

РЕФЕРАТ

Работа над темой выполнялась в соответствии с заданием на выпускную квалификационную работу (ВКР), утвержденным приказом от 22.03.2024 № 448-02-18.

Отчет к ВКР содержит 49 страниц, 29 рисунков, 14 таблиц, 34 источника, 3 приложения.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОБУЧАЮЩАЯ СИСТЕМА, ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС, ОБУЧЕНИЕ, СПЕКАНИЕ, ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, ПОРИСТОСТЬ, ПЛОТНОСТЬ, СРЕДНИЙ ДИАМЕТР ЗЕРНА, ПЕЧЬ, ТВЕРДЫЙ СПЛАВ

В отчете проведен анализ характеристик сырья, процесса спекания, печей для спекания, показателей качества твердых сплавов, обзор компьютерных, в том числе виртуальных тренажеров для обучения управленческого производственного персонала химико-технологических процессов, а также обзор и обоснование выбора инструментальных средств разработки математического обеспечения виртуального тренажера. Основная часть отчета содержит технологию разработки программного комплекса, включающую формализованное описание, задачу обучения управлению процессом спекания в производстве твердых сплавов, функциональную структуру виртуального тренажера, информационное обеспечение, разработку интерактивной 3D модели пульта управления вакуумно-компрессионной печью, алгоритмы формирования сценариев и протоколов обучения, структуру пользовательских интерфейсов и результаты тестирования. В заключении сделаны выводы и предложения по работе.

Для обеспечения работоспособности комплекса создан программный документ «Описание применения».

СОДЕРЖАНИЕ

Перечень сокращений и обозначений	3
Введение	4
1 Аналитический обзор	9
1.1 Анализ характеристик сырья, оборудования, технологических режимов и показателей качества продукции процесса спекания керамических материалов	9
1.2 Обзор компьютерных, в том числе виртуальных тренажеров для обучения управленческого производственного персонала химико-технологических процессов	16
1.3 Обзор и обоснование выбора инструментальных средств разработки информационного обеспечения виртуального тренажера для обучения управлению процессом получения твердых сплавов	22
2 Цель и задачи работы	25
3 Основная часть. Технология разработки виртуального тренажера	26
3.1 Формализованное описание процесса получения твердых сплавов как объекта управления	26
3.2 Постановка задачи обучения управлению процессом получения твердых сплавов	27
3.3 Функциональная структура виртуального тренажера	28
3.4 Информационное обеспечение виртуального тренажера	29
3.5 Разработка интерактивной 3D модели пульта управления вакуумно-компрессионной печью	34
3.6 Алгоритм формирования сценариев обучения управлению процессом получения твердых сплавов	35
3.7 Алгоритм формирования протоколов обучения управлению процессом получения твердых сплавов	36
3.8 Структура интерфейса пользователей виртуального тренажера	37
3.9 Тестирование работы виртуального тренажера	38
Выводы по работе	44
Список использованных источников	46
ПРИЛОЖЕНИЕ А Характеристика программного и аппаратного обеспечения .	ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Защита информации	ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.
ПРИЛОЖЕНИЕ В Описание применения ...	ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете к ВКР применяются следующие сокращения и обозначения:

СУБД – система управления базами данных

БД – база данных

ММ – математическая модель

UML – унифицированный язык моделирования (англ. Unified Modeling Language)

GUI – Графический интерфейс пользователя (от англ. Graphical User Interface)

IDE – Интегрированная среда разработки (англ. Integrated Development Environment)

ПО – Программное обеспечение

VR – Виртуальная реальность (англ. virtual reality, VR, искусственная действительность)

ВВЕДЕНИЕ

Твердые сплавы играют важную роль во многих отраслях промышленности, включая металлургию, авиацию, энергетику и машиностроение. По прогнозам, к 2030 году рыночная стоимость керамики во всем мире вырастет почти до 360 миллиардов долларов США, а общий объем мирового производства керамической плитки в 2022 году составил более 16,7 миллиарда квадратных метров [1], что говорит об актуальности темы и ее важности на рынке.

В основном твердые сплавы получаются из 4 видов материалов на основе карбидов: вольфрама, титана, тантала, хрома, связанных кобальтовой или никелевой металлической связкой, при различном содержании кобальта или никеля. Также обычно используется 5 видов печей получения твердых сплавов: печи для обжига керамики (металлокерамики), вакуумные печи, электрические печи, муфельные печи и шахтные печи.

Твердые сплавы характеризуются уникальными свойствами, такими как высокая твердость, прочность при изгибе, а также способность сохранять свои качества при высоких температурах. Однако, чтобы эффективно использовать эти материалы, повысить их качество и эффективность применения, необходимо понимать влияние различных параметров процесса спекания на их качество.

Разработка виртуального тренажера для обучения управлению процессом получения твердых сплавов актуальна по следующим причинам:

внедрение тренажера помогает снизить высокие затраты на сырье, оборудование и электроэнергию, так как понимание взаимосвязи между режимными параметрами процесса спекания и качеством получаемых сплавов позволяет повысить скорость обучения персонала;

виртуальный тренажер позволяет обучать персонал без риска для их здоровья и без необходимости использования дорогостоящего оборудования;

разработка навыков и профессиональное обучение: тренажер позволяет работникам, студентам и новичкам в отрасли совершенствовать свои навыки и получать необходимое обучение в сфере управления процессом получения твердых сплавов. Виртуальное обучение позволяет повторять и экспериментировать с различными сценариями и настройками, что существенно повышает эффективность обучения;

Таким образом, разработка виртуального тренажера для обучения управлению процессом получения твердых сплавов поддерживает безопасность, эффективность и ускоренное развитие профессиональных навыков персонала в данной области, что делает ее актуальной и полезной задачей.

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

1.1 Анализ характеристик сырья, оборудования, технологических режимов и показателей качества продукции процесса спекания керамических материалов

Спекание – это уплотнение (усадка) поликристаллических материалов при термообработке.

Процессы, протекающие при спекании и приводящие к повышению плотности материала:

- уменьшение объема пор;
- увеличение площади контакта между зернами;
- рост зерен, изменение их формы и укладки.

Схема процесса спекания в производстве тонкодисперсных твердых сплавов представлена на рисунке 1.

Спеканию подлежат гетерогенные спрессованные порошки (порошковые прессовки), представляющие собой пористые тела, состоящие из контактирующих друг с другом частиц и пор между ними (межзеренная пористость) и характеризующиеся определенным составом компонентов, дисперсностью (средними размерами частиц компонентов) и пористостью.

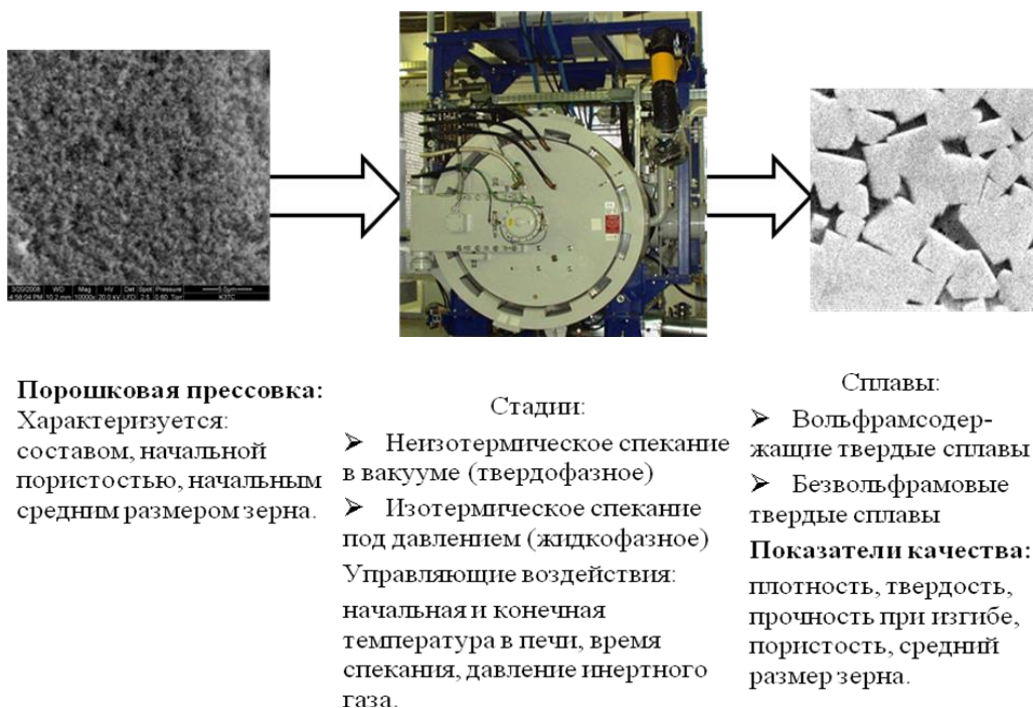


Рисунок 1– Схема процесса спекания

Отдельные дисперсные частицы (зерна) материала связаны в прессовке прослойками технологической связки. Так, прессовка для получения

вольфрамоникелевых твердых сплавов состоит из зерен карбида вольфрама (WC) со средним размером 1 мкм и частиц никеля (Ni) размером 0,1 мкм, как показано на рисунке 2 (пористость составляет около 40%) [2].

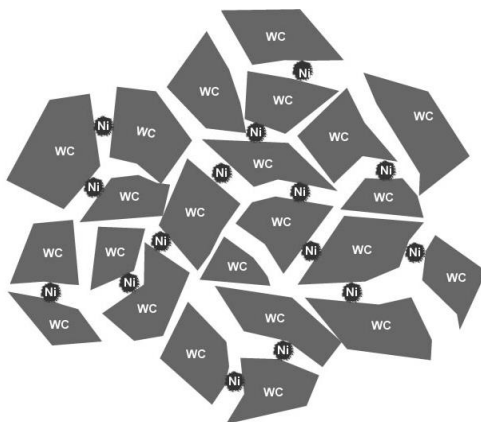


Рисунок 2 – Двухкомпонентная прессовка «карбид вольфрама – никель» после отгонки органического пластификатора

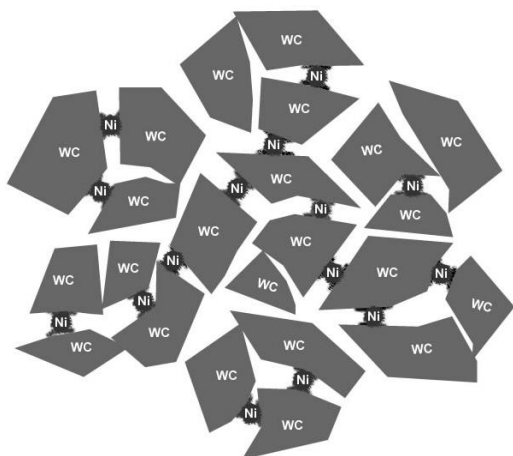
Спекание разделяют на три стадии:

- 1) подъем температуры – нагрев (*неизотермическое спекание*);
- 2) выдержка при постоянной температуре (*изотермическая выдержка, изотермическое спекание*);
- 3) снижение температуры – *охлаждение*.

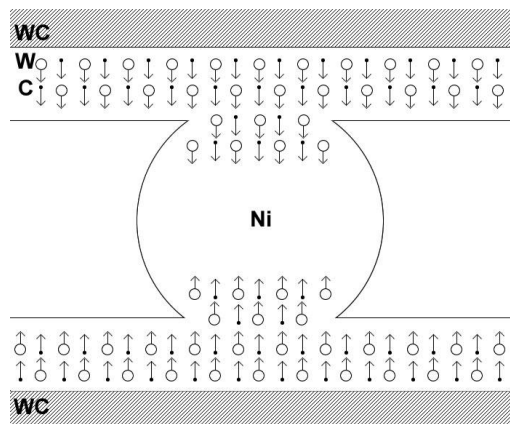
Спекание происходит при определенных температурах, когда элементы решетки становятся подвижными и могут переходить между вакансиями. Тепловое движение позволяет атомам или ионам перескочить на соседнюю вакантную позицию, создавая новые вакансии. Это способствует передвижению элементов решетки.

При достижении определенной температуры происходит сглаживание поверхности частиц благодаря поверхностной диффузии. В случае спекания порошков карбида вольфрама и никеля наблюдается перегруппировка и подстройка зерен карбида вольфрама, распространение никелевой фазы по поверхности карбидных зерен и диффузия атомов вольфрама и углерода в никелевые частицы, как показано на рисунке 3. При этом размер пор не меняется, что указывает на отсутствие роста карбидных зерен.

Механизм твердофазного растворения карбидной фазы в никелевой начинается с распространения никелевой фазы по поверхности карбидных зерен.



Начало «расползания» никелевой фазы по поверхности карбидных зерен



Механизм твердофазного растворения карбидной фазы в никелевой

Рисунок 3 – Перегруппировка зерен карбида вольфрама, начало «расползания» никелевой фазы по поверхности карбидных зерен и осаждения карбидной фазы через никелевую (температура 1152–1520 K)

В местах контакта частицы соединяются, образуя узкие перешейки, как показано на рисунке 4.

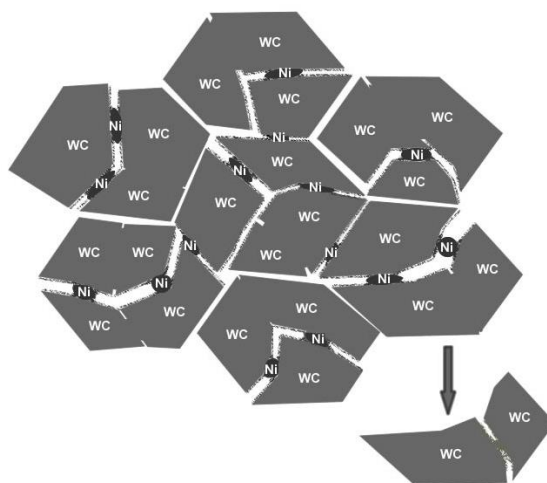


Рисунок 4 – Покрытие поверхности карбидных зерен атомами никеля (толщина слоя никеля 2–4 нм), формирование и рост контактных перешейков между карбидными зёрнами (температура в печи 1520–1593 K)

По мере утолщения перемычек имеющиеся в теле поры смыкаются, образуя меньшее количество закрытых более крупных пор.

Усадка вольфрамоникелевого материала вызвана срастанием сначала мелких, затем более крупных карбидных зерен и быстрым твердофазным растворением карбидной фазы в никелевой. Эти процессы приводят к образованию карбидного каркаса и изоляции пор (рисунок 5).

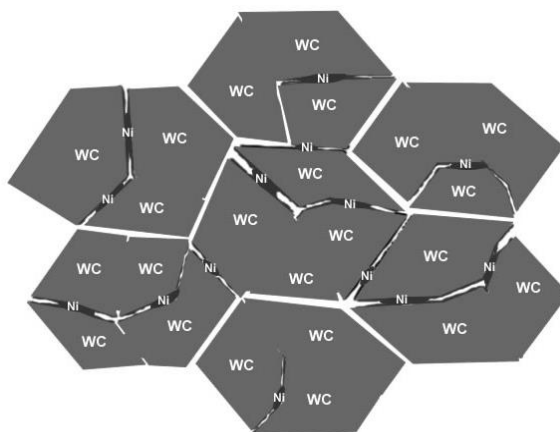


Рисунок 5 – Срастание карбидных зерен, формирование карбидного каркаса и частичная изоляция пор (температура в печи 1520–1593 К)

Дальнейшее уменьшение размера закрытых пор связано с диффузией вещества к поверхности пор. Заращение пор происходит при диффузии вакансий к границе. Это может происходить при спекании в вакууме или среде водорода.

При дальнейшем нагревании частицы связующего металла расплавляются, как показано на рисунке 6. В системе WC–Ni жидкая никелевая фаза возникает при температуре около 1593 К. Изменяется механизм спекания, и процесс протекает по жидкофазному механизму. Жидкая фаза смачивает твердые частицы и заполняет все поры. Бриджи между частицами разрушаются, и под влиянием сил поверхностного натяжения частицы скользят друг относительно друга, образуя плотную упаковку.

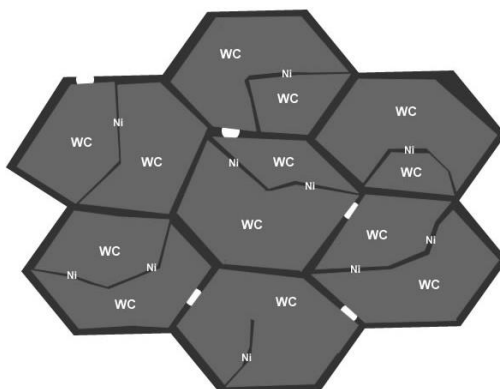


Рисунок 6 – Плавление частиц никеля, смачивание карбидных зерен, проникновение расплава в поры, стягивание карбидных зерен (температура в печи 1593–1723 К)

Затем происходит растворение твердой фазы жидкой в местах их контакта, сближение твердых частиц за счет поверхностного натяжения, а после насыщения расплава начинается его кристаллизация. Твердая фаза выделяется

преимущественно на поверхности нерастворенных зерен и сопровождается ростом их размеров по механизму Оствальда.

Для предотвращения незакономерного роста зерен материала спекание на стадии выдержки осуществляется под давлением в среде инертного газа, как показано на рисунке 7.

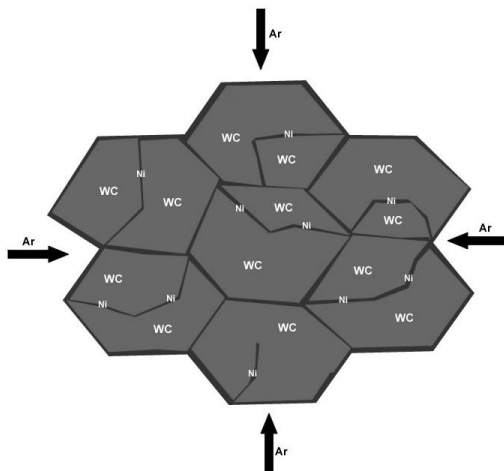


Рисунок 7 – Утонение прослоек никелевой фазы вследствие ее пластического течения и заполнения оставшихся пор, вызванного сжимающим действием газа вокруг материала (температура 1723 К)

При спекании из прессовки образуется монолитное плотное поликристаллическое тело (твердый сплав) с остаточной пористостью менее 0,2%, имеющее определенную механическую прочность, твердость, цвет. Обычно полноту спекания определяют по объему открытых, то есть сообщающихся с поверхностью, пор. Чем меньше таких пор осталось в материале, тем лучше он спекся.

Оборудование, используемое в процессе спекания керамики, имеет несколько основных компонентов:

- Печь: печь является ключевым элементом оборудования для процесса спекания. Она обеспечивает высокую температуру, необходимую для спекания керамического порошка. Существуют различные типы печей для спекания, включая электрические, газовые и индукционные. Выбор печи зависит от требований процесса и типа керамических материалов [3].

- Регулятор температуры: для обеспечения точной температуры в печи используется регулятор температуры. Он контролирует температуру внутри печи и поддерживает ее на заданном уровне. Регулятор температуры обычно оснащен датчиками, которые измеряют температуру и передают информацию в контроллер для регулировки.

- Форма для спекания: перед спеканием керамическая заготовка помещается в специальную форму. Форма предназначена для обеспечения правильной формы и

размеров готового изделия. Она также служит для предотвращения деформации заготовки во время спекания.

– Защитная оболочка: некоторые керамические материалы требуют защиты от воздействия атмосферы во время спекания. Для этого используется защитная оболочка, которая предотвращает окисление и взаимодействие с воздухом. Защитная оболочка может быть изготовлена из различных материалов, таких как керамика, металлы или специальные покрытия [3].

В таблице 1 приведены основные физико-механические характеристики наиболее распространённого в мире материала марки ВК8, выпускаемого фирмой «ВИРИАЛ» (город Санкт-Петербург), в сравнении с аналогичными материалами, производимыми компанией «Sandvik» (Швеция) – крупнейшим мировым производителем твёрдых материалов, и Кировоградским заводом твёрдых материалов (КЗТМ, Россия) – крупнейшим отечественным производителем твёрдых материалов [4].

Таблица 1 – Сравнение физико-механических характеристик твердых сплавов

Свойства твердого сплава	Производители		
	КЗТМ (ГОСТ 3882)	Вириал	Sandvik
Плотность, кг/м ³	14400–14800	14500–14700	14700
Прочность при изгибе, МПа	1670	2400	2450
Твердость по Роквеллу H_R , ед.	87,5	88,5	90,6

В настоящее время в нашей стране выпускаются следующие субмикронные высокотемпературные керамические материалы:

- стандартные мелкозернистые (марки ВК3М, ВК6М, ВК10М),
- особомелкозернистые (ВК6ОМ, ВК10ОМ, ВК15ОМ),
- опытные ВК10ВХ, ВК10ТХ, ВК10ХТН.

Технологические режимы спекания керамических материалов – это процессы, которые проводятся для создания прочных и долговечных керамических изделий. Такие материалы, как керамика, являются очень жесткими и хрупкими, поэтому их спекание играет важную роль в получении конечного продукта с требуемыми свойствами.

Керамические материалы также обладают химической инертностью, что делает их полезными для химической промышленности и медицины. Они могут быть использованы для хранения и перевозки агрессивных химических веществ, а также для производства имплантатов и протезов.

Некоторые керамические материалы имеют диэлектрические свойства, что делает их полезными для изготовления электронных компонентов, таких как конденсаторы и печатные платы.

Качество оборудования и правильная настройка параметров спекания имеют решающее значение для получения требуемых характеристик готового изделия, таких как прочность, плотность и структура.

Таким образом, спекание керамических материалов позволяет получить разнообразные продукты с уникальными свойствами. Эти материалы широко применяются в различных отраслях промышленности и науки, и их использование продолжает расширяться благодаря развитию новых технологий и исследований.

1.2 Обзор компьютерных, в том числе виртуальных тренажеров для обучения управленческого производственного персонала химико-технологических процессов

Тренажер-симулятор «Внепечная обработка стали»

Тренажер разработан с целью помочь обучаемым развить и улучшить свои профессиональные навыки в управлении технологическим процессом на рабочем месте цеха внепечной обработки конвертерной стали. Он предоставляет возможность погрузиться в практические сценарии управления процессом как в типовых, так и в нестандартных ситуациях.

Тренажер подходит для обучения студентов, стажеров, новых сотрудников и опытного технологического персонала цеха. Он предназначен для эффективной подготовки персонала к работе, повышения их квалификации, а также для тренировки после длительного отсутствия на рабочем месте. Пример интерфейса тренажера представлен на рисунке 8.

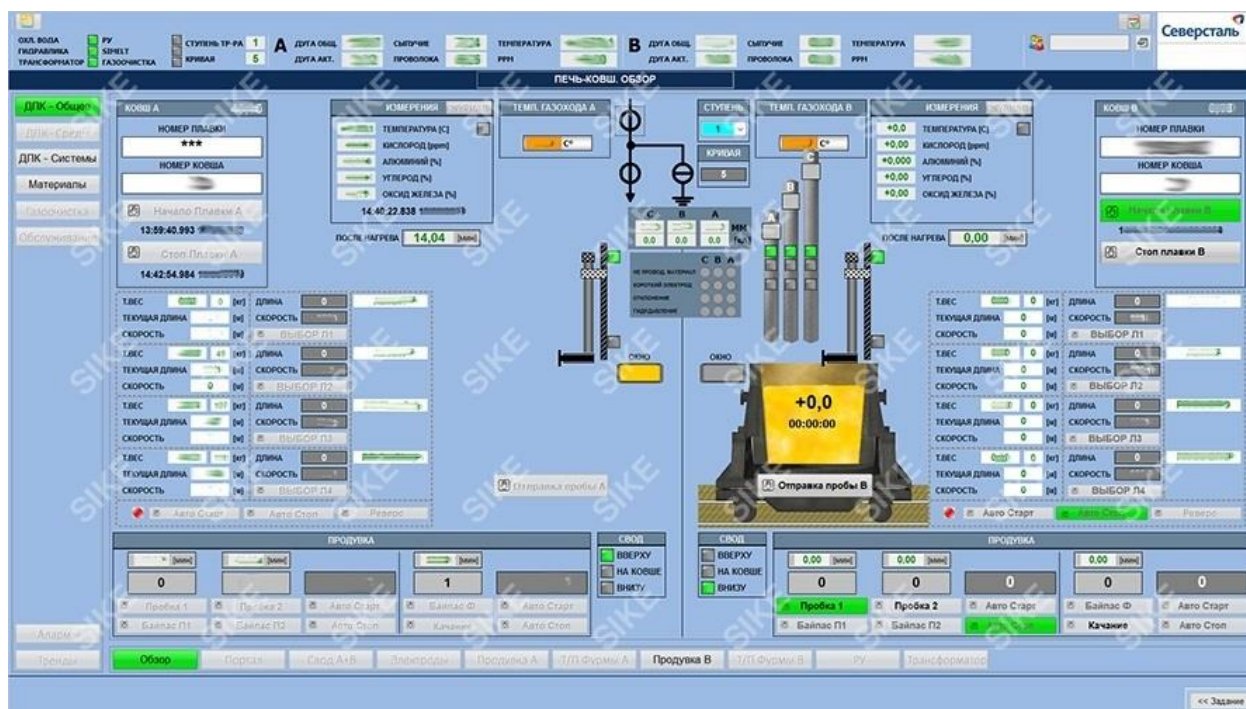


Рисунок 8 – Интерфейс тренажера-симулятора «Внепечная обработка стали»

Тренажер позволяет охватить основные аспекты производственной деятельности сталевара внепечной обработки стали:

- управление оборудованием агрегата «Печь-ковш»;
- получение качественной продукции с соблюдением нормативов и правил техники безопасности;

– быстрое и правильное реагирование в случае возникновения аварийных ситуаций.

Для формирования каждого из трёх навыков в тренажере разработаны соответствующие разделы, состоящие из сценариев, которые направлены на получение более мелких – конкретных навыков [6].

Каждый раздел имеет два режима работы: «Обучение» и «Экзамен». В режиме «Обучение» максимально раскрывается технологический процесс, обучаемому выдаются подсказки, пояснения.

Режим «Экзамен» позволяет оценить степень усвоения материала, здесь собирается подробная статистика, позволяющая обучающему или преподавателю анализировать прогресс формирования навыков.

При завершении выплавки стали формируется паспорт плавки, в котором содержится информация необходимая для анализа качества полученной стали:

- информация о начальных, целевых и полученных характеристиках металла;
- перечень действий, выполненных пользователем во время технологического процесса;
- информация о потраченных ресурсах (ферросплавы, электроэнергия и т.д.) на ведение процесса.

Тренажер-симулятор "Газовщик доменной печи"

Тренажер вырабатывает и отрабатывает устойчивые навыки действий технологического персонала в случаях возникновения нестандартных и аварийных ситуаций при выплавке чугуна на различных типах доменных печей. Тренажер создан для малоопытных газовщиков и технологов доменных цехов, сотрудников предприятий, проходящих переквалификацию на профессию «Газовщик доменной печи». Пример интерфейса тренажера представлен на рисунке 9.

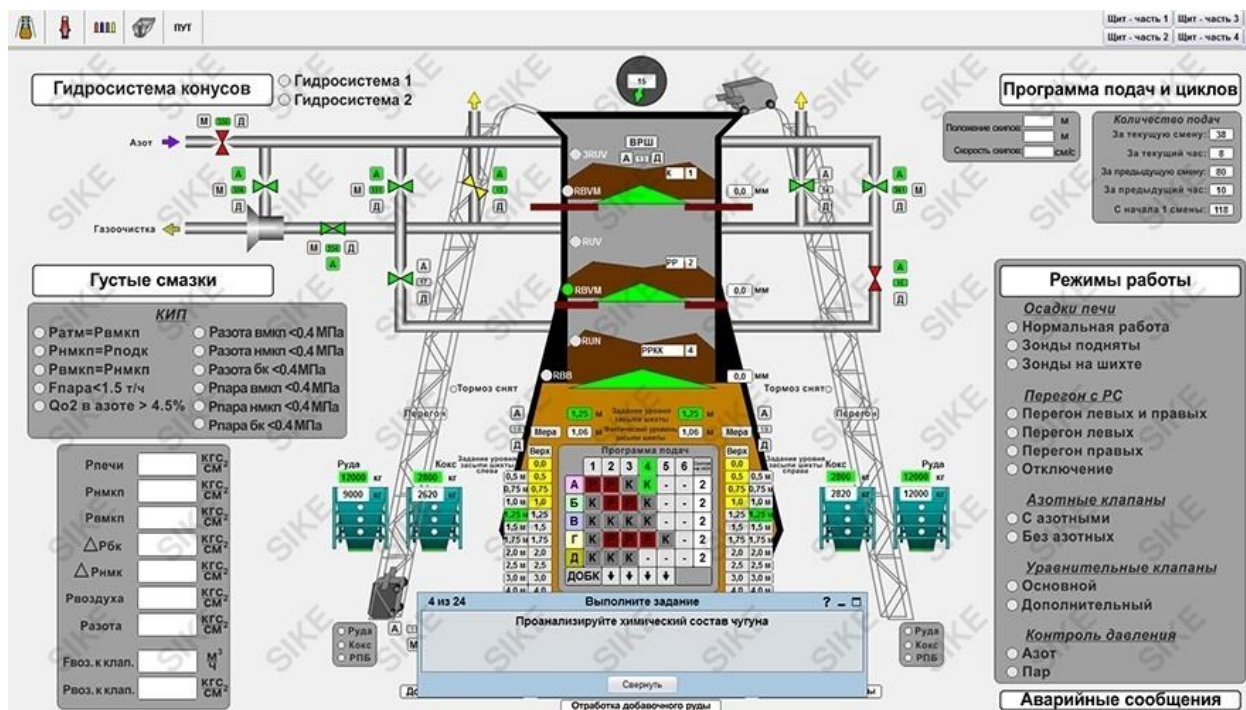


Рисунок 9 – Интерфейс тренажера-симулятора «Газовщик доменной печи»

Тренажер предназначен для изучения доменных печей 3-х типов с различными загрузочными устройствами. Тренажер работает с девятью нестандартными режимами хода доменных печей [7].

Особенность имитации в том, что переход из нормального состояния печи в расстройство происходит постепенно, в течение нескольких часов. Для анализа ситуации обучаемому доступны графики и тренды изменений процессов в печи (например, температура и давление дутья, колошниковых газов, химический состав чугуна и шлака, уровень засыпи и пр.).

Обучение в тренажере выстроено на основе сценариев. Сценарий поэтапно разъясняет учебный материал по каждому виду и причине расстройства хода печи. Сценарий позволяет обучаться самостоятельно, без участия преподавателя.

После обучения в этом разделе ученик сможет определить тип и причину расстройства хода по прямым и косвенным признакам и предпринять меры по устранению нестандартной ситуации.

Проверка полученных знаний проверяется в специальном режиме – тестирование. Итоговая оценка навыков обучаемого осуществляется инструктором. Для этой задачи в тренажере реализовано отдельное рабочее место с функциями управления тренировочным процессом. Инструктор может:

- активировать необходимое расстройство печи;
- задавать причину расстройства;
- отслеживать действия обучаемого;

- управлять скоростью моделирования процесса;
- получать протокол действий обучаемого.

Тренажер учитывает:

- 3 типа доменных печей с различными загрузочными устройствами;
- 9 типов расстройства хода печи (5-10 причин по каждому из них);
- 173 сценария на выявление и ликвидацию расстройств хода доменной печи;
- 41 аварийных сценарий;
- 1 итоговый сценарий для проверки знаний и навыков;
- 25 экранов АСУТП и пультов управления оборудованием.

Тренажерный комплекс «ТРЕК»

Тренажер представляет собой эффективное средство обучения основам управления технологическим процессом путем моделирования существующей системы автоматизации управления технологическим процессом (АСУТП). В процессе обучения осуществляется изучение назначения и особенностей технологического оборудования, а также приобретение практических навыков управления технологическим процессом в различных ситуациях, включая запуск, остановку, работу в нормальном режиме, а также управление при аварийных и нештатных ситуациях. Интерфейс тренажерного комплекса представлен на рисунке 10.

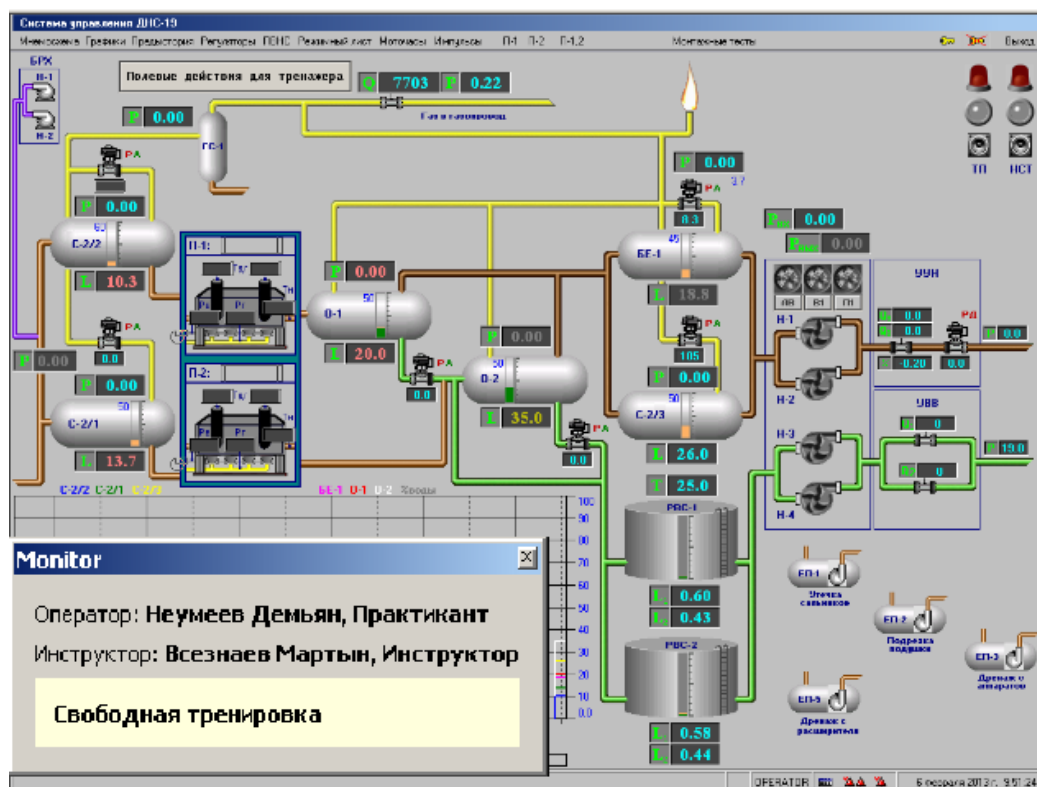


Рисунок 10 – Интерфейс тренажерного комплекса «ТРЕК»

Тренажер также предоставляет возможность проверки знаний и аттестации технологического персонала. Математическая модель, используемая в тренажере, максимально приближена к реальному технологическому процессу, что позволяет имитировать как стандартные, так и аварийные ситуации для тренировки оперативного персонала. Внешний вид интерфейса тренажера идентичен существующей SCADA-системе [8].

В режиме обучения оператору предоставляются подсказки на системном мониторе, выделяющиеся ярким цветом и жирным начертанием. Инструктор может следить за выполнением задания через окно "Контрольный лист", где правильно выполненные действия оператора отмечаются как выполненные пункты. Режим обучения не ведет журналирование, и независимо от результата задания (успешного или неудачного) нет записей в системе отчетности. Режим экзамена предусматривается для проведения тестирования участников.

Для более наглядного сравнения тренажера-симулятора «Внепечная обработка стали», тренажера-симулятора «Газовщик доменной печи» и тренажерного комплекса «ТРЕК» приведена сравнительная таблица 2.

Таблица 2 – Сравнительная таблица тренажеров для обучения управлению различными химико-технологическими процессами

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

Таким образом, проектируемый виртуальный тренажер должен содержать основные достоинства аналогов, таких как возможность настройки сценария обучения и наличие протокола обучения.

1.3 Обзор и обоснование выбора инструментальных средств разработки информационного обеспечения виртуального тренажера для обучения управлению процессом получения твердых сплавов

Для разработки программного комплекса необходим графический интерфейс, следовательно, необходим язык программирования, на котором можно будет создать GUI. Эти функции реализованы в таких языках программирования как Java, C#, C++.

В таблице 3 приводятся возможности языков программирования для наиболее наглядного сравнения.

Таблица 3 — Сравнение языков программирования

Возможности	Java (вер. 17)	C# (вер. 10)	C++ (с++17)
Простое создание GUI	—	+	—
Сборка мусора	+	+	—
Кроссплатформенность	+	+	+
Встроенный пакетный менеджер	—	+	—
Явная типизация [9]	+(статическая типизация)	+(динамическая типизация)	+(динамическая типизация)

Исходя из перечисленных выше пунктов, наиболее подходящий язык программирования для реализации виртуального тренажера – это C#, так как он сочетает в себе преимущества Java и C++, также у него нет многих недостатков, имеющих у C++ и Java.

Важнейшим элементом в процессе разработки программного обеспечения является выбор правильного IDE. Сравнение сред разработки представлено в таблице 4.

Таблица 4 — Сравнение сред разработки

Критерий	Microsoft Visual Studio 2022 17.1	ReSharper 2022.1	JetBrains Пайдер 2022.1
Работа с .NET	Работает для .NET и внешнего кода.		
Решение проблем с кодом [10]	Анализ кода на лету для C#, F#, VB.NET, XAML	Анализ кода во время разработки для всех поддерживаемых языков в режиме реального времени.	

Продолжение таблицы 4

Решение проблем с кодом [10]	Выделение ошибок во время разработки: ошибки компилятора для C#	Подсветка ошибок во время разработки: большинство ошибок компилятора, множество возможных ошибок во время выполнения для всех поддерживаемых языков.	
	Более 250 быстрых действий для решения проблем с кодом на C# и VB.NET.	Более 1300 быстрых исправлений для решения проблем с кодом на C# и др.	Более 1500 быстрых исправлений для решения проблем с кодом на C и др.
	Полный анализ решения для C# и VB.NET	Комплексный монитор ошибок/предупреждений для всех поддерживаемых языков.	
	Встроенное отображение сообщений об ошибках	Нет подходящей функциональности	

Таким образом, исходя из таблицы 4 наиболее удобной средой разработки для разработки под C# является Microsoft Visual Studio 2022, так как она имеет богатый функционал и комплексный подход к решению проблем с кодом.

Для создания 3D моделей необходима среда моделирования. Для решения этой задачи на сравнение (таблица 5) были выбраны Blender и Fusion 360.

Таблица 5 — Сравнение программ для моделирования 3D графики

Критерии	Fusion 360	Blender
Цена	Платный	Бесплатный
Открытый код	Нет	Да
Инструментарий [11]	Инструменты для создания 3D-моделей, скетчей, создания сборок и разработки чертежей	Наличие набора инструментов для моделирования, освещения, текстурирования
Простота обучения новичков моделированию	Нет	Да

Fusion 360 ориентирована на проектирование и моделирование в механической промышленности [11], что излишне для поставленной задачи, поэтому наиболее подходящим ПО для моделирования был выбран Blender.

Для разработки приложения виртуальной реальности необходим современный и удобный инструмент для работы со скриптами и 3D моделями. Сравнение сред разработки приведено в таблице 6.

Таблица 6 – Сравнение сред разработки

Критерий	Unity 3D	CryEngine	Cocos Creator
Популярность среды среди программистов (наличие информации по решению возникающих проблем)	+	+	–
Поддержка форматов 3D приложений [12]	3D Max, Blender, Cinema, Maya, Softimage	3d max, XSI, Maya и Photoshop	Только файлы .fbx
Бесплатная среда разработки	+	–	+
Возможность создавать VR приложения [13]	+	+	+

Исходя из вышеприведенных характеристик, Unity 3D оказался наиболее подходящим инструментом разработки для VR приложений.

Для функционирования виртуального тренажера необходима база данных. Рассмотрим в таблице 7 три наиболее распространенных СУБД (Система управления базами данных) : SQLite, MySQL и PostgreSQL.

Таблица 7 – Сравнение СУБД

Критерий	SQLite	Microsoft Access	MySQL
Бесплатное распространение	Да	Нет	Да
Кроссплатформенность	Да	Да	Да
Язык запросов	SQL	SQL	SQL
Максимальный объем БД	256 ТиБ (2 ⁴⁰ байт) [14]	2 ГБ [16]	Ограничен объемом ВЗУ
Максимально возможное количество полей в таблице	Ограничен размером базы данных, условно недостижимо	255	4096
Встраиваемая СУБД [15]	Да	Да	Нет

На основании данных таблицы 7 наиболее подходящей СУБД является SQLite, так как она является встраиваемой и бесплатной СУБД.

2 Цель и задачи работы

Цель: повышение эффективности практико-ориентированного обучения оператора печи управлению процессом получения твердых сплавов за счет разработки информационного обеспечения виртуального тренажера, позволяющего на основе базы данных 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.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1) Проанализировать характеристики сырья, оборудования, технологических режимов и показателей качества продукции процесса спекания керамических материалов.

2) Провести обзор компьютерных, в том числе виртуальных тренажеров для обучения управленческого производственного персонала химико-технологических процессов и др.

3) Провести обзор и обосновать выбор инструментальных средств разработки информационного обеспечения виртуального тренажера для обучения управлению процессом получения твердых сплавов.

4) Составить формализованное описание процесса получения твердых сплавов как объекта управления.

5) Сформулировать задачу обучения управлению процессом получения твердых сплавов.

6) Разработать функциональную структуру виртуального тренажера.

7) Создать информационное обеспечение виртуального тренажера.

8) Разработать интерактивную 3D модель пульта управления вакуумно-компрессионной печью.

9) Построить алгоритм формирования сценариев обучения управлению процессом получения твердых сплавов.

10) Построить алгоритм формирования протоколов обучения управлению процессом получения твердых сплавов.

11) Разработать структуру интерфейсов пользователей: обучаемого (оператора печи), инструктора, специалиста по математическому обеспечению и администратора.

12) Провести тестирование работы виртуального тренажера на примере формирования сценариев обучения и формирования протоколов обучения для спекания системы WC–Ni в вакуумно-компрессионной печи PVA Tepла.

3 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ. ТЕХНОЛОГИЯ РАЗРАБОТКИ ВИРТУАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА

3.1 Формализованное описание процесса получения твердых сплавов как объекта управления

Анализ процесса производства высокотемпературной керамики позволил в качестве ключевой выделить стадию спекания, а также составить формализованное описание стадии спекания как объекта управления (рисунок 11).

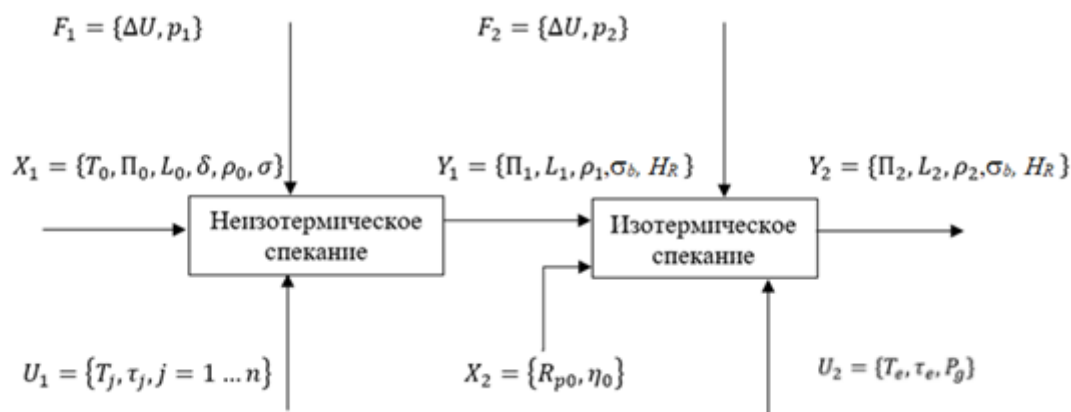


Рисунок 11 – Формализованное описание процесса спекания

На рисунке 11 используются следующие обозначения:

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

T_0 – начальная температура материала, °C;

Π_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 неизотермического спекания, °C;

τ_j – длительность j-го этапа неизотермического 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, °С;
 P_g – давление инертного газа вокруг материала, Па;
 Y_2 – вектор выходных параметров 2 стадии процесса спекания;
 P_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.
 σ_b – прочность твердого сплава при поперечном изгибе, МПа;
 H_R – твердость сплава (по Роквеллу), ед.

3.2 Постановка задачи обучения управлению процессом получения твердых сплавов

Сформулирована следующая задача обучения управлению процессом спекания в производстве твердых сплавов:

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:

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

где P^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.

3.3 Функциональная структура виртуального тренажера

Функциональная структура программного комплекса, в соответствии с которой должно осуществляться информационное взаимодействие компонентов программного комплекса, представлена на рисунке 12.

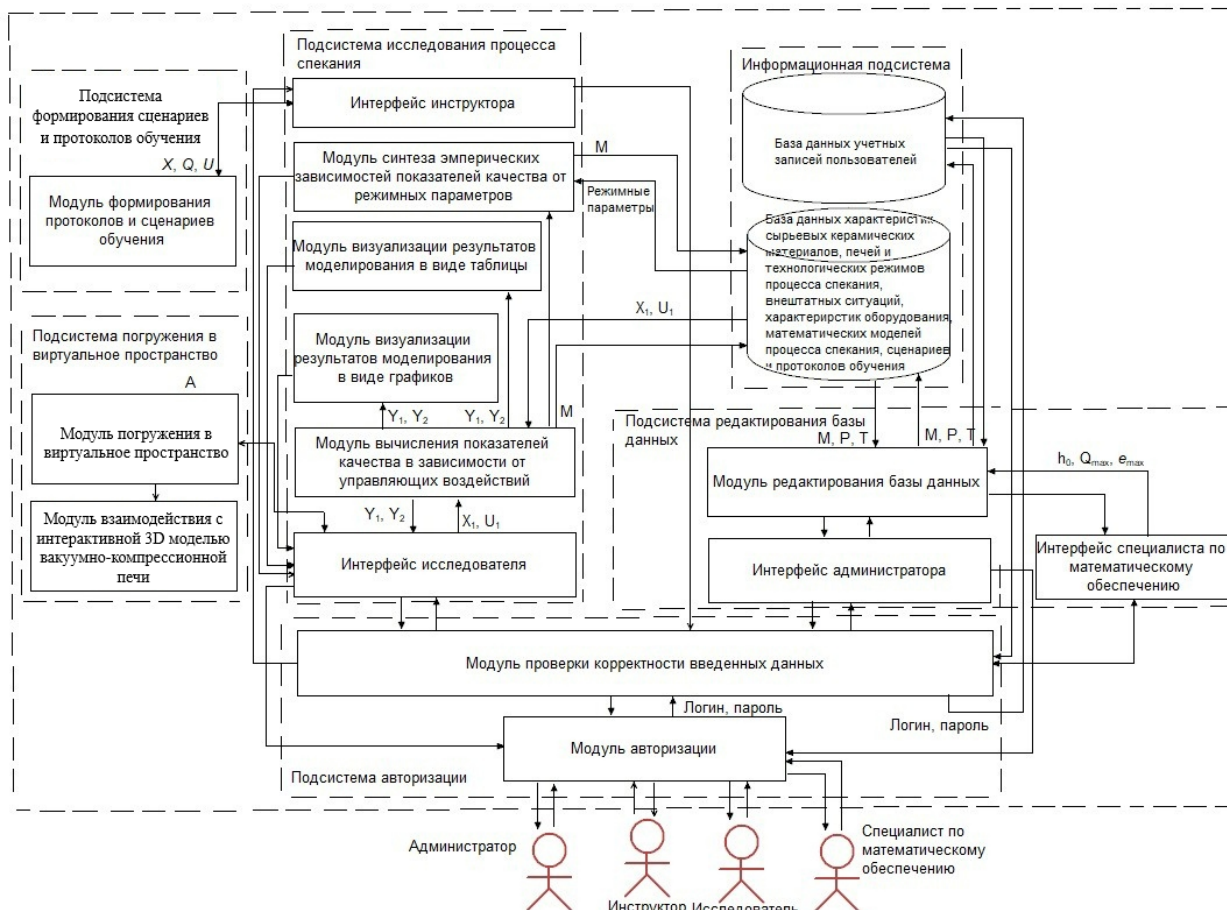


Рисунок 12 – Функциональная структура программного комплекса

Функциональная структура включает в себя базу данных математических моделей процесса спекания для оценки качества твердых сплавов, свойств керамических материалов, характеристик оборудования, регламентных диапазонов управляющих воздействий, базу данных учетных записей пользователей, модуль авторизации пользователей, модуль формирования сценариев обучения, модуль взаимодействия с интерактивной 3D моделью вакуумно-компрессионной печью, модуль вычисления показателей качества твердых сплавов в зависимости от управляющих воздействий, модуль визуализации результатов моделирования, модуль формирования протоколов обучения, интерфейс инструктора, интерфейс обучаемого (оператора печи).

3.4 Информационное обеспечение виртуального тренажера

Инфологическая модель базы данных представлена на рисунке 13.

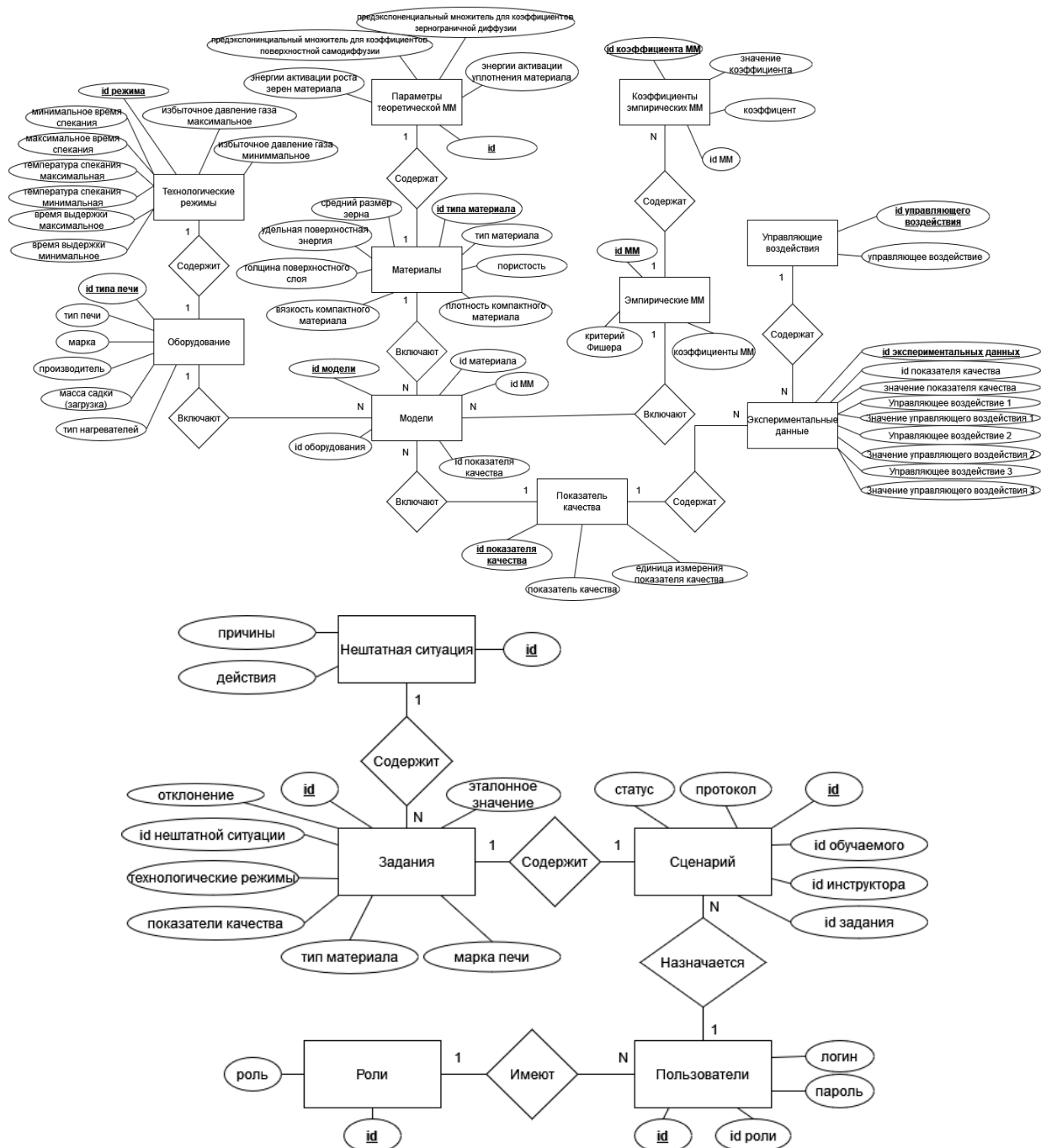


Рисунок 13 – Инфологическая модель базы данных свойств материалов, характеристик оборудования, технологических режимов

Сущность «модели» включают в себя сущности «оборудование», «показатель качества», «материалы» и «эмпирические ММ». Сущность «оборудование», в свою очередь, включает сущность «технологические режимы» печи, а сущность «материалы» - «параметры теоретической ММ». Сущность «эмпирические ММ»

содержит коэффициенты уравнения. Сущность «экспериментальные данные» содержит показатели качества и управляющие воздействия.

Сущность «пользователи» содержит сущность «роли» и «сценарий», который содержит сущность «задания». «Задания» содержат сущность «нештатная ситуация».

На рисунке 14 представлена даталогическая модель базы данных.

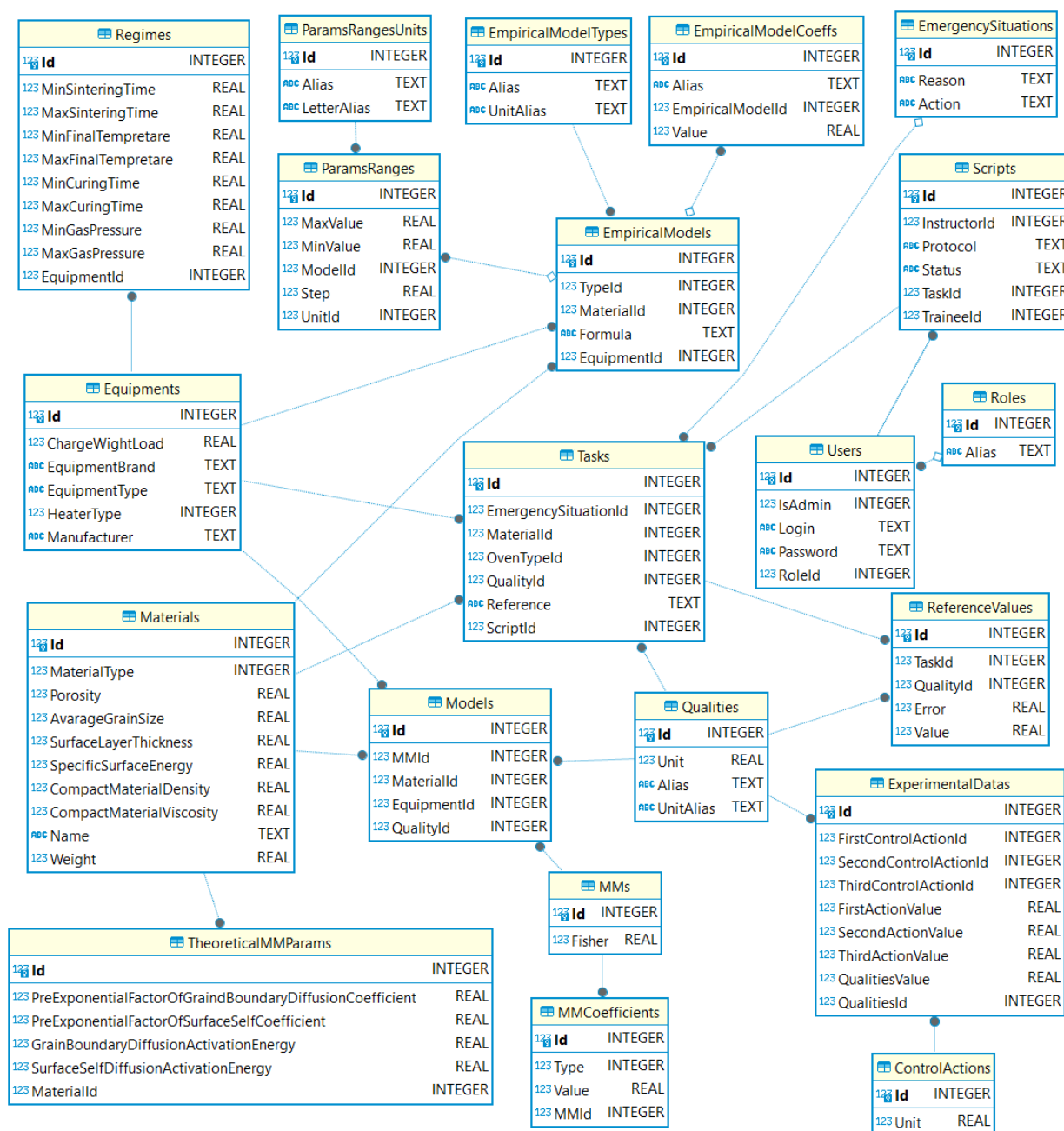


Рисунок 14 – Даталогическая модель базы данных свойств материалов, характеристик оборудования, технологических режимов

В проектировании базы данных использовались следующие типы данных: INTEGER, REAL, TEXT. Посредством анализа предметной области были выделены сущности и их атрибуты, представленные в таблице 8.

Таблица 8 – Сущности и их атрибуты

Сущность	Атрибут
Оборудование	Код типа печи Тип печи Марка Производитель Масса садки (загрузка) Тип нагревателей
Технологические режимы	Код режима Минимальное время спекания Максимальное время спекания Температура спекания максимальная Температура спекания минимальная Время выдержки максимальное Время выдержки минимальное Избыточное давление газа максимальное Избыточное давление газа минимальное
Экспериментальные данные	Код экспериментальных данных Управляющее воздействие 1 Значение управляющего воздействия 1 Управляющее воздействие 2 Значение управляющего воздействия 2 Управляющее воздействие 3 Значение управляющего воздействия 3 Код показателя качества Значение показателя качества
Управляющие воздействия	Код управляющего воздействия Управляющее воздействие
Показатели качества	Код показателя качества Показатель качества Единица измерения показателя качества
Материалы	Код типа материала Тип материала Пористость Средний размер зерна Удельная поверхностная энергия Толщина поверхностного слоя Вязкость компактного материала Плотность компактного материала

Продолжение таблицы 8

Сущность	Атрибут
Параметры теоретической ММ	Код материала Энергии активации уплотнения материала Энергии активации роста зерен материала Предэкспоненциальный множитель для коэффициентов зернограничной диффузии Предэкспоненциальный множитель для коэффициентов поверхностной самодиффузии
Модели	Код модели Код ММ Код материала Код оборудования Код показателя качества
Эмпирические ММ	Код ММ Коэффициенты ММ Критерий Фишера
Коэффициенты эмпирических ММ	Код коэффициента ММ Код ММ Коэффициент Значение коэффициента
Роли	Код роли Роль
Пользователи	Код пользователя Код роли Логин Пароль
Сценарий	Код сценария Код обучаемого Код инструктора Код задания Протокол Статус
Задания	Код задания Код нештатной ситуации Технологические режимы Показатели качества Тип материала Марка печи Эталонное значение
Нештатная ситуация	Код нештатной ситуации Причины Действия

В таблице 9 приведены математические модели (ММ) для оценки качества твердых сплавов [17].

Таблица 9 – Библиотека ММ для оценки показателей качества твердых сплавов

Название показателя качества	Тип материала	Марка печи	Уравнение модели	Значения коэффициентов	Диапазоны режимных параметров
Плотность ρ	Порошковая прессовка, состоящая из карбида вольфрама и никеля	Вакуумно-компрессионная печь PVA Terpla	$\rho = a_0 + a_1 \cdot P_g + a_2 \cdot T + a_3 \cdot P_g \cdot T + a_4 \cdot T^2 + a_5 \cdot P_g \cdot T^2$	$a_0 = -17,46$ $a_1 = -0,00622$ $a_2 = 0,04293$ $a_3 = 1,5 \cdot 10^{-5}$ $a_4 = -1,4 \cdot 10^{-5}$ $a_5 = -5 \cdot 10^{-9}$	$P_g^{\min} = 4 \text{ МПа}$ $P_g^{\max} = 8 \text{ МПа}$ $T^{\min} = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ $T^{\max} = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$
Прочность при поперечном изгибе σ_b	Порошковая прессовка, состоящая из карбида вольфрама и никеля	Вакуумно-компрессионная печь PVA Terpla	$\sigma_b = b_0 + b_1 P_g + b_2 T + b_3 P_g T + b_4 P_g^2 + b_5 T^2 + b_6 P_g^2 T + b_7 P_g \cdot T^2 + b_8 P_g^2 T^2$	$b_0 = -58231$ $b_1 = 673,2$ $b_2 = 81,76$ $b_3 = -0,9453$ $b_4 = -13,10$ $b_5 = -0,02666$ $b_6 = 0,0184$ $b_7 = 31 \cdot 10^{-5}$ $b_8 = -6 \cdot 10^{-6}$	$P_g^{\min} = 4 \text{ МПа}$ $P_g^{\max} = 8 \text{ МПа}$ $T^{\min} = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ $T^{\max} = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$
Остаточная пористость П	Порошковая прессовка, состоящая из карбида вольфрама и никеля	Вакуумно-компрессионная печь PVA Terpla	$\Pi = c_0 + c_1 \cdot T + c_2 \cdot \tau + c_3 \cdot T \cdot \tau + c_4 \cdot T^2 + c_5 \cdot \tau^2 + c_6 \cdot T^2 \cdot \tau + c_7 \cdot T \cdot \tau^2 + c_8 \cdot T^2 \cdot \tau^2$	$c_0 = 199,4$ $c_1 = -0,2765$ $c_2 = -4,486$ $c_3 = 0,0062$ $c_4 = 9,6 \cdot 10^{-5}$ $c_5 = 0,0449$ $c_6 = -2 \cdot 10^{-6}$ $c_7 = -6,2 \cdot 10^{-5}$ $c_8 = 2 \cdot 10^{-8}$	$T^{\min} = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ $T^{\max} = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $\tau^{\min} = 1800 \text{ с}$ $\tau^{\max} = 3600 \text{ с}$
Твердость H_R	Порошковая прессовка, состоящая из карбида вольфрама и никеля	Вакуумно-компрессионная печь PVA Terpla	$H_R = d_0 + d_1 \cdot \tau + d_2 \cdot T + d_3 \cdot T \cdot \tau + d_4 \cdot \tau^2 + d_5 \cdot T^2 + d_6 \cdot \tau^2 \cdot T + d_7 \cdot \tau \cdot T^2 + d_8 \cdot T^2 \cdot \tau^2$	$d_0 = 14,64$ $d_1 = 0,01683$ $d_2 = 0,1033$ $d_3 = 0,00012$ $d_4 = -0,00014$ $d_5 = -3,4 \cdot 10^{-5}$ $d_6 = -9,7 \cdot 10^{-7}$ $d_7 = -4 \cdot 10^{-8}$ $d_8 = 3 \cdot 10^{-10}$	$\tau^{\min} = 3000 \text{ с}$ $\tau^{\max} = 4200 \text{ с}$ $T^{\min} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ $T^{\max} = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$

3.5 Разработка интерактивной 3D модели пульта управления вакуумно-компрессионной печью

Для разработки сцены взаимодействия с 3D моделью создана 3D модель вакуумно-компрессионной печи. Разработка модели производилась в программе Blender. Полученная модель продемонстрирована на рисунке 15.

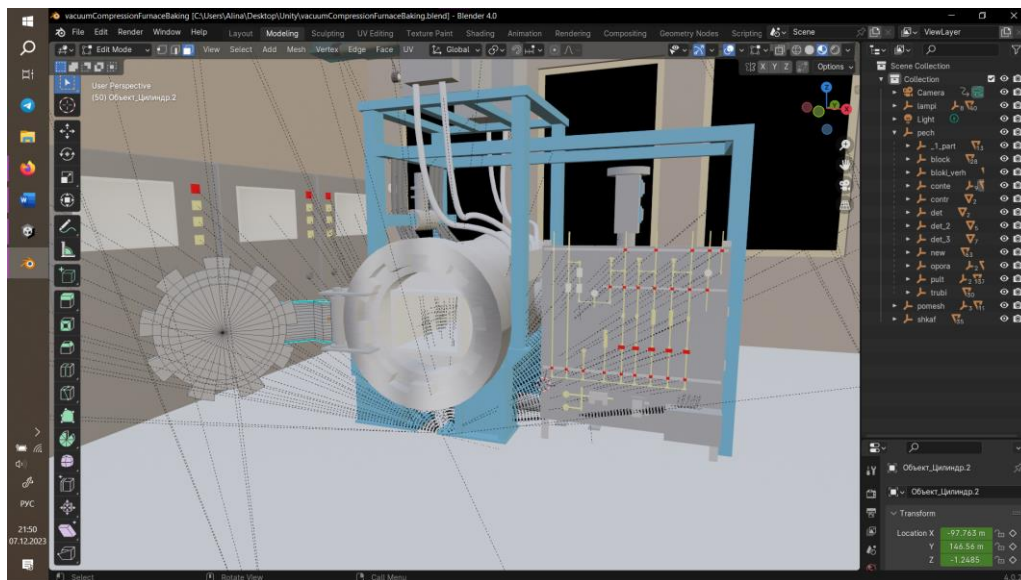


Рисунок 15 – Модель печи в программе Blender

Далее для осуществления программного взаимодействия с моделью был создан Unity проект с добавлением в него 3D модели, необходимых скриптов и симулятора виртуальной реальности для дальнейшего тестирования программы без наличия очков виртуальной реальности. Сцена взаимодействия представлена на рисунке 16.

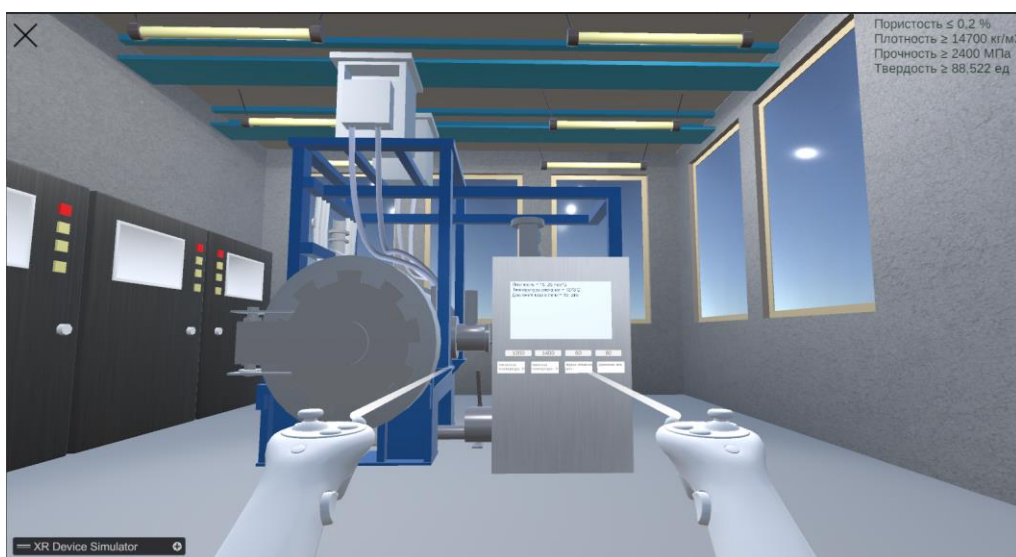


Рисунок 16 – Сцена взаимодействия с 3D моделью

3.6 Алгоритм формирования сценариев обучения управлению процессом получения твердых сплавов

На рисунке 17 представлен алгоритм формирования сценария обучения управлению процессом получения твердых сплавов.

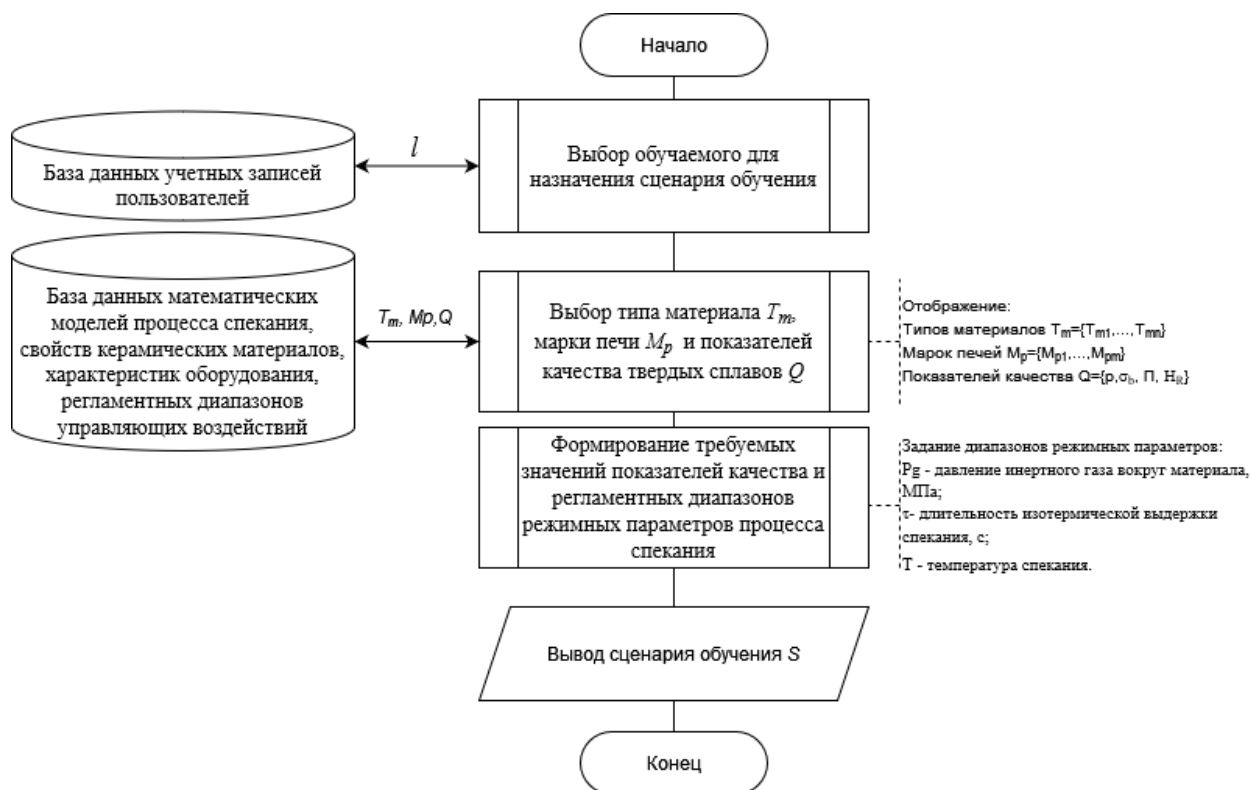


Рисунок 17 – Алгоритм формирования сценария обучения

Алгоритм обращается к БД учетных записей пользователей и БД математических моделей для получения идентификатора обучаемого, типа материала, марки печи и показателей качества твердого сплава.

3.7 Алгоритм формирования протоколов обучения управлению процессом получения твердых сплавов

На рисунке 18 представлен алгоритм формирования протоколов обучения управлению процессом получения твердых сплавов.

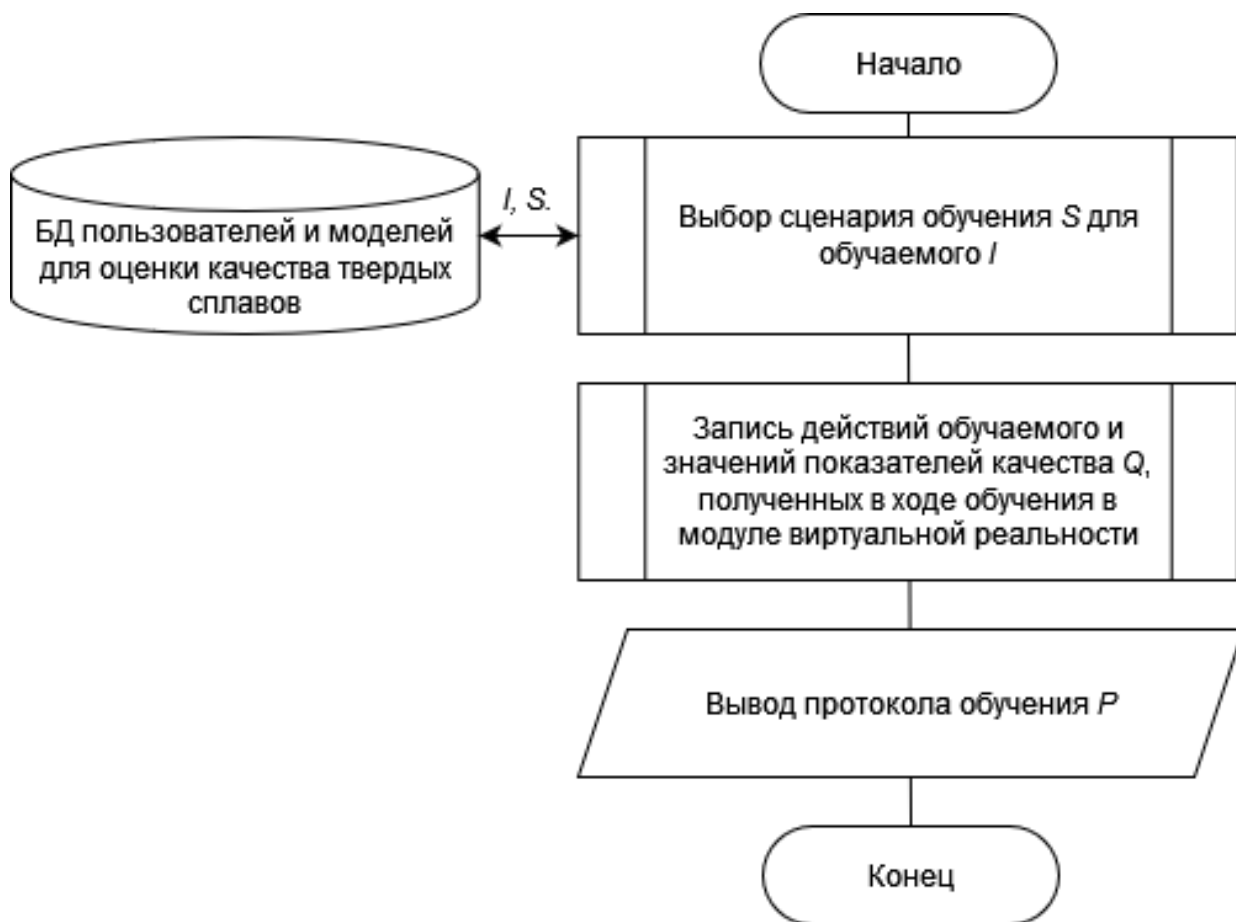


Рисунок 18 – Алгоритм формирования протоколов обучения

Алгоритм обращается к БД учетных записей пользователей для получения идентификатора обучаемого и кода сценария обучения.

3.8 Структура интерфейса пользователей виртуального тренажера

Программный комплекс содержит интерфейсы: обучаемого, инструктора, специалиста по математическому обеспечению и администратора.

На рисунке 19 представлена UML – диаграмма пользовательских интерфейсов.

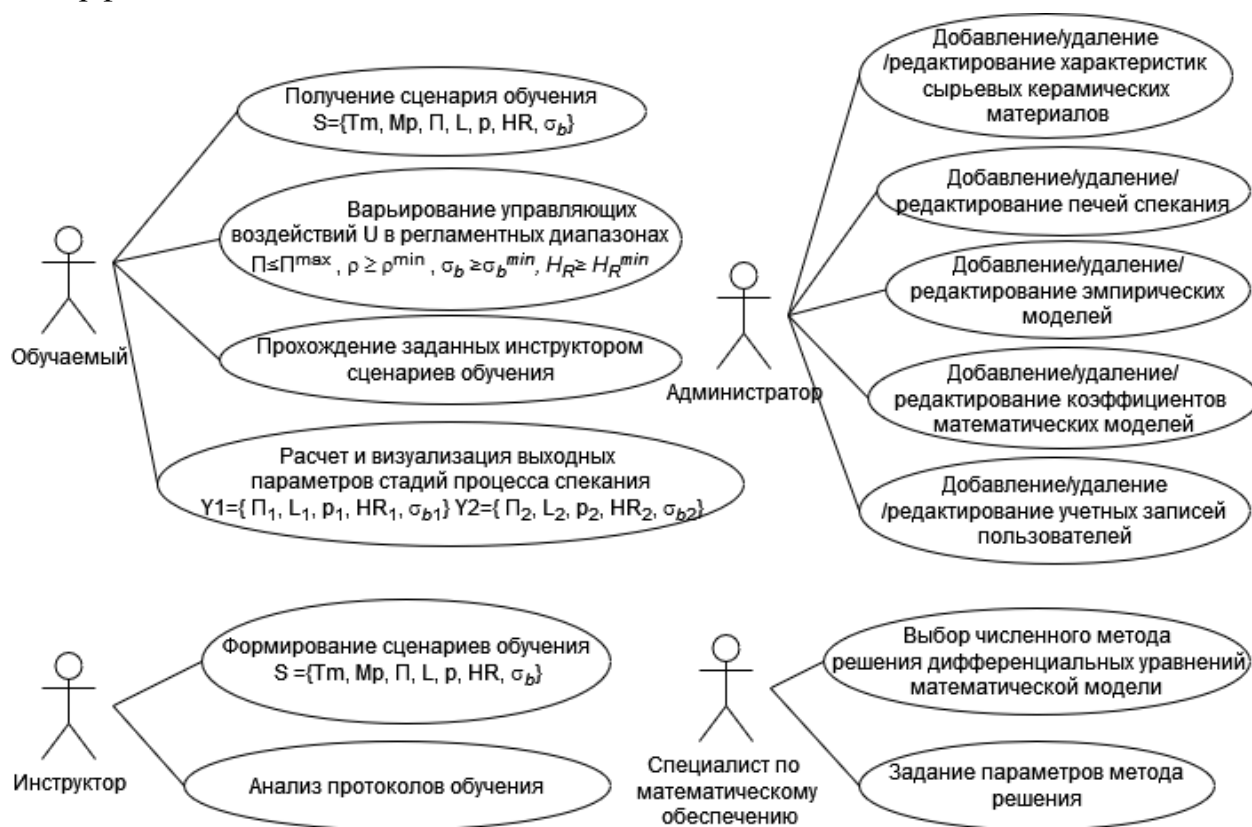


Рисунок 19 – UML – диаграмма пользовательских интерфейсов

Обучаемый (оператор печи) имеет доступ к просмотру своего сценария обучения и прохождению тестирования в виртуальном тренажере. Также обучаемый имеет доступ к расчету выходных параметров процесса спекания.

Инструктор имеет доступ к формированию сценариев обучения. Инструктор назначает сценарий обучаемому и, после прохождения сценария анализирует протокол прохождения сценария обучаемого.

Специалист по математическому обеспечению имеет доступ с БД математических моделей и может выбирать численный метод решения дифференциальных уравнений ММ и задавать параметры методов решения.

Администратор имеет доступ ко всей БД с возможностью добавления, удаления и редактирования записей в БД.

3.9 Тестирование работы виртуального тренажера

Тестирование программного комплекса проводилось на эмпирических моделях процесса спекания, данные для тестирования приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Параметры эмпирических моделей твердого сплава

Название показателя качества	Тип материала	Марка печи	Уравнение модели	Значения коэффициентов	Диапазоны режимных параметров
Плотность ρ	Порошковая прессовка, состоящая из карбида вольфрама и никеля	Вакуумно-компрессионная печь PVA Terpla	$\rho = a_0 + a_1 \cdot P_g + a_2 \cdot T + a_3 \cdot P_g \cdot T + a_4 \cdot T^2 + a_5 \cdot P_g \cdot T^2$	$a_0 = -17,46$ $a_1 = -0,00622$ $a_2 = 0,04293$ $a_3 = 1,5 \cdot 10^{-5}$ $a_4 = -1,4 \cdot 10^{-5}$ $a_5 = -5 \cdot 10^{-9}$	$P_g^{\min} = 4 \text{ МПа}$ $P_g^{\max} = 8 \text{ МПа}$ $T^{\min} = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ $T^{\max} = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$
Прочность при поперечном изгибе σ_b	Порошковая прессовка, состоящая из карбида вольфрама и никеля	Вакуумно-компрессионная печь PVA Terpla	$\sigma_b = b_0 + b_1 P_g + b_2 T + b_3 P_g T + b_4 P_g^2 + b_5 T^2 + b_6 P_g^2 T + b_7 P_g \cdot T^2 + b_8 P_g^2 T^2$	$b_0 = -58231$ $b_1 = 673,2$ $b_2 = 81,76$ $b_3 = -0,9453$ $b_4 = -13,10$ $b_5 = -0,02666$ $b_6 = 0,0184$ $b_7 = 31 \cdot 10^{-5}$ $b_8 = -6 \cdot 10^{-6}$	$P_g^{\min} = 4 \text{ МПа}$ $P_g^{\max} = 8 \text{ МПа}$ $T^{\min} = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ $T^{\max} = 1500 \text{ }^\circ\text{C}$
Остаточная пористость П	Порошковая прессовка, состоящая из карбида вольфрама и никеля	Вакуумно-компрессионная печь PVA Terpla	$\Pi = c_0 + c_1 \cdot T + c_2 \cdot \tau + c_3 \cdot T \cdot \tau + c_4 \cdot T^2 + c_5 \cdot \tau^2 + c_6 \cdot T^2 \cdot \tau + c_7 \cdot T \cdot \tau^2 + c_8 \cdot T^2 \cdot \tau^2$	$c_0 = 199,4$ $c_1 = -0,2765$ $c_2 = -4,486$ $c_3 = 0,0062$ $c_4 = 9,6 \cdot 10^{-5}$ $c_5 = 0,0449$ $c_6 = -2 \cdot 10^{-6}$ $c_7 = -6,2 \cdot 10^{-5}$ $c_8 = 2 \cdot 10^{-8}$	$T^{\min} = 1300 \text{ }^\circ\text{C}$ $T^{\max} = 1550 \text{ }^\circ\text{C}$ $\tau^{\min} = 1800 \text{ с}$ $\tau^{\max} = 3600 \text{ с}$
Твердость H_R	Порошковая прессовка, состоящая из карбида вольфрама и никеля	Вакуумно-компрессионная печь PVA Terpla	$H_R = d_0 + d_1 \cdot \tau + d_2 \cdot T + d_3 \cdot T \cdot \tau + d_4 \cdot \tau^2 + d_5 \cdot T^2 + d_6 \cdot \tau^2 \cdot T + d_7 \cdot \tau \cdot T^2 + d_8 \cdot T^2 \cdot \tau^2$	$d_0 = 14,64$ $d_1 = 0,01683$ $d_2 = 0,1033$ $d_3 = 0,00012$ $d_4 = -0,00014$ $d_5 = -3,4 \cdot 10^{-5}$ $d_6 = -9,7 \cdot 10^{-7}$ $d_7 = -4 \cdot 10^{-8}$ $d_8 = 3 \cdot 10^{-10}$	$\tau^{\min} = 3000 \text{ с}$ $\tau^{\max} = 4200 \text{ с}$ $T^{\min} = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ $T^{\max} = 1400 \text{ }^\circ\text{C}$

На рисунке 20 показан интерфейс инструктора с формированием сценария обучения.

Тип материала	Марка печи	Тип математической модели	Обучаемый
Карбид вольфрам-кобальт	PVA-TePla GmbH, Германия	Эмпирические модели	Admin

Обучаемому необходимо для заданных входных параметров процесса спекания X варьированием режимных параметров U в регламентных диапазонах Ue[Umin, Umax] по математической модели найти такие их значения, которые обеспечивают требуемое качество твердого сплава:

$P \leq 0,21$, $\rho \geq 14700$, $\sigma_b \geq 2400$, $HR \geq 88,55$, $L \leq 1$

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

Рисунок 20 – Формирование сценария обучения

Инструктор выбирает обучаемого, тип материала, марку печи и показатель качества, который будет сравниваться с заданным, при этом остальные показатели качества должны быть в регламентных диапазонах. После создания сценария обучения, обучаемому разрешается доступ к виртуальному тренажеру.

Начальная точка обучения в виртуальном пространстве представлена на рисунке 21.

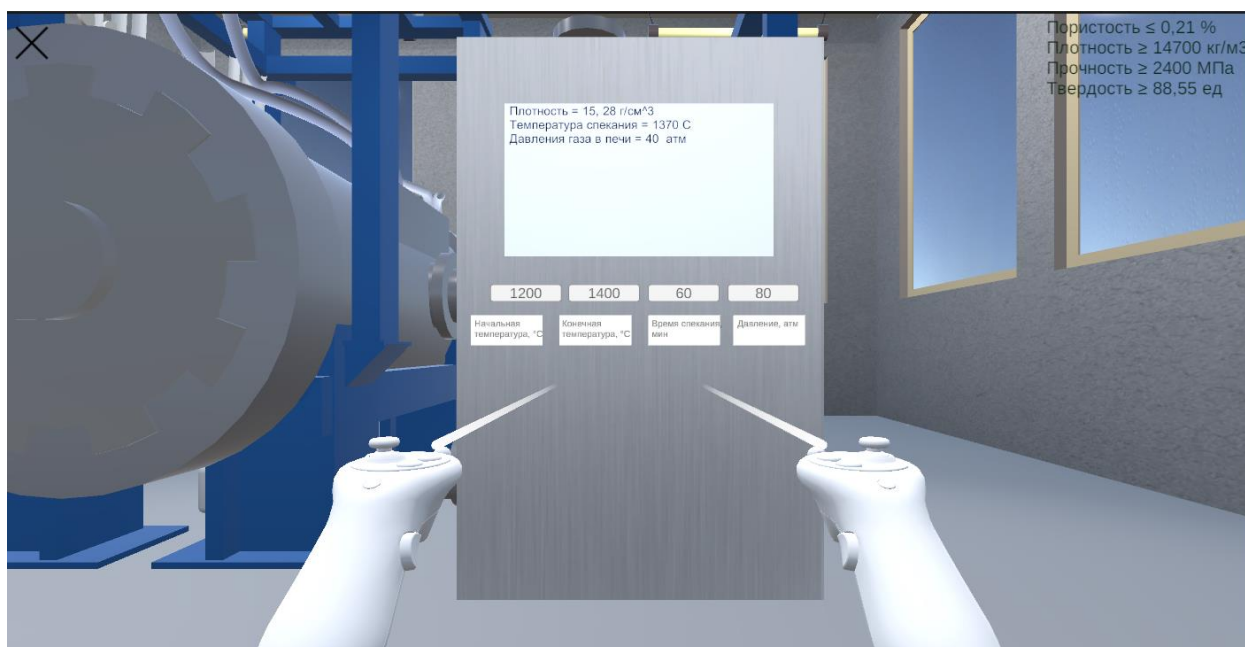


Рисунок 21 – Начальная точка обучения в виртуальном пространстве

Для того, чтобы начать расчет необходимых управляющих воздействий для достижения заданного значения, обучаемому необходимо с помощью контроллера

нажать на необходимое значение. После нажатия появится виртуальная клавиатура (рисунок 22) для ввода значения с помощью контроллеров.



Рисунок 22 – Виртуальная клавиатура

После ввода нового значения производится расчет показателей качества. Результаты расчета представлены на рисунке 23.

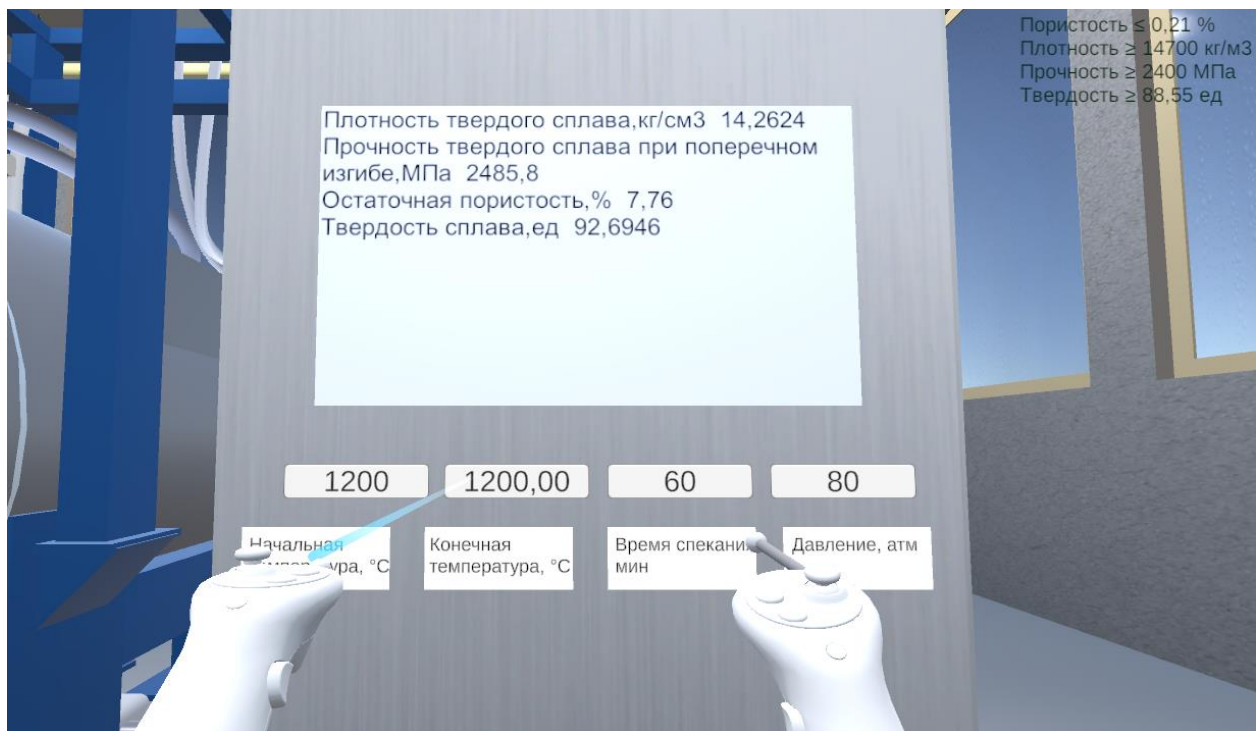


Рисунок 23 – Результат расчета показателей качества

Далее, после прохождения сценария обучения оператором печи инструктор может проанализировать протокол обучения (рисунок 24).

Пользователь	Admin			
Прошел обучение?	Да			
Исходные данные:				
Материал	Карбид вольфрам-кобальт			
Печь	PVA-TePla GmbH, Германия			
Начальная температура, 0C 12.06.2024 21:47:35	1200			
Конечная температура, 0C 12.06.2024 21:47:35	1400			
Время спекания, мин 12.06.2024 21:47:35	60			
Давление, атм 12.06.2024 21:47:35	80			
Заданные значения показателей качества твердых сплавов:				
Пористость $\leq 0,21$ %				
Плотность ≥ 14700 кг/м3				
Прочность ≥ 2400 МПа				
Твердость $\geq 88,55$ ед				
	Плотность твердого сплава, кг/см3	Прочность твердого сплава при поперечном изгибе, МПа	Остаточная пористость, %	Твердость сплава, ед
Действия 12.06.2024				
21:47:46 Конечная температура, 0C 1200	14262,4	2485,8	7,76	92,6946
21:48:24 Время спекания, мин 65	14262,4	2485,8	7,6925	92,66575
21:48:48 Конечная температура, 0C 1250	14704,9	3748,75	7,1062	93,68760625
21:49:00 Время спекания, мин 70	14704,9	3748,75	6,89	93,612725
21:49:14 Конечная температура, 0C 1300	15075,4	4810,4	6,46	94,4555
21:49:40 Время спекания, мин 75	15075,4	4810,4	6,0525	94,3335
21:49:53 Конечная температура, 0C 1350	15373,9	5670,75	5,7912	94,99678125
21:50:03 Время спекания, мин 80	15,3739	5670,75	5,165	94,8268
21:50:25 Конечная температура, 0C 1400	15600,4	6329,8	5,1	95,3104
21:50:36 Время спекания, мин 85	15600,4	6329,8	4,2425	95,0918
21:50:46 Время спекания, мин 90	15600,4	6329,8	3,25	94,8277
21:50:56 Время спекания, мин 95	15600,4	6329,8	2,1225	94,5181
21:51:08 Время спекания, мин 100	15600,4	6329,8	0,86	94,163
21:51:24 Время спекания, мин 110	15600,4	6329,8	-2,07	93,3163
21:52:17 Время спекания, мин 105	15600,4	6329,8	-0,5375	93,7624
21:52:35 Время спекания, мин 103	15600,4	6329,8	0,0377	93,9281
Результаты моделирования 12.06.2024 21:52:35				
Плотность твердого сплава, г/см3	15,6004			
Прочность твердого сплава при поперечном изгибе, МПа	6329,8			
Остаточная пористость, %	0,0377			
Твердость сплава, ед	93,9281			

Рисунок 24 – Протокол обучения

На рисунке 25 приведен график зависимости плотности твердого сплава от времени управления процессом спекания, построенный на основе данных тестирования.



Рисунок 25 – График зависимости плотности твердого сплава от времени

На графике зависимости плотности твердого сплава от времени видно, что на протяжении всего эксперимента значение плотности больше заданного значения 14700 кг/см^3 , исключая отрезок времени с 0 до 20 минут.

На рисунке 26 представлен график зависимости прочности от времени.



Рисунок 26 – График зависимости прочности твердого сплава от времени

На графике видно, что прочность на протяжении всего эксперимента была больше заданного значения 2400 МПа.

На рисунке 27 представлен график зависимости остаточной пористости твердого сплава от времени. График на протяжении всего эксперимента убывает до 130-й минуты, далее значение пористости меньше заданного.

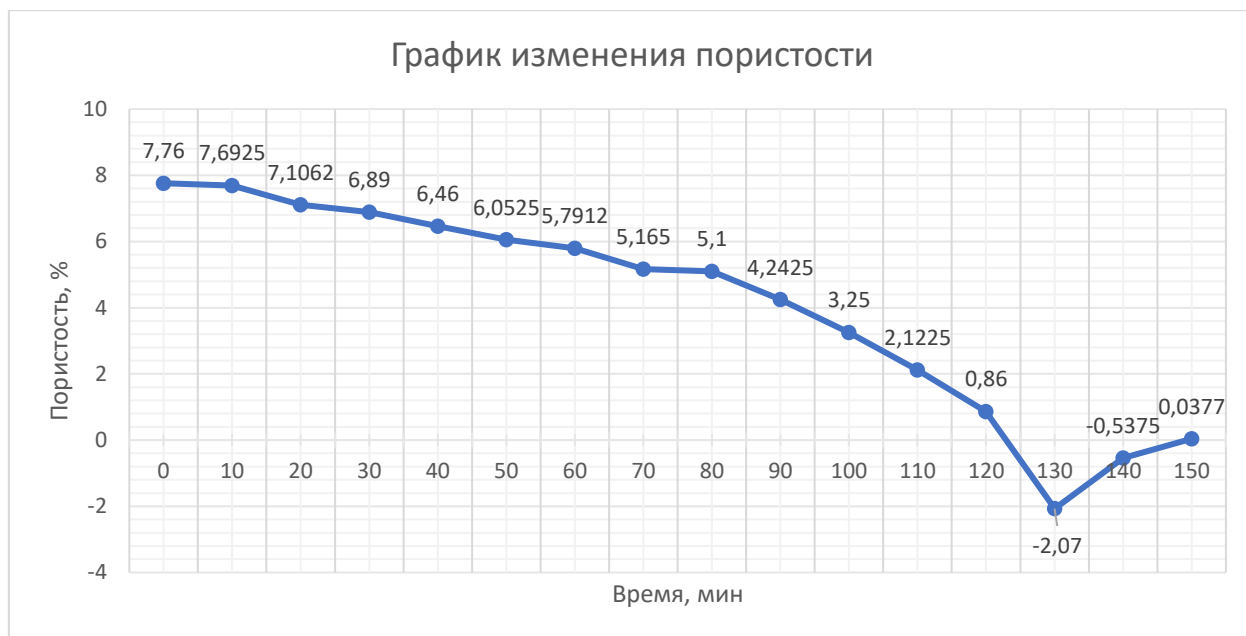


Рисунок 27 – График зависимости пористости твердого сплава от времени

На рисунке 28 представлен график зависимости твердости от времени.



Рисунок 28 – График зависимости твердости твердого сплава от времени

На протяжении всего эксперимента значение твердости превышает заданное значение 88,55 ед.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы был разработано информационное обеспечение виртуального тренажера для обучения управлению процессом получения твердых сплавов на базе эмпирических моделей процесса спекания, позволяющий в виртуальной реальности варьировать режимные параметры процесса спекания, создавать сценарии обучения и анализировать протоколы обучения, что помогает повысить качество комплексного практико-ориентированного обучения операторов печей.

Были решены следующие задачи:

- собрана, структурирована и проанализирована информация о характеристиках сырья, оборудовании, технологических режимах и показателях качества продукции процесса спекания керамических материалов;
- проведен обзор компьютерных, в том числе виртуальных тренажеров для обучения управленческого производственного персонала химикотехнологических процессов, который показал необходимость создания виртуального тренажера для обучения управлению процессом получения твердых сплавов;
- проведен обзор и обоснован выбор инструментальных средств разработки информационного обеспечения виртуального тренажера для обучения управлению процессом получения твердых сплавов, в ходе которого в качестве языка программирования был выбран C#, в качестве среды разработки – Visual Studio 2022 и Unity 3D. Для 3D моделирования – Blender, а СУБД – SQLite;
- составлено формализованное описание процесса получения твердых сплавов как объекта управления;
- сформулирована задача обучения управлению процессом получения твердых сплавов;
- 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;
- создано информационное обеспечение виртуального тренажера, включающее базу данных математических моделей для оценки качества твердых сплавов, состоящую из 10 сущностей и базу данных учетных записей пользователей с возможностью создания сценариев и протоколов обучения, состоящую из 5 сущностей. Сущности связаны отношениями один-ко-многим. При проектировании БД использовались типы данных: TEXT, REAL, INT;
- разработана интерактивная 3D модель пульта управления вакуумно-

компрессионной печью, которая позволяет варьировать режимные параметры процесса спекания с возможностью вывода в виртуальном пространстве результатов расчета показателей качества твердых сплавов;

- построен алгоритм формирования сценариев обучения управлению процессом получения твердых сплавов;

- построен алгоритм формирования протоколов обучения управлению процессом получения твердых сплавов;

- 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, специалиста по математическому обеспечению, который имеет доступ к БД математических моделей и может выбирать численный метод решения дифференциальных уравнений ММ и задавать параметры методов решения и администратора, позволяющего редактировать базу данных математических моделей и учетных записей пользователей;

- проведено тестирование работы виртуального тренажера на примере формирования сценариев и протоколов обучения для спекания системы WC–Ni в вакуумно-компрессионной печи PVA Terpla, подтвердившее работоспособность программного комплекса для данного класса объектов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Керамическая промышленность по всему миру – статистика и факты : сайт. Санкт - Петербург, 2023 – . – URL: <https://www.statista.com/topics/8686/ceramics-industry-worldwide> (дата обращения : 10.12.2023).
- 2 Орданьян, С. С. Технология наноструктурированных керамических материалов. Новые керамические инструментальные материалы : учебное пособие / С. С. Орданьян, И. Б. Пантелеев ; Минобрнауки России, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), кафедра химической технологии тонкой технической керамики. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГТИ(ТУ), 2014. – 86 с.
- 3 Курлов, А. С. Влияние температуры спекания на фазовый состав и микротвёрдость твёрдого сплава WC с Co / А. С. Курлов, А. А. Ремпель // Неорганические материалы. – 2007. – Т. 43, № 6. – С. 685-691.
- 4 Антонова, Е.А. Взаимодействие покрытия Ni-Cr-Si-B со сталью 1X18H9T при длительном отжиге / Е. А. Антонова, Н. С. Андрущенко, Л. М. Синай // Защита металлов. – 1972. – Т.8, №5. – С.538-544.
- 5 Аппен, А. А. Изучение продуктов взаимодействия металлов с натриевосиликатным расплавом / А. А. Аппен, Н. С. Андрущенко, И. Б. Баньковская, М. В. Сазонова // Физика и химия обработки материалов. – 1972. – № 6. – С. 51-55.
- 6 Тренажер-симулятор «Внепечная обработка стали» : сайт. – Россия, 2024 URL: <https://sike.ru/portfolio/severstal-trenazher-vos> (дата обращения 29.04.2024).
- 7 Тренажер-симулятор "Газовщик доменной печи" : сайт. – Россия, 2024 URL: <https://sike.ru/portfolio/metinvest-trenazheri-domennaya-pech> (дата обращения 29.04.2024).
- 8 Тренажерный комплекс «Трек» : сайт. – Россия, 2024 URL: <http://www.yugra-asu.ru/trek> (дата обращения 30.04.2024).
- 9 Сравнение ОО языков C#, Java и C++ : сайт. – Россия, 2024 URL: https://zei.narod.ru/Comparison_C__Java_Cpp_3.pdf (дата обращения 2.05.2024).
- 10 JetBrains Rider vs Visual Studio (with and without ReSharper) : сайт. – Чехия, 2024 URL: <https://www.jetbrains.com/rider/compare/rider-vs-visual-studio/> (дата обращения 2.05.2024).
- 11 Blender или Fusion 360: сравнение программ для 3D-моделирования и визуализации : сайт. – Россия, 2024 URL: <https://uchet->

jkh.ru/i/blender-ili-fusion-360-sravnenie-programm-dlya-3d-modelirovaniya-i-vizualizaciihttps (дата обращения 3.05.2024).

12 Сравнение игровых движков : сайт. – Россия, 2024 URL: https://cyclowiki.org/wiki/Сравнение_игровых_движков (дата обращения 4.05.2024).

13 Сравнение популярных игровых движков: от бесплатного Godot до старейшего Unreal Engine : сайт. – Россия, 2024 URL: <https://www.mvideo.ru/blog/pomogaem-razobratsya/populyarnyh-igrovyh-dvizhkov> (дата обращения 4.05.2024).

14 Ограничения реализации для SQLite : сайт. – Санкт-Петербург, 2003. URL<https://runebook.dev/ru/docs/sqlite/limits> (дата обращения: 12.03.2024)

15 SQLite, MySQL и PostgreSQL: сравниваем популярные реляционные СУБД : сайт. – Россия, 2024 URL: <https://tproger.ru/translations/sqlite-mysql-postgresql-comparison> (дата обращения 01.05.2024).

16 Microsoft_Access : сайт. – Россия, 2024 URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Access (дата обращения 01.05.2024).

17 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 : Изд-во СПбГТИ(ТУ), 2013. – 223 с.

18 Скит, Д. С# для профессионалов. Тонкости программирования / Д. Скит ; перевод с английского. – 3-е изд., доп. и перераб. – Москва : Вильямс, 2017. – 608 с. – ISBN 978-5-8459-1909-0.

19 Корниенко, И. Г. Система компьютерного моделирования для исследования и управления качеством высокотемпературных керамических материалов / И. Г. Корниенко, Т. Б. Чистякова, А. Н. Полосин // Известия СПбГТИ(ТУ). – 2014. – № 26. – С. 80–85.

20 Вириал: Техническая керамика. Твердые сплавы. Композиционные материалы : сайт. – Санкт-Петербург, 2003. URL: <http://www.virial.ru> (дата обращения: 12.12.2023).

21 Корниенко, И. Г. Система электронного обучения управлению процессами получения твердых сплавов / И. Г. Корниенко, Т. Б. Чистякова, И. В. Новожилова // Известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – № 3, т. 5. – С. 157–163.

Нормативные документы

- 22 СТО СПбГТИ(ТУ) 026-2011 КС УКДВ. Порядок подготовки бакалавров. Общие требования.
- 23 ГОСТ 7.90-2007 СИБИБД. Универсальная десятичная классификация. Структура, правила ведения и индексирования.
- 24 ГОСТ 7.32-2017 СИБИБД. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.
- 25 ГОСТ 7.9-95 СИБИБД. Реферат и аннотация. Общие требования.
- 26 ГОСТ Р 7.0.100-2018 Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.
- 27 ГОСТ 8.417-2002 ГСИ. Единицы величин.
- 28 ГОСТ 19.701-90 ЕСПД. Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Условные обозначения и правила выполнения.
- 29 ГОСТ 19.101-77 ЕСПД. Виды программ и программных документов.
- 30 ГОСТ 19.103-77 ЕСПД. Обозначение программ и программных документов.
- 31 ГОСТ 19.104-78 ЕСПД. Основные надписи.
- 32 ГОСТ 19.105-78 ЕСПД. Общие требования к программным документам.
- 33 ГОСТ 19.106-78 ЕСПД. Требования к программным документам, выполненным печатным способом.
- 34 ГОСТ 19.502-78 ЕСПД. Описание применения. Требования к содержанию и оформлению.