



Минобрнауки России

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)



УГНС 09.00.00 «Информатика и вычислительная техника»

Направление подготовки: 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»

Направленность программы: *Автоматизированные системы обработки информации и управления*

Уровень подготовки: *бакалавр*

Форма обучения: *очная*

Факультет *информационных технологий и управления*

Кафедра *систем автоматизированного проектирования и управления*

Выпускная квалификационная работа бакалавра:

«Информационное обеспечение виртуального тренажера для обучения управлению процессом получения твердых сплавов»

Обучающийся	Студент гр. 404 <i>Колесникова Алина Владимировна</i>
Руководитель	Ст. преподаватель <i>Федин Алексей Константинович</i>
Консультант	Доц. <i>Иван Григорьевич Корниенко</i> , Доц., канд. техн. наук, доц. <i>Фищев Валентин Николаевич</i>

Работа выполнена в рамках прикладной НИР «Разработка и апробация модуля образовательной программы повышения квалификации специалистов в области автоматизированной обработки информации и управления производством наноструктурированных керамических материалов и покрытий (в режиме e-learning)» по договору с Национальным фондом подготовки кадров от 09.04.2012 № 03/04/С-2011-физ 2012-36

Санкт-Петербург 2024

Актуальность работы

- твердые сплавы получают из **4 видов материалов** на основе карбидов: вольфрама, титана, тантала, хрома, связанных кобальтовой или никелевой металлической связкой,
- **5 видов печей** получения твердых сплавов: печи для обжига керамики (металлокерамики), вакуумные печи, электрические печи, муфельные печи и шахтные печи,
- количество **марок печей** для спекания твердых сплавов может достигать **нескольких десятков**, так как различные производители предлагают разнообразные модели с уникальными характеристиками и возможностями,
- номенклатура марок твердых сплавов только у одного производителя может доходить до **50 и более**. Если рассматривать большое количество производителей, **количество марок становится практически безграничным** [1],
- **5 основных показателей качества** твердого сплава: плотность ρ [кг/м³], прочность при поперечном изгибе σ_B [МПа], твердость по Роквеллу H_R [ед], остаточная пористость твердого сплава Π [%], L – средний диаметр зерна, м [1-3];

Для такого большого количества марок твердых сплавов и печей необходимо создать **гибкую и перенастраиваемую** на разные типы материалов и марок печей систему.

Обзор аналогов («Внепечная обработка стали», «Газовщик доменной печи», «ТРЕК») подтвердил отсутствие таких систем на рынке, что делает **актуальной разработку виртуального тренажера** для обучения управлению процессом получения твердых сплавов, которая поддерживает **безопасность, эффективность** [2] и **ускоренное развитие профессиональных навыков** персонала в данной области.

1. Универсальные марки твердых сплавов для токарной обработки : сайт. – Москва, 2024 – . – URL: <https://stanko-arena.ru/article/universalnye-marki-tverdykh-splavov-dlya-tokarnoy-obrabotki.html> (дата обращения 20.05.2024).

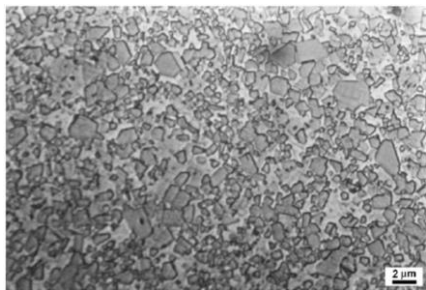
2. Румянцев П. Использование автоматизированных обучающих систем для повышения эффективности обучения / П. Румянцев, В. Чакрян // Теория и практика общественного развития. 2014. №19 – . – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-avtomatizirovannyh-obuchayuschiy-sistem-dlya-povysheniya-effektivnosti-obucheniya> (дата обращения: 20.05.2024).



Характеристика сырья, оборудования, технологических режимов и продукции процесса спекания керамических материалов

Спекание происходит при определенных температурах, когда элементы решетки становятся подвижными и могут переходить между вакансиями, с целью получения **твёрдых сплавов**, которые **обладают сверхвысокой твёрдостью и износостойкостью**. **Требования**, предъявляемые к качеству твердого сплава:

Тип сплава	Марка сплава	Производитель	Состав, % мас.	Предельная пористость, %	Плотность, кг/м ³	Минимально допустимая твердость по Роквеллу, ед.	Минимально допустимая твердость по Виккерсу, ГПа	Предел прочности при изгибе, МПа
Вольфрамо-никелевый сплав	CBN8	ООО «Вириал» (Санкт-Петербург)	WC – 92, Ni – 8	0, 2	14 700	88, 5	12, 5	2 400



Сырье: WC-Ni



Вакуумно-компрессионная печь садочного типа



Полученные твердые сплавы

Основными показателями качества твердого сплава являются:

- плотность ρ [кг/м³];
- прочность при поперечном изгибе σ_B [МПа];
- твердость по Роквеллу H_R [ед];
- остаточная пористость твердого сплава Π [%];
- средний диаметр зерна L , м.



Интеллект-карта модели управления процессом получения твердых сплавов



Цель и задачи

Цель: повышение эффективности практико-ориентированного обучения оператора печи управлению процессом получения твердых сплавов за счет разработки информационного обеспечения виртуального тренажера, позволяющего на основе библиотеки математических моделей для оценки качества твердых сплавов и интерактивной виртуальной 3D модели пульта управления вакуумно-компрессионной печью сформировать навыки выбора управляющих воздействий на процесс спекания, обеспечивающих заданное качество твердых сплавов для различных типов материалов и марок печей (в соответствии со сформированными инструктором сценариями обучения).

Задачи:

1. составить **формализованное описание** процесса получения твердых сплавов как объекта управления и **сформулировать задачу обучения** управлению процессом получения твердых сплавов;
2. разработать **функциональную структуру** виртуального тренажера;
3. создать **базу данных характеристик процесса спекания**;
4. разработать **интерактивную 3D модель пульта** управления вакуумно-компрессионной печью, построить **алгоритм формирования сценариев и протоколов** обучения управлению процессом получения твердых сплавов;
5. разработать **структуру интерфейсов пользователей**: обучаемого (оператора печи), инструктора, специалиста по математическому обеспечению и администратора;
6. Провести **тестирование работы виртуального тренажера** на примере формирования сценариев обучения и формирования протоколов обучения для спекания системы WC–Ni в вакуумно-компрессионной печи PVA Teplo.



Обзор тренажеров для обучения управленческого производственного персонала химико-технологических процессам

Критерий	Тренажер-симулятор «Внепечная обработка стали» [1]	Тренажер-симулятор «Газовщик доменной печи» [2]	Тренажерный комплекс «ТРЕК» [3]
Тестовая проверка знаний	Есть	Отсутствует	Есть
Возможность настройки сценария обучения	Есть	173 сценария	Отсутствует
Формирование протокола обучения	Есть	Отсутствует	Есть
Возможность моделирования нештатных ситуаций	Есть	Есть	Есть
Производитель	Sike (Россия)	Sike (Россия)	«Югра-АСУ» (Россия)

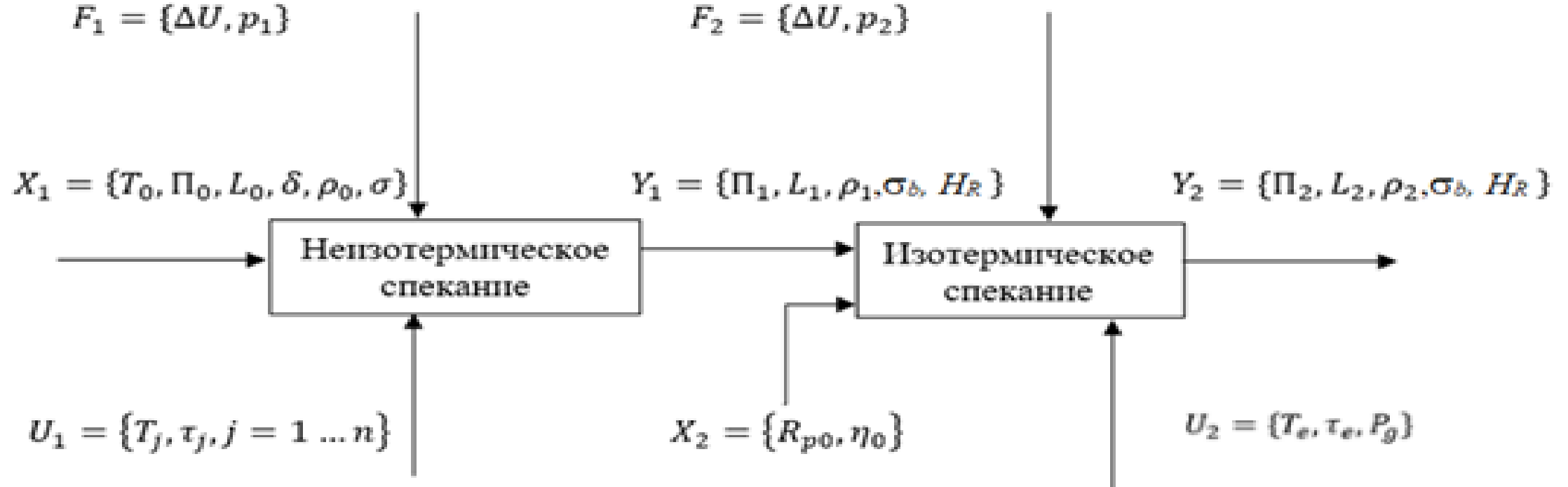
1. Тренажер-симулятор «Внепечная обработка стали» : сайт. – Россия, 2024 – . – URL: <https://sike.ru/portfolio/severstal-trenazher-vos> (дата обращения 29.04.2024).

2. Тренажер-симулятор "Газовщик доменной печи" : сайт. – Россия, 2024 – . – URL: <https://sike.ru/portfolio/metinvest-trenazheri-domennaya-pech> (дата обращения 29.04.2024).

3. Тренажерный комплекс «Трек» : сайт. – Россия, 2024 – . – URL: <http://www.yugra-asu.ru/trek> (дата обращения 30.04.2024).



Формализованное описание процесса получения твердых сплавов как объекта управления, постановка задачи обучения



Для заданных инструктором в сценарии обучения входных параметров процесса спекания X варьированием управляющих воздействий U в регламентных диапазонах $U \in [U^{\min}, U^{\max}]$ по математической модели найти такие их значения, которые обеспечивают требуемое качество твердого сплава:

$$\Pi \leq \Pi^3, \rho \geq \rho^3, \sigma_b \geq \sigma_b^3, H_R \geq H_R^3,$$

где Π^3 – заданная остаточная пористость твердого сплава, %;

ρ^3 – заданная инструктором плотность сплава, кг/м³;

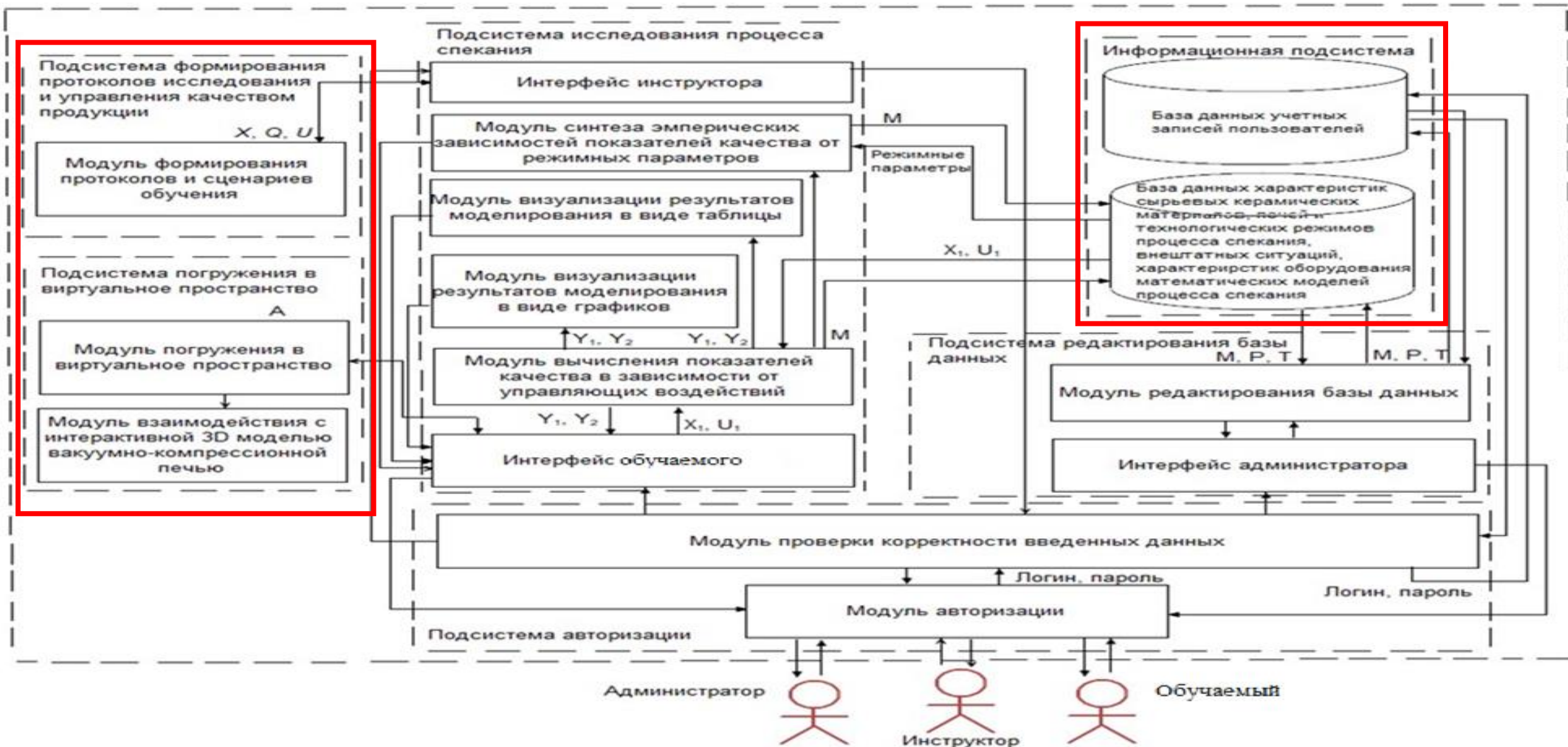
σ_b^3 – заданная инструктором прочность твердого сплава при поперечном изгибе, МПа;

H_R^3 – заданная инструктором твердость сплава (по Роквеллу), ед.

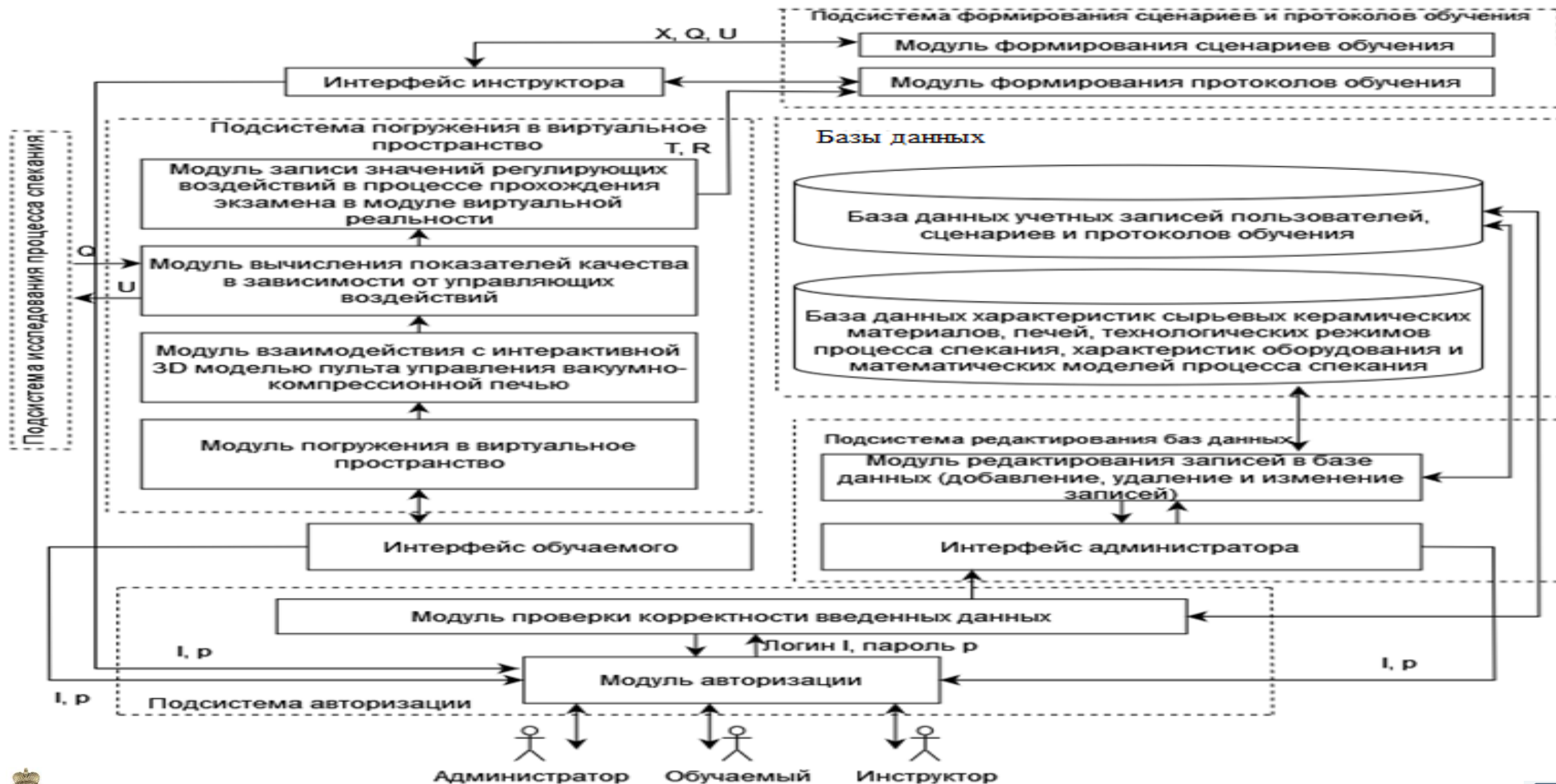
Информационное обеспечение виртуального тренажера для обучения управлению процессом получения твердых сплавов



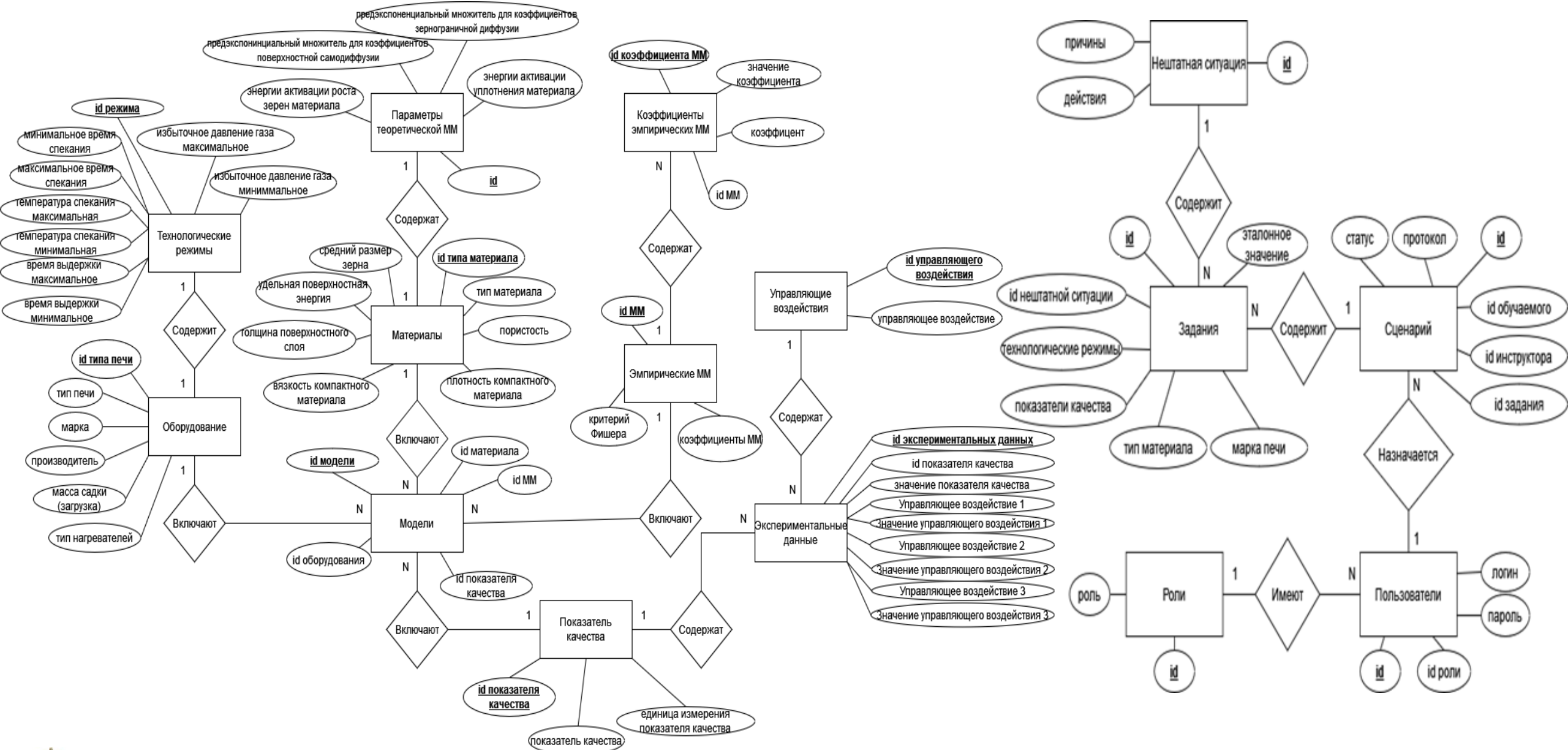
Функциональная структура виртуального тренажера для обучения управлению процессом получения твердых сплавов



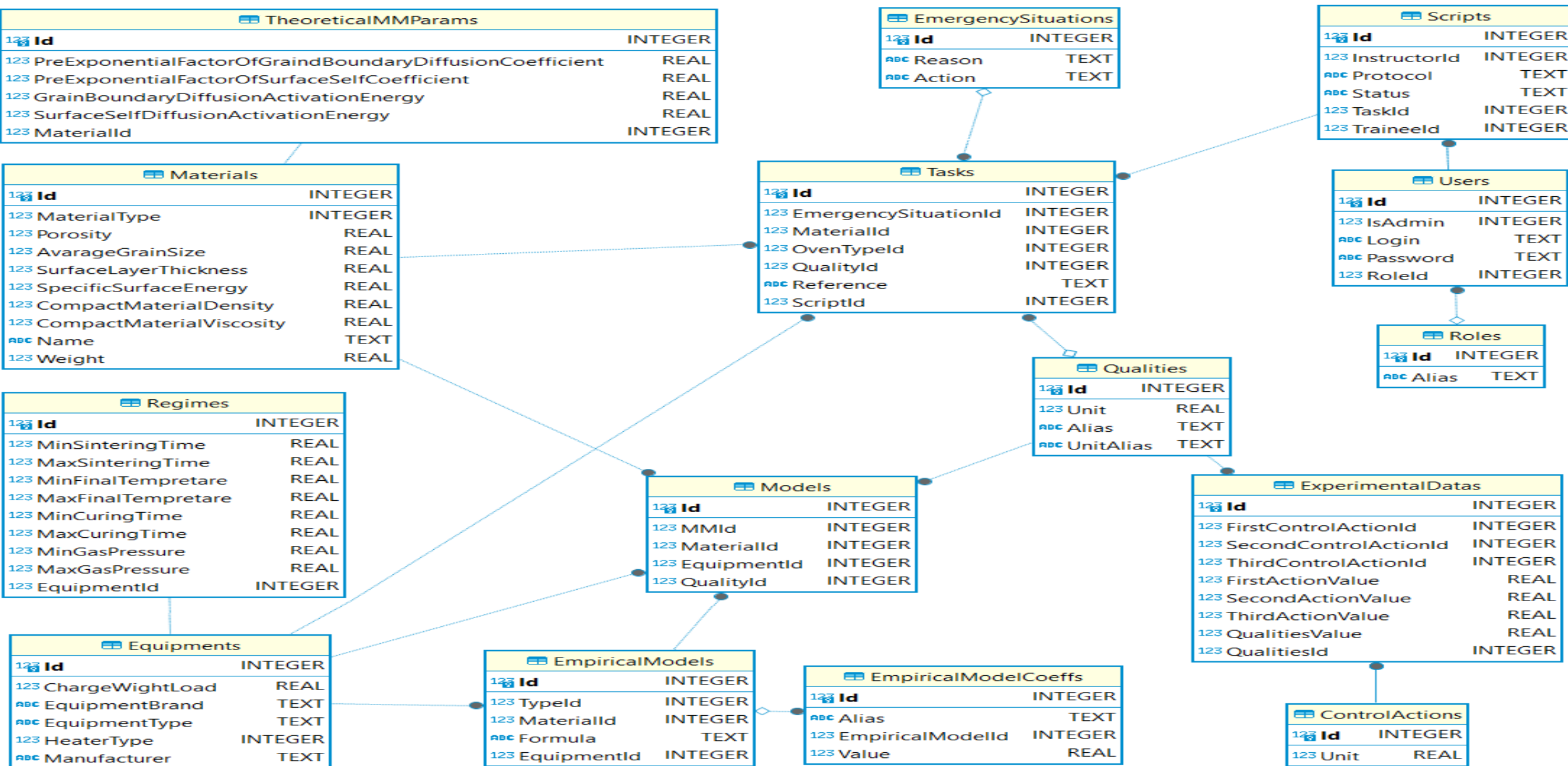
Функциональная структура информационной подсистемы виртуального тренажера для обучения управлению процессом получения твердых сплавов



Концептуальная модель базы данных характеристик процесса спекания



Даталогическая модель базы данных характеристик процесса спекания



Структура библиотеки математических моделей для оценки показателей качества твердых сплавов

Название показателя качества	Тип материала	Марка печи	Уравнение модели [1]	Диапазоны режимных параметров
Плотность ρ	Порошковая прессовка, состоящая из карбида вольфрама и никеля	Вакуумно-компрессионная печь PVA Tepla	$\rho = a_0 + a_1 \cdot P_g + a_2 \cdot T + a_3 \cdot P_g \cdot T + a_4 \cdot T^2 + a_5 \cdot P_g \cdot T^2$	$P_g^{\min} = 4 \text{ МПа}$ $P_g^{\max} = 8 \text{ МПа}$ $T^{\min} = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ $T^{\max} = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$
Прочность при поперечном изгибе σ_b	Порошковая прессовка, состоящая из карбида вольфрама и никеля	Вакуумно-компрессионная печь PVA Tepla	$\sigma_b = b_0 + b_1 P_g + b_2 T + b_3 P_g T + b_4 P_g^2 + b_5 T^2 + b_6 \cdot P_g^2 T + b_7 \cdot P_g \cdot T^2 + b_8 \cdot P_g^2 T^2$	$P_g^{\min} = 4 \text{ МПа}$ $P_g^{\max} = 8 \text{ МПа}$ $T^{\min} = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ $T^{\max} = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$
Остаточная пористость Π	Порошковая прессовка, состоящая из карбида вольфрама и никеля	Вакуумно-компрессионная печь PVA Tepla	$\Pi = c_0 + c_1 \cdot T + c_2 \cdot \tau + c_3 \cdot T \cdot \tau + c_4 \cdot T^2 + c_5 \cdot \tau^2 + c_6 \cdot T^2 \cdot \tau + c_7 \cdot T \cdot \tau^2 + c_8 \cdot T^2 \cdot \tau^2$	$T^{\min} = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ $T^{\max} = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $\tau^{\min} = 1800 \text{ с}$ $\tau^{\max} = 3600 \text{ с}$
Твердость H_R	Порошковая прессовка, состоящая из карбида вольфрама и никеля	Вакуумно-компрессионная печь PVA Tepla	$H_R = d_0 + d_1 \cdot \tau + d_2 \cdot T + d_3 \cdot T \cdot \tau + d_4 \cdot \tau^2 + d_5 \cdot T^2 + d_6 \cdot \tau^2 \cdot T + d_7 \cdot \tau \cdot T^2 + d_8 \cdot T^2 \cdot \tau^2$	$\tau^{\min} = 3000 \text{ с}$ $\tau^{\max} = 4200 \text{ с}$ $T^{\min} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ $T^{\max} = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$

1. Компьютерные технологии моделирования процессов получения высокотемпературных наноструктурированных материалов : учебное пособие / Т. Б. Чистякова, А. Н. Полосин, И. В. Новожилова, Л. В. Гольцева ; Минобрнауки России, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), кафедра систем автоматизированного проектирования и управления. – Санкт-Петербург : СПбГТИ(ТУ), 2013. – 223 с.

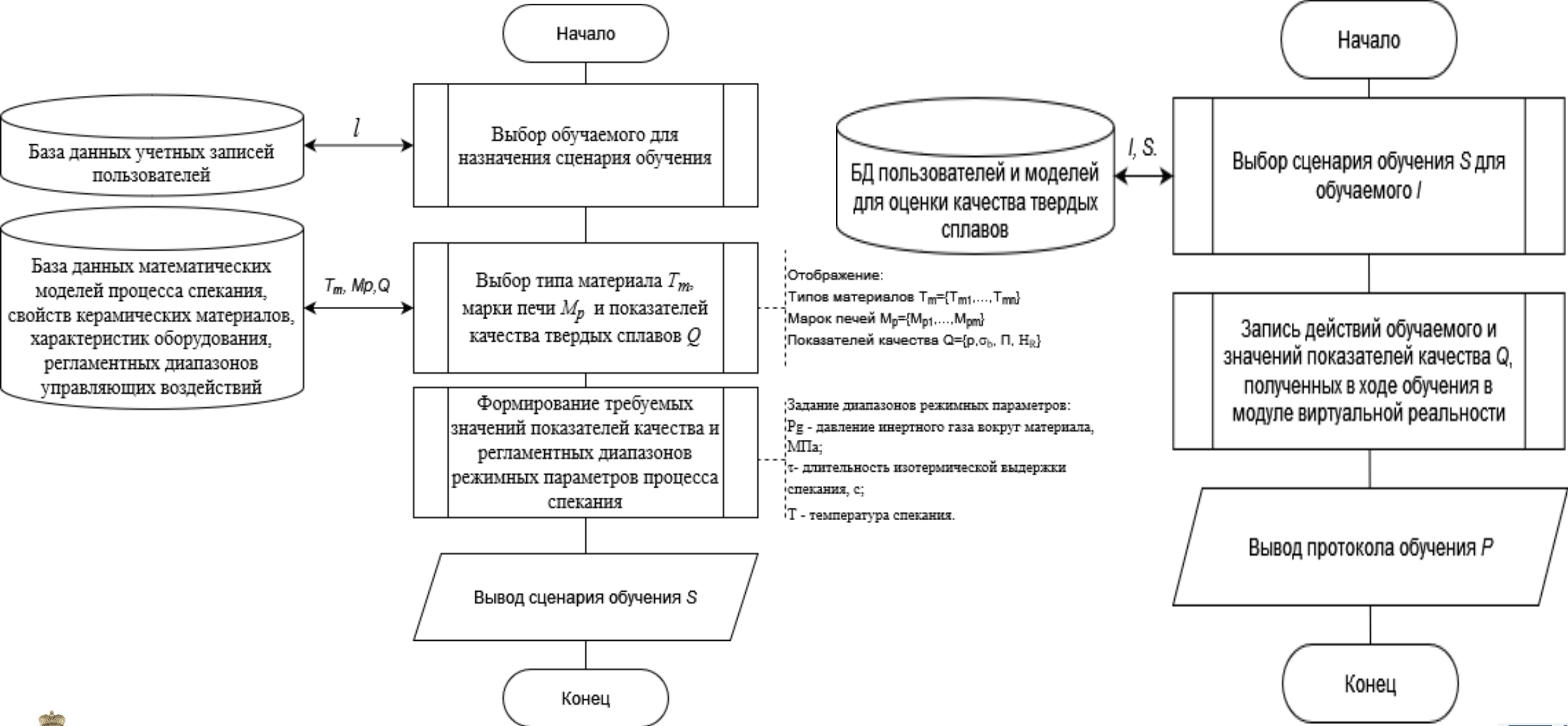


Программное обеспечение для создания базы данных

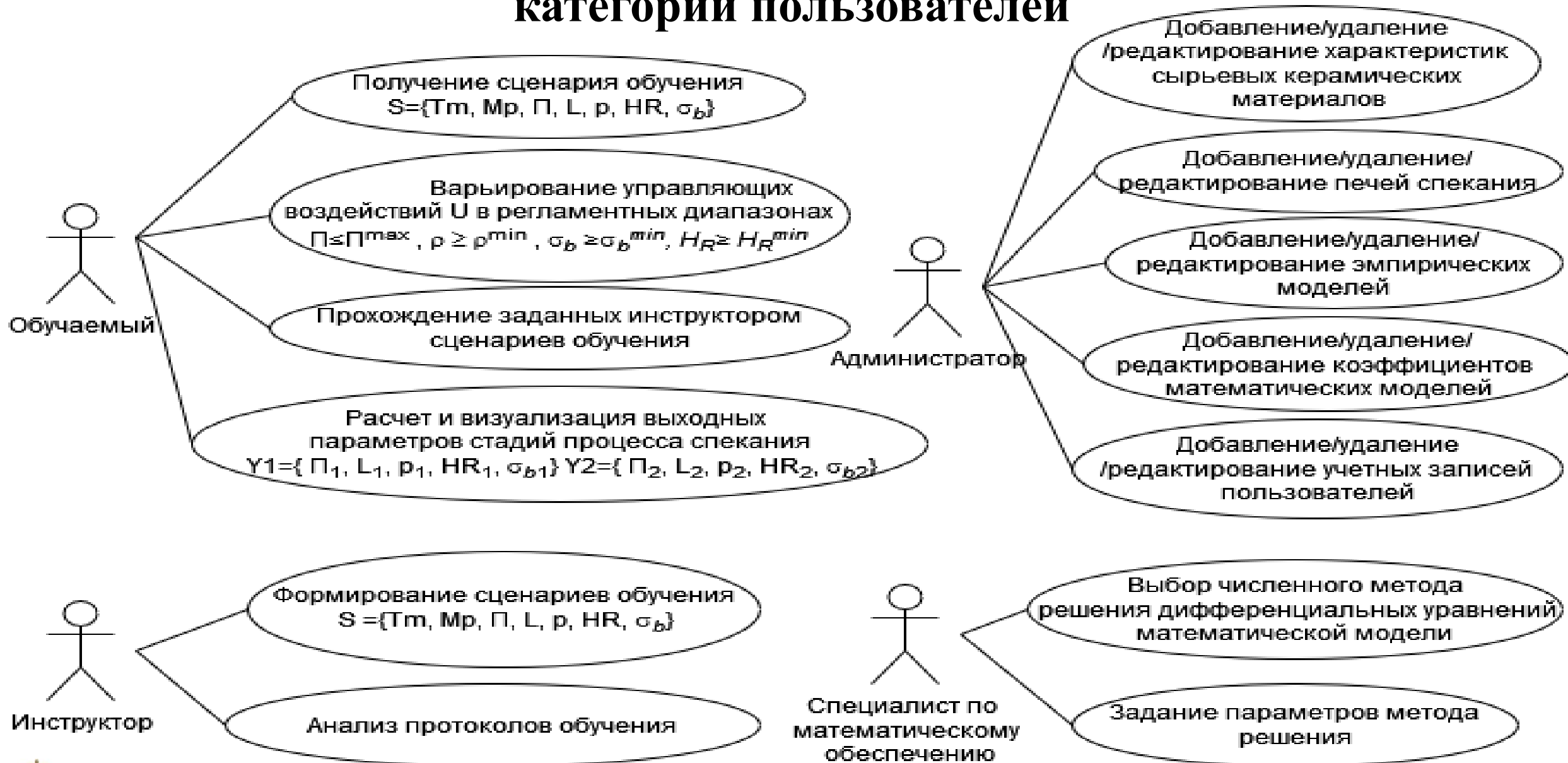
Критерий	SQLite	Microsoft Access	MySQL
Максимально возможное количество полей в таблице	Ограничен размером базы данных	255	4096
Бесплатное распространение	Да	Входит в пакет Microsoft Office 365	Да
Кроссплатформенность	Да	Да	Да
Язык запросов	SQL	SQL	SQL
Максимальный объем БД	256 Тиб (2^{40} байт)	2 ГБ	Ограничен объемом ВЗУ
Встраиваемая СУБД	Да	Да	Нет



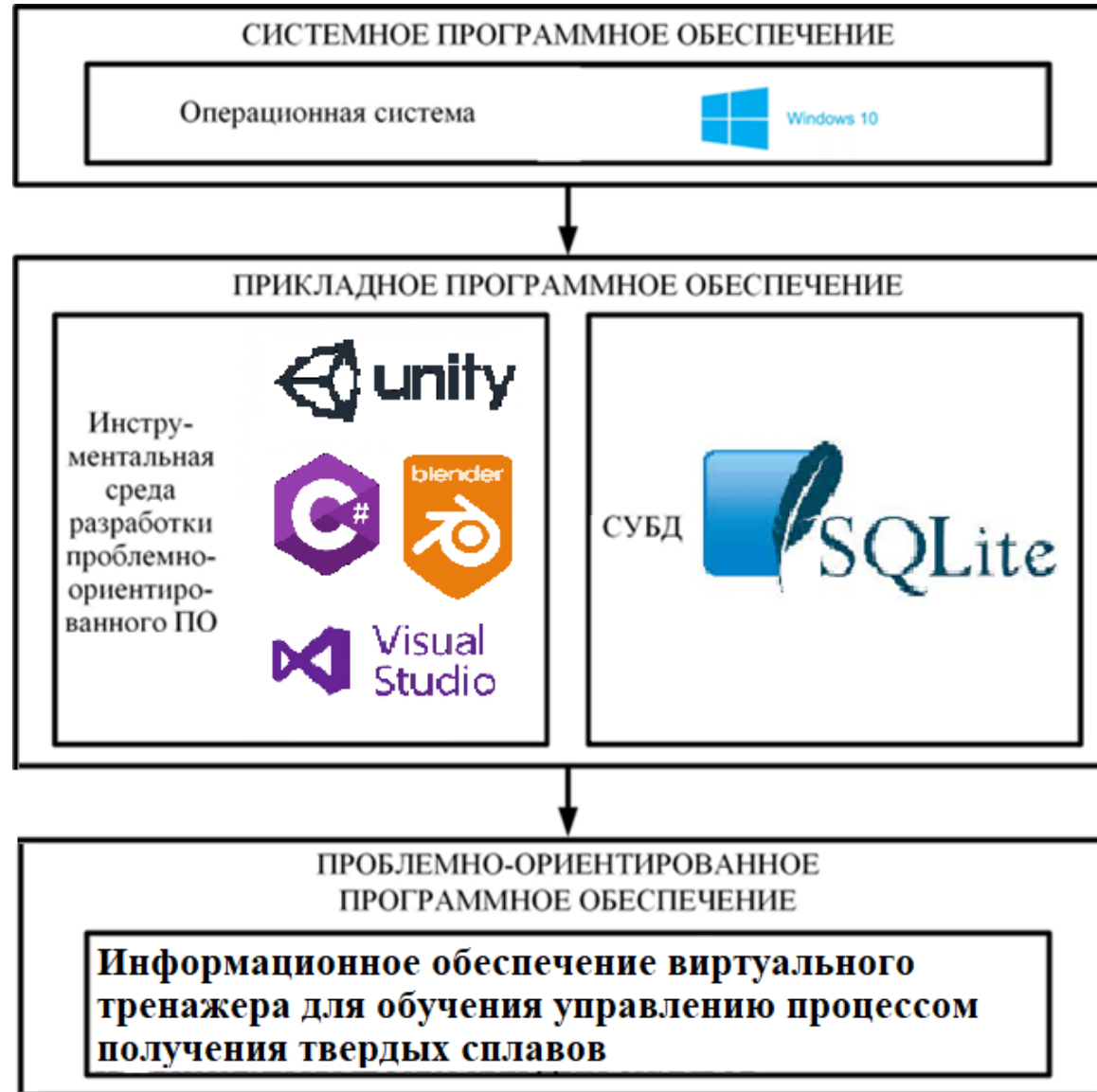
Блок-схема алгоритмов формирования сценариев и протоколов обучения управлению процессом получения твердых сплавов



UML-диаграммы вариантов использования для различных категорий пользователей



Структура программного комплекса



Примеры интерфейсов с результатами тестирования виртуального тренажера

Тип материала

Карбид вольфрам-кобальт

Марка печи

PVA-TePla GmbH, Германия

Тип математической модели

Эмпирические модели

Обучаемый

User

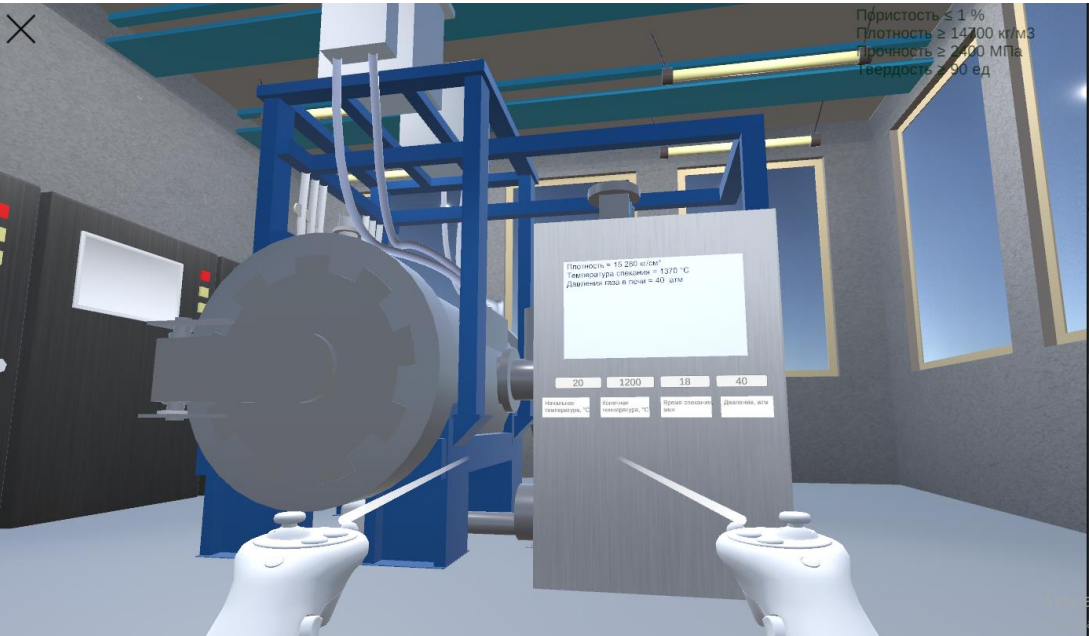
Обучаемому необходимо для заданных входных параметров процесса спекания X варьированием режимных параметров U в регламентных диапазонах U_с[U_{min}, U_{max}] по математической модели найти такие их значения, которые обеспечивают требуемое качество твердого сплава:

$P \leq 1$, $\rho \geq 14700$, $\sigma_b \geq 2400$, $HR \geq 90$, $L \leq 1$

где P – остаточная пористость твердого сплава, %;
ρ – плотность сплава, кг/м3;
σ_b –прочность твердого сплава при поперечном изгибе, МПа;
HR – твердость сплава (по Роквеллу), ед.;
L – средний размер зерна, мкм.

Сгенерировать протокол обучения

Создать сценарий



Пользователь	User			
Прошел обучение?	Да			
Исходные данные:				
Материал	Карбид вольфрам-кобальт			
Печь	PVA-TePla GmbH, Германия			
Начальная температура, °C	18.06.2024 18:08:43	20		
Конечная температура, °C	18.06.2024 18:08:43	1200		
Время спекания, мин	18.06.2024 18:08:43	18		
Давление, атм	18.06.2024 18:08:43	40		
Заданные значения показателей качества твердых сплавов:				
Пористость ≤ 1 %				
Плотность ≥ 14700 кг/м3				
Прочность ≥ 2400 МПа				
Твердость ≥ 90 ед				
Действия 18.06.2024		Плотность твердого сплава, кг/см3	Прочность твердого сплава при поперечном изгибе, МПа	Остаточная пористость, %
18:31:22 Конечная температура, °C 1300		14882	2818	5,1
18:31:43 Время спекания, мин 30		14882	2818	6,3
18:32:05 Давление газа, атм 75		15051	4442	6,3
18:32:19 Время спекания, мин 40		15051	4442	6,9
18:32:33 Время спекания, мин 50		15051	4442	7,1
18:32:45 Конечная температура, °C 1400		15576	5845	7,4
18:32:54 Время спекания, мин 60		15576	5845	7,2
18:33:08 Время спекания, мин 70		15576	5845	6,4
18:34:31 Время спекания, мин 80		15576	5845	5,1
18:34:40 Время спекания, мин 90		15576	5845	3,2
18:35:07 Конечная температура, °C 1400		15576	5845	3,2
18:35:28 Время спекания, мин 100		15576	5845	0,9
Результаты моделирования 18.06.2024 18:35:28				
Плотность твердого сплава, кг/см³		15576		
Прочность твердого сплава при поперечном изгибе, МПа		5845		
Остаточная пористость, %		0,9		
Твердость сплава, ед		94,2		



Результаты тестирования виртуального тренажера

График изменения плотности

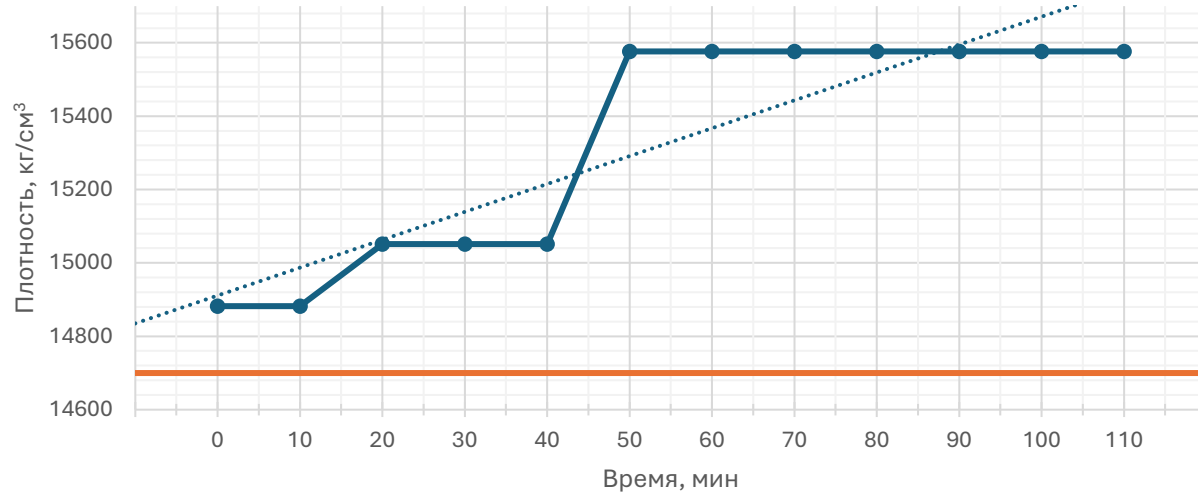


График изменения прочности

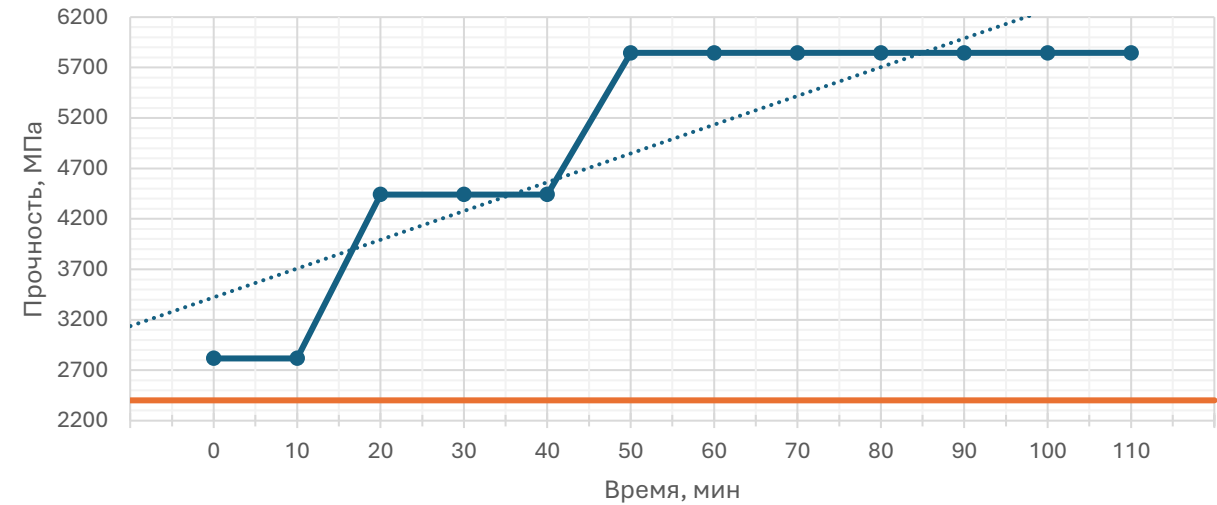


График изменения твердости

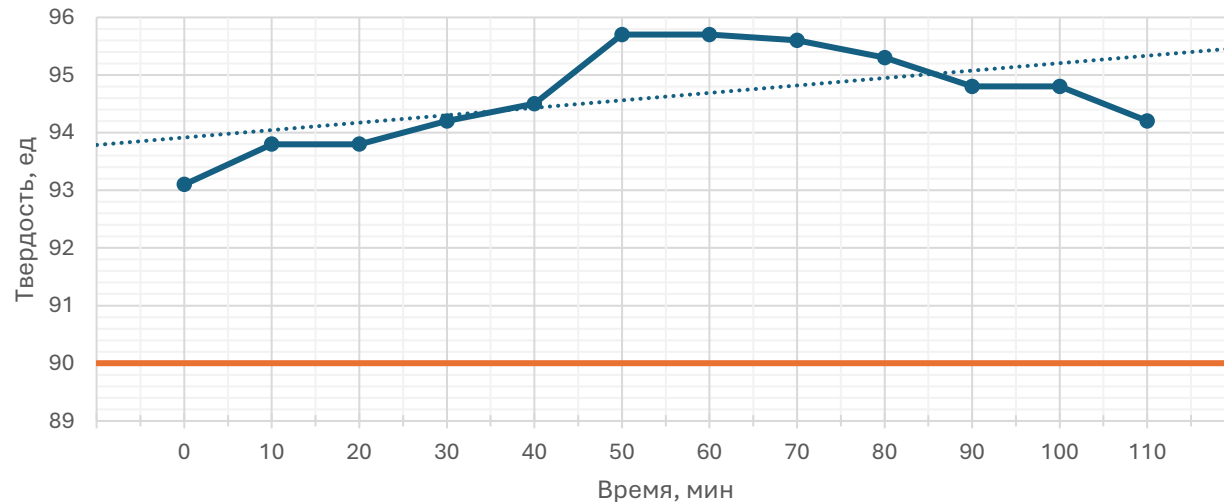
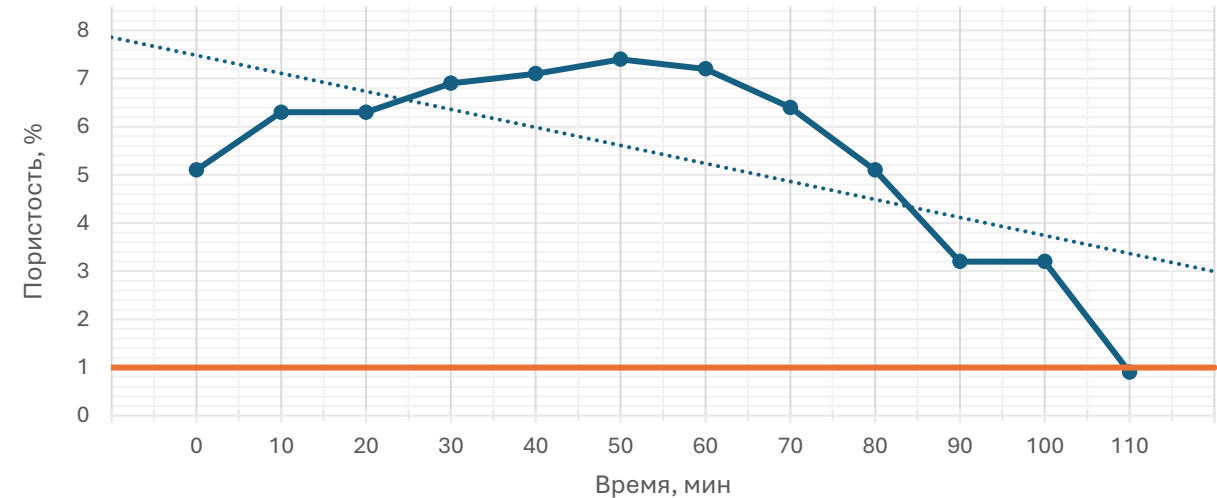


График изменения пористости



Характеристика программного и аппаратного обеспечений

Показатель	Значение
Среда разработки	MS Visual Studio 2022
Технология программирования	ООП
Язык программирования	C#
Количество входных переменных	3
Количество выходных переменных	4
Количество методов	38
СУБД	SQLite
Модель описания данных	Реляционная
Количество таблиц в базе данных	15
Типы данных в базе данных	INT, TEXT, NUMERIC
Типы отношений между таблицами в базе данных	Один-ко-многим, один-к-одному
Объем базы данных, КБ	232
Размер исполняемого файла, МБ	256

Показатель	Значение
Тип ЭВМ	Персональный компьютер
Тактовая частота процессора, ГГц	Intel Core i7, v = 3,3
Объем оперативной памяти, МБ	990
Объем внешней памяти, МБ	622 (Включает размер исполняемого файла и размер подключенных библиотек)
Состав и характеристика периферийных устройств	Монитор PnP (видеоадаптер Nvidia RTX 3060, 24", 1920×1080 пикселей); клавиатура USB; мышь.
Операционная система	Windows версии не ниже 10
Прикладное программное обеспечение, необходимое для функционирования программного комплекса	.NET версии не ниже 6.0.
Дополнительная гарнитура	Гарнитура виртуальной реальности Oculus Quest 2 Контроллер Oculus Touch - 2 шт.



Выводы

1. Составлено **формализованное описание** процесса получения твердых сплавов как объекта управления и **сформулирована задача обучения** управлению процессом получения твердых сплавов;
2. разработана **функциональная структура** виртуального тренажера, состоящая из подсистемы формирования сценариев и протоколов обучения, подсистемы погружения в виртуальное пространство, информационной подсистемы и подсистемы исследования процесса спекания;
3. создано **информационное обеспечение** виртуального тренажера, включающего базу данных математических моделей для оценки качества твердых сплавов и базу данных учетных записей пользователей с возможностью создания сценариев и протоколов обучения;
4. разработана **интерактивная 3D модель** пульта управления вакуумно-компрессионной печью, которая позволяет варьировать режимные параметры процесса спекания, создан **алгоритм формирования сценариев и протоколов** обучения управлению процессом получения твердых сплавов;
5. разработана **структура интерфейсов пользователей**: обучаемого (оператора печи), позволяющего вводить варьируемые параметры в виртуальной среде обучения, интерфейса инструктора, позволяющего формировать сценарий и протокол обучения для обучаемых и администратора, позволяющего редактировать базу данных математических моделей и учетных записей пользователей;
6. проведено **тестирование работы виртуального тренажера** на примере формирования сценариев обучения и формирования протоколов обучения для спекания системы WC–Ni в вакуумно-компрессионной печи PVA Terpla, подтвердившее работоспособность программного комплекса для данного класса объектов.



Публикации по теме

1. Колесникова, А.В. Архитектура виртуального тренажера для обучения управлению процессом получения твердых сплавов / А. В. Колесникова, Д. Ю. Шишко, А. К. Федин // Сборник тезисов научной конференции «Традиции и инновации» СПбГТИ(ТУ), 20 – 23 ноября 2023 г. – Санкт-Петербург. : СПбГТИ(ТУ), 2023. – С. 296-297. – ISBN 978-5-905240-93-5.



Условные обозначения

X_1 – вектор входных параметров 1-й стадии процесса спекания;

T_0 – начальная температура материала, °C;

P_0 – пористость материала до спекания, %;

L_0 – начальный средний диаметр зерна, м;

δ – толщина поверхностного слоя зерна, м;

ρ_0 – плотность компактного (беспористого) материала, кг/м³;

σ – удельная поверхностная энергия, Дж/м²;

F_1 – вектор возмущающих воздействий на 1 стадии процесса спекания;

p_1 – содержание примесей в прессовке;

U_1 – вектор управляющих воздействий на 1 стадии процесса спекания;

T_j – температура в конце j-го этапа неізотермического спекания, °C;

τ_j – длительность j-го этапа неізотермического спекания, с;

Y_1 – вектор выходных параметров 1 стадии процесса спекания;

Π_1 – остаточная пористость на 1-й стадии процесса, %;

L_1 – средний диаметр зерна на 1-й стадии процесса, м;

ρ_1 – плотность материала на 1-й стадии процесса синтеза, кг/м³;

σ_b – прочность твердого сплава при поперечном изгибе, МПа;

H_R – твердость сплава (по Роквеллу), ед.

X_2 – вектор входных параметров 2 стадии процесса спекания;

R_{p0} – начальный средний радиус поры, м;

η_0 – начальная вязкость материала, Па·с;

F_2 – вектор возмущающих воздействий на 2 стадии процесса спекания;

ΔU – перепады напряжения в электрической цепи, В;

p_2 – содержание примесей в инертном газе, %;

U_2 – вектор управляющих воздействий на 2 стадии процесса спекания;

T_e – температура изотермической выдержки на стадии жидкофазного спекания, °C;

P_g – давление инертного газа вокруг материала, Па;

Y_2 – вектор выходных параметров 2 стадии процесса спекания;

Π_2 – остаточная пористость на 2-й стадии процесса, %;

L_2 – средний размер зерна на 2-й стадии процесса, м;

P_2 – плотность материала на 2-й стадии процесса, кг/м³;

T_m – тип материала;

M_p – марка печи;

Q – показатели качества;

СУБД – система управления базами данных;

ММ – математическая модель;

ЭВМ – электронная вычислительная машина;

БД – база данных;

UML – унифицированный язык моделирования;

VR – Виртуальная реальность.



Спасибо за внимание!

Студентка 404 группы

Колесникова Алина Владимировна

akolesnikova403@mso365.technolog.edu.ru

