

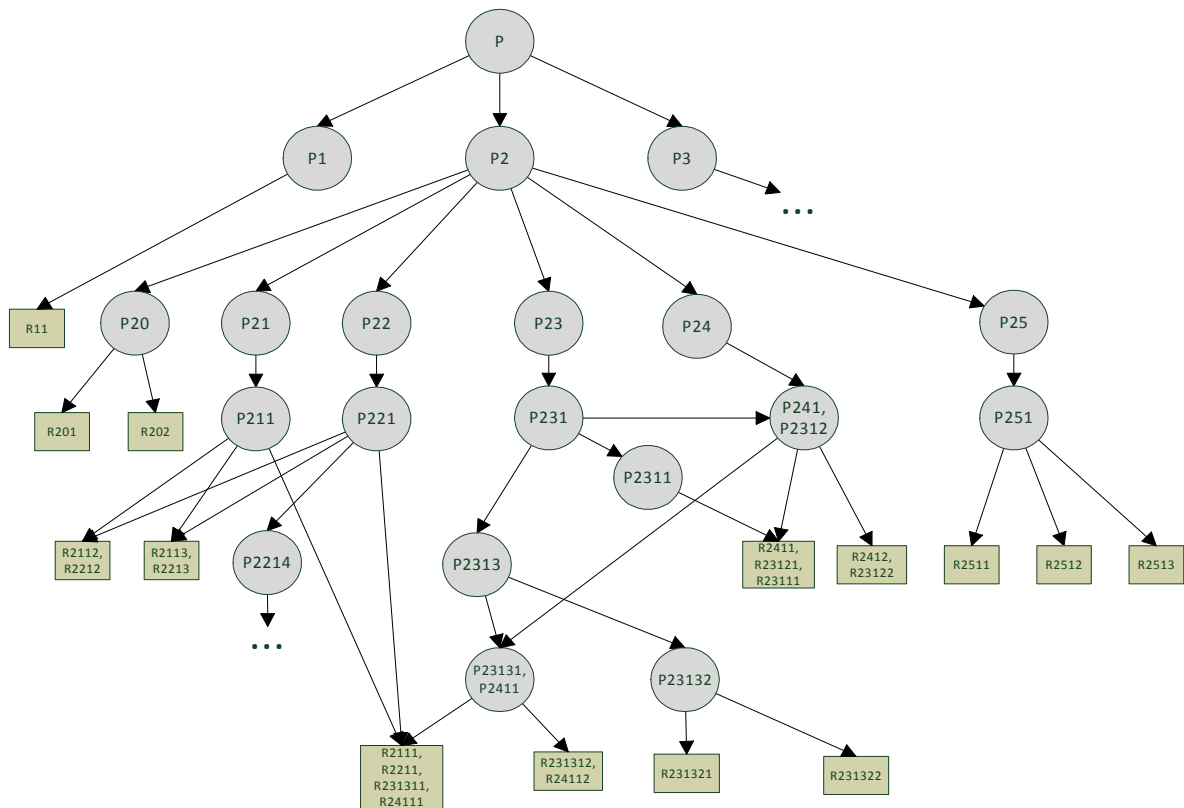
**Таблицы**

Материал стержня	Температура металла при заливке, °С	Гибкость стержня	Прогиб стержня, мм	
			Ожидаемый	Фактический
SiO <sub>2</sub> +Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +асбест	1420	62	1,5	2,3
	1420	86	слом	слом
	1420	26	0,6	0,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +ZrO <sub>2</sub>	1420	182	слом	слом
	1420	109	0,45	0,42
	1420	86	0,35	0,50

**Графики**



**Рис. 3**



**Рис. 4. Граф продукционных правил и рекомендации**

### 3. ПРОДУКЦИОННЫЕ ПРАВИЛА

После структуризации (формирования поля знаний и структуры базы знаний) следует стадия формализации знаний (формирование базы знаний на языке представления знаний).

В рассматриваемой ЭС в качестве основной принята стратегия прямого вывода и разбиение на подзадачи с последующим поиском в глубину.

Разбиение на подзадачи (рекурсия) подразумевает выделение фрагментов, решение которых рассматривается как достижение промежуточных целей на пути к конечной цели. Примером является расчет прогиба стержня: сначала определяется от каких основных факторов зависит прогиб (неравномерный прогрев по толщине; неравномерный прогрев по ширине; эксцентричное приложение возникающей осевой нагрузки; уровень осевой загрузки; первоначальная закрученность), это сужает пространство технологических приемов для поиска корректируемых параметров. Если удастся правильно понять сущность задачи и оптимально разбить ее на систему иерархически связанных целей-подцелей, то можно добиться того, что путь к ее решению в пространстве поиска будет минимален [1].

При поиске в глубину в качестве очередной подцели выбирается та, которая соответствует следующему, более детальному уровню описания задачи. Например, если на предыдущем этапе выявлена причина – неравномерное распределение температуры по толщине стержня, то система будет продолжать анализировать более тщательно этот процесс (анализ коэффициентов термического расширения, температуры заливки, скорости охлаждения и т.п.) до тех пор, пока не подтвердит необходимость изменения этих параметров, либо не опровергнет в качестве причины влияние неравномерного распределения температуры по толщине стержня.

Разработанные производственные правила представлены в виде иерархического графа, структурирующего последовательность рассмотрения основных правил (*P*) и рекомендаций (*R*) при анализе и прогнозировании причин, приводящих к искажению внутренней полости отливки охлаждаемой лопатки и возможные рекомендации их снижения и устранения (рис. 4).

Фрагмент производственных правил представлен в таблице.

Производственные правила (фрагмент)			
Обозн.	Имя правила	Содержание правила	
		Условие «Если»	Действие «Тогда»
P	Прогиб	Необходимо узнать значение прогиба	Рассчитать полный прогиб (P) и Рассчитать прогиб от неравномерного прогрева по толщине (P21) и Рассчитать прогиб от неравномерного прогрева по ширине (P22) и Рассчитать прогиб от эксцентричного приложения возникающей осевой нагрузки (P23) и Рассчитать уровень осевой загрузки (P24) и Рассчитать прогиб от величины первоначальной закрученности (P25)
P1	Норм. прогиб	Значение прогиба в пределах допуска	Вывести сообщение «Корректировка технологического процесса не требуется» (R11)
P2	Большой прогиб	Прогиб больше допустимого	Уменьшать прогиб
...			
P23131, P2413	Термич. расшир. стержня	Термич. расшир. стержня больше термич. расшир. оболочки	Подбирать материал стержня с меньшим коэффициентом термического расширения (R231311, R24131) <i>и/или</i> Подбирать материал оболочки с большим коэффициентом термического расширения (R231312, R24132)
P23132	Термич. расшир. оболочки	Термич. расшир. оболочки больше термич. расшир. стержня	Подбирать материал оболочки с меньшим коэффициентом термического расширения (R231321) <i>и/или</i> Подбирать материал стержня с большим коэффициентом термического расширения (R231322)

#### 4. ПРОТОТИП ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ

На основе разработанных продукционных правил был разработан фрагмент прототипа ЭС для оценки ее работоспособности. Для реализации был выбран комплекс Рапана [4], который не требует специальной математической подготовки и предназначена, главным образом, для специалистов, экспертов в конкретной предметной области и инженеров по знаниям, создающих базы знаний ЭС.

В программе имеются внутренние тесты, оценивающие правила. Проверка показала следующие результаты:

- тест достаточности правил (поиск комбинаций входной информации, при которых значение некоторых сущностей остаются неопределенными) – покрыты правилами все комбинации значений.

- тест непротиворечивости (поиск комбинаций входной информации, при которых одновременно срабатывающие правила дают несовместимый результат) – конфликты правил не обнаружены.

- тест связанности (поиск компонентов базы знаний, не вошедших в сеть вывода) – все сущности задействованы.

#### ВЫВОДЫ

Разработана и представлена база знаний ЭС получения качественной отливки лопатки турбины, включающая:

- концептуальную составляющую поля знаний, отражающую понятийную структуру получения отливок охлаждаемых лопаток;

- функциональную составляющую поля знаний, моделирующую рассуждение эксперта, позволяющую устанавливать и анализировать гипотезы возникновения дефектов в литых лопатках;

- иерархическую структуру, состоящую из уравнений детерминированного расчета, гра-

фиков, таблиц и неформализованных зависимостей, составляющих ядро ЭС;

- продукционную модель представления знаний в виде графа и таблицы продукционных правил;

- оценку работоспособности системы продукционных правил путем тестирования достаточности, непротиворечивости, связанности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гаврилова Т. А., Хорошевский В. Ф.** Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер. 2000. 384 с.

2. Управление литейным производством с использованием CALS-технологий / Г. Г. Куликов [и др.]. Уфа: УГАТУ, 2012. 1 электронн. опт. диск (CD-ROM).

3. **Гайнцева Е. С., Горюхин А. С.** Формирование базы знаний при разработке экспертной системы для получения лопаток турбин // Ползуновский альманах. 2011. № 4. С.192–194.

4. Средство быстрой разработки экспертных систем «Рапана» [Электронный ресурс] ([http:// esrapana.narod.ru/rapana.pdf](http://esrapana.narod.ru/rapana.pdf)).

#### ОБ АВТОРАХ

**Павлинич Сергей Петрович**, зав. каф. МиТЛП. Первый заместитель ген. директора – технический директор ОАО УМПО. Д-р техн. наук, проф. Иссл. в обл. технологии получения сложных отливок в авиационной промышленности.

**Горюхин Александр Сергеевич**, доц. той же каф. Дипл. инженер-механик по металлореж. станкам и инструментам (УАИ, 1965). Канд. техн. наук по литейн. пр-ву в авиадвигателестроении (МВТУ им. Баумана, 1979). Иссл. в обл. технологии получения сложных отливок в авиационной промышленности.

**Гайнцева Екатерина Сергеевна**, соиск. каф. АСУ. Дипл. инженер (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. искусственного интеллекта.