

ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ВИРТУАЛЬНЫХ ТРЕНАЖЁРОВ ХИРУРГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Р. А. Шараева¹ [0000-0002-2359-1873], В. В. Кугуракова² [0000-0002-1552-4910],

Р. Р. Галиева³ [0000-0002-6468-2069], С. В. Зинченко⁴ [0000-0002-9306-3507]

^{1,2,3}Институт информационных технологий и интеллектуальных систем,

⁴Институт фундаментальной медицины и биологии

Казанского (Приволжского) федерального университета;

¹r.sharaeva3496@gmail.com, ²vlada.kugurakova@gmail.com,

³galievarailina@gmail.com, ⁴zinchenkos.v@mail.ru

Аннотация

Показаны достоинства симуляционного обучения в тренинге клинических навыков. Представлено, как практики, которые применяются в инвазивной хирургии, могут быть перенесены в виртуальную операционную. Рассмотрены примеры реализаций тренажёров для определения оптимальных подходов к реализации и выстраиванию оптимального процесса разработки. Как логичное развитие функционала, представлены подходы, которые смогут позволить эмулировать все практики, которые происходят при реальных операциях, в т. ч. многопользовательский режим, вариативность сценариев операций, достижение освоения мануальных техник, а также необходимость внесения инцидентов, инициирующих психологическое выгорание будущих хирургов и осознанный выбор специализации.

Ключевые слова: симуляционный тренажёр, виртуальная реальность, хирургия, медицинское образование, Unity, Unreal Engine.

ВВЕДЕНИЕ

Преобразования в современном медицинском образовании направлены на формирование у студентов навыков врача общей практики. Безусловно, лишь небольшая часть студентов в последующем посвятит себя хирургии. Однако существует ряд вмешательств, выполнить которые в экстремальных условиях обязан

врач любой специальности: навыки квалифицированной временной и окончательной остановки кровотечения, хирургической обработки ран, трахеостомия и некоторые другие экстренные вмешательства – и это предусмотрено программами обучения в высших образовательных медицинских учреждениях.

Для сохранения преемственности в преподавании изучение соответствующего предмета должно быть построено по принципу «от простого к сложному» с постоянным повторением наиболее важных разделов хирургии и отработкой практических навыков на симуляторах разной степени сложности. *«... В условиях постоянного дефицита рабочего времени и ужесточающегося медико-юридического прессинга хирургическая симуляция позволяет сократить разрыв между теоретическими знаниями и практическими навыками у интернов. Ранее инвазивные вмешательства отрабатывали при препарировании трупов и в экспериментах на животных. Хотя эти операции дают ценный опыт и не требуют сложной технологической поддержки, трупы и лабораторные животные относятся к ограниченно доступным и дорогостоящим ресурсам ...»* [1].

Развитие технологии виртуальной реальности (VR), разработка новых гарнитур, создание новых алгоритмов компьютерной графики, а также достижения тактильной обратной связи позволили создать за два последних десятилетия ошеломляющие тренажёры для повышения квалификации как нейрохирургов [2], так и других специалистов (см., например, [3–5]).

Подготовка по общей хирургии, как и в других хирургических специальностях, традиционно являлась передачей мастерства «от учителя к ученику». Но в современную эпоху доказательной медицины и медицины, основанной на результатах, акцент на безопасности пациентов и эффективности работы хирургов [6] означает, что этот подход устаревает [7]. Инструменты симуляционного обучения в хирургии являются многообещающим дополнением к другим методам обучения, позволяющим усовершенствовать хирургические навыки, снижая при этом нагрузку на преподавателей и обучающихся [8]. Можно утверждать, что симуляционное обучение лучше, чем отсутствие обучения, и не может быть большим сюрпризом; цитируя [9]: *«Нам не нужно сравнивать что-то с ничем ... Мы примем без доказательств, что некоторое образование лучше, чем его отсутствие».*

Например, в [10] показано, что примерно 4 часа обучения на VR-симуляторе значительно эффективнее, чем полдня обучения на пациентах под наблюдением врача. Вопрос уже не в том, нужно ли заниматься на тренажёрах, а в том, как проводить симуляционное обучение и как разрабатывать эффективные симуляторы.

Безусловно, эти инструменты требуют научной оценки для определения их образовательных преимуществ. Многие симуляторы были исследованы на предмет их валидности, но использование различных рамок валидности в разных исследованиях привело к неубедительным результатам, поэтому показать полную валидность во всех областях ещё предстоит.

Создание профессиональных симуляционных продуктов, которые используются как медицинскими вузами, так и медицинскими учреждениями (больницами, клиниками), является эффективным способом решения потенциальных проблем, связанных с затратами, лицензиями, логистикой и т. д. Однако нужно подчеркнуть, что *«симуляция не должна быть одноразовым учебным упражнением»* [11]. Отмечается, что обучение, когда тренировочные сессии распределены на несколько дней, более эффективно, чем массовая практика в обучающем центре. Практично, что несколько обучающихся могут использовать для обучения один тренажёр или одну виртуальную гарнитуру, а занятому (и дорогостоящему) консультанту не нужно постоянно присутствовать [12]. Направленное, саморегулируемое обучение, когда обучаемым разрешается получить свой собственный опыт и обучаться на своих ошибках, может улучшить запоминание материала по сравнению с обучением под руководством инструктора [13].

Итак, уже существует большое количество доказательств эффективности симуляционного обучения в тренинге клинических навыков. Симуляция должна быть включена в учебную программу в виде распределённых учебных занятий с возможностью направленного, саморегулируемого обучения в профессиональных учебных заведениях. Обучение на основе симуляции до получения навыков должно быть обязательным, прежде чем обучающимся будет разрешено выполнять процедуры на пациентах.

Несмотря на то, что рынок тренажёров активно развивается, и это показывают периодические обзоры [2–5], их всё ещё недостаточное количество при возрастающей актуальности их использования. Поэтому цель нашей работы состоит в

обосновании оптимальных подходов к технической реализации – для ускорения или даже автоматизации процесса разработки VR-тренажёров по обучению целого ряда важных операций.

1. СВЯЗАННЫЕ РАБОТЫ

В медицинском образовании существуют тренажёры для различных узких конкретных сфер хирургии: ортопедическая хирургия, лапароскопия, нейрохирургия и т. д. Отдельную группу образуют тренажёры по открытым операциям на внутренних органах – инвазивной хирургии.

Практики, которые применяются в инвазивной хирургии, должны быть перенесены в виртуальную операционную и реализованы как игровые (в широком понимании этого термина) механики, например:

- разрезание мягких тканей (например, кожи виртуальным скальпелем);
- расширение раны виртуальными крючками или расширителями;
- извлечение внутренних органов (например, кишечника наружу);
- пережимание тканей пациента для гемостаза;
- вправление внутренних органов внутрь;
- ушивание краев раны кетгутовой или шелковой нитью [14].

Рассмотрим, как эти и другие практики-механики реализуются в разных тренажёрах.

В рамках работ по программе повышения конкурентоспособности вузов (5/100) сотрудники научной лаборатории SIM (в фокусе практической реализации которой находится разработка симуляционных методов в биомедицине) Казанского федерального университета (КФУ), продолжив серию работ, посвященных практическому применению виртуальной реальности в образовании [15–17], в 2018–2020 годах разработали [18, 19] и в 2020 году зарегистрировали тренажёр обучения аппендэктомии [20] (VR Аппендэктомия), в 2022 году – зарегистрировали тренажёр обучения трахеостомии [21] (VR Трахеостомия), кроме того, в лаборатории заканчивается работа над VR-тренажёром обучения декомпрессионной краниотомии (VR Краниотомия). Ещё на этапе проектирования эти тренажёры проходят строгую валидацию на соответствие этапности проведения операций и применяемых техник на основании реальной медицинской практики в России (под научным руководством д. м. н. С. В. Зинченко).

Довольно большой спектр образовательных медицинских VR-тренажеров приведен в табл. 1 [22]. Упомянем некоторые из них и приведем другие решения для обучения проведения операций инвазивной хирургии, в основном, без использования гарнитур, эмулирующих тактильную отдачу:

1. **Трахеостомия** (кроме разрабатываемой в КФУ) – Самарский государственный медицинский университет (СамГМУ) в 2018 году разработал и получил свидетельство о государственной регистрации SurgeraVR – программы-симулятора открытой хирургии трахеостомии с применением технологии виртуальной реальности. С реализацией можно познакомиться на видео в их магазине SimMed (<https://sim-med.ru/simulator/vr/tracheostomy-and-conicotomy/>). В качестве удачных механик, реализованных в продукте, стоит отметить:

- реалистичное отображение рук пользователя, демонстрирующее верный хват инструмента;
- для визуализации расширения ран используются манипуляции с процедурной полигональной сеткой в реальном времени, что несомненно является плюсом (однако из-за недостаточной графической детализации теряется иммерсивность).

2. **Краниотомия** (кроме разрабатываемой в КФУ) – СамГМУ представляет Аппаратно-программный комплекс для 3D-симулятора в виртуальной реальности «Трепанация черепа – доступы к основанию черепа», также нужно отметить уникальные тренажеры для отработки техники выполнения хирургических вмешательств на мозговом отделе черепа и головном мозге, имитирующие реальную топографо-анатомическую среду:

- Санкт-Петербургский медицинский университет им. И.И. Мечникова (СЗГМУ) разработал симуляционный комплекс для освоения мануальных хирургических навыков на мозговом отделе черепа [23].
- Пермский государственный медицинский университет курирует разработку тренажера, на котором врачи смогут отрабатывать технику трепанации черепа [24]. Эта работа интересна указанием основных этапов, которые легко перенести в виртуальную реальность.

3. **Ортопедия.**

- Представлена американскими образовательными VR-тренажерами Osso

VR (<https://www.ossovr.com/>) для изучения этапов сложных ортопедических процедур, требующих множества инструментов, в том числе точной установки штифтов/винтов, необходимых для многих ортопедических процедур. Важность точного чрескожного введения штифта особенно актуальна при фиксации соскальзывающего капитального эпифиза бедра. Этот симулятор отличается хорошей графикой, реалистичными моделями врачей и различными механиками – например, вкручиванием хирургических инструментов. Удачно выглядит возможность сравнения снимков костей пациента, обеспечивающая большее вовлечение в процесс. В [25] проведено сравнение производительности начинающих хирургов-стажёров, которые обучались с использованием симуляции в VR, и тех, кто не имел доступа к VR-тренингу и изучал только стандартное руководство по технике проведения.

- Fundamental Surgery (<https://fundamentalsurgery.com/>), кроме ортопедии, представляет целый комплекс VR-тренажёров обучения проведения различным операциям (например, в офтальмологии). Их решения особо интересны нам тем, что предлагают удалённый многопользовательский режим, позволяющий отработку ассистирования и совместного принятия решения – мультиплеер (см. п. 4.1), организованный с помощью CollaborationVR.

- СамГМУ также анонсировал продолжение собственных разработок в направлении симуляции проведения хирургического лечения переломов и заболеваний костей (остеосинтеза и резекции остеосаркомы).

- Реалистичный опыт того, с чем сталкиваются хирурги-ортопеды в реальной операционной, представляют VR-тренажёры канадской компании PrecisionOS (<https://www.precisionostech.com>) [22].

4. **Неотложная помощь.** Специалисты РНИМУ им. Н.И. Пирогова представили несколько VR-тренажёров: (1) по оказанию скорой и неотложной помощи в санитарном автомобиле скорой медицинской помощи (6 клинических ситуаций) и (2) по отработке алгоритма оказания неотложной хирургической помощи [26].

5. **Эндоскопия.** СамГМУ разработал VR-тренажёр для проведения эндоскопических операций [27]. Фокус этого тренажёра: реализация тактильной обратной связи, чем и обусловлено сотрудничество с Самарским электромеханическим заводом корпорации РосТех. Стоит подчеркнуть интересную практику использования имитаторов реальных рентгенографических инструментов.

6. **Сердечно-легочная реанимация и экстренная рестернотомия** после кардиохирургических операций – рассмотрены два клинических сценария (шоковая и нешоковая остановки сердца) [28].

2. ВИРТУАЛЬНАЯ ОПЕРАЦИОННАЯ

Данные объективных показателей эффективности указывают на то, что VR-тренажёры могут улучшить освоение хирургических навыков, особенно по сравнению с тренировками без использования VR. Например, в предварительных исследованиях [29–33] такой VR-тренинг привел к значительному улучшению времени до завершения и эффективности движений. В качестве наиболее часто обсуждаемого недостатка VR-тренажёров называют (см., например, [29, 31, 33, 35–38]) отсутствие реалистичной тактильной обратной связи, что может ограничить передачу навыков пациентам. Однако реалистичные слуховые стимулы могут дополнить такое мультисенсорное обучение в специальностях, связанных со сверлением кости (например, в ортопедической хирургии, нейрохирургии и отоларингологии). В [39] показано, что слуховые стимулы могут внести такой же вклад, как и тактильные, в контроль экспертами-хирургами глубины погружения при бикортикальном сверлении кости. Рассмотрение возможности улучшения тактильной и слуховой обратной связи может повысить эффективность VR-тренинга. Более того, создание гибкости в симуляциях, включая вариации сложности или интраоперационные осложнения, может тренировать другие ключевые навыки в хирургии, такие как способность принимать решения [32, 35].

2.1. Постановка задачи от практикующего врача-хирурга и лектора

Чтобы виртуальный тренажёр соответствовал корректным оперативным действиям, сценарий должен быть основан на протоколах и стандартах проведения операций. Несмотря на чёткий регламент, у каждого хирурга или медицинского учреждения по мере приобретения опыта возникают свои подходы для улучшения процесса операции. Таким образом, наше решение основано на операционной практике, выработанной в Университетской клинике КФУ.

По нашему мнению, Виртуальная операционная должна включать в себя следующий комплекс виртуальных операций, необходимых для освоения студентами

медицинских высших учебных заведений, как обязательная практика, так как зачастую они не получают такого опыта во время очного обучения по учебной программе: *клиника перфоративной язвы желудка, холецистэктомия, кесарево сечение, катетеризация мочевыводящих путей у мужчин, коникотомия, аппендэктомия, трахеостомия, трепанация черепа, в частности, декомпрессионная краниотомия*. Три из последних упомянутых операций уже реализованы и представлены ниже. Как дополнительные главы комплекса могут быть разработаны также другие операции, которые необходимо освоить всем врачам-практикам хотя бы поверхностно, например, *проведение подкожных и внутривенных инъекций, ушивание сложных ран, остановка кровотечения* и т. д.

2.1.1. Аппендэктомия: фокус обучения

Операция аппендэктомии заключается в отсечении воспаленного аппендикса. В реализованном нами решении VR Аппендэктомия [20] операция выполняется разрезом через точку Мак Бурнея по следующему сценарию:

1. Обработка антисептиком операционной зоны: в качестве антисептика используется йодный раствор.
2. Рассечение кожи и подкожной клетчатки через точку Мак Бурнея.
3. Рассечение апоневроза.
4. Расслоение мышц живота.
5. Рассечение поперечной фасции и брюшины.
6. Извлечение аппендикса: аппендикс допускается извлекать окончательным зажимом во избежание повреждения кишечника.
7. Отсечение брыжейки аппендикса.
8. Перевязка основания аппендикса: зажать основание аппендикса кровоостанавливающим зажимом, чтобы не было рецидива аппендицита.
9. Перевязка основания брыжейки с прошиванием: обязательно нужно закрепить нить, чтобы снизить риск рецидива.
10. Наложение серозно-мышечного кисетного шва, отступив от основания аппендикса 1,5 см.
11. Удаление аппендикса: возрастает риск нагноения послеоперационной раны и перитонита в случае, когда выше места перевязки аппендикса не был наложен зажим.

12. Обработка йодом культи аппендикса: если пропустить этот шаг, возможен культевой абсцесс и перитонит.

13. Вправление отростка внутрь слепой кишки.

14. Наложение Z-образного шва.

15. Ревизия 80 см тонкой кишки на предмет Меккелева дивертикула.

16. Вправление слепой кишки.

17. Ушивание фасции живота.

18. Ушивание мышц.

19. Ушивание апоневроза.

20. Ушивание кожи и подкожной клетчатки.

Во время выполнения операции необходимо проводить гемостаз, чтобы не допустить удлинения продолжительности операции из-за кровотечения и отсутствия обзора, а также нагноения послеоперационной раны.

2.1.2. Трахеостомия: фокус обучения

Трахеостомия — это экстренная операция, выполняемая на шее и заключающаяся во введении в трахею специальной трубки, облегчающей дыхание пациента. В реализованном нами решении VR Трахеостомия [21] операция выполняется пошагово, как и в предыдущем случае (см. п. 2.1.1) и состоит из следующих шагов:

1. Обработка антисептиком: выполняется классическая обработка йодным раствором.

2. Подготовка пациента: лицо пациента необходимо накрыть стерильной салфеткой, поверх которой нужно покрыть всё тело пациента покрывалом с вырезом для операционной зоны.

3. Местная анестезия области шеи: в качестве анестезии используется концентрированный 2% раствор лидокаина.

4. Оперативный доступ: нужно сделать продольный разрез от уровня перстневидного хряща до яремной вырезки.

5. Мобилизация передних мышц шеи с обнажением щитовидной железы.

6. Обработка перешейка щитовидной железы и сосудов.

7. Местная анестезия слизистой трахеи.

8. Вскрытие трахеи с резекцией полукольца: отсекается треть четвертого полукольца трахеи.

9. Санация катетером для бронхиального дерева 3 мм.
10. Фиксация кожи к трахее, ушивание и герметизация раны.
11. Установка трахеостомической трубки и перевязка нитей.

Так как операция выполняется на шейном отделе, важно добавить звуки откашливания пациента и визуальные эффекты выделения слизи.

2.1.3. Декомпрессионная краниотомия: фокус обучения

В случаях, когда у пациента в мозговом отделе возникают гематома или опухоль, декомпрессионная краниотомия позволяет снизить давление и ослабить боли пациента. В реализованном нами решении VR Краниотомия (находится на стадии регистрации) операция включает в себя следующие этапы:

1. Укладка пациента: пациент должен лежать на боку, чтобы хирургу была доступна височная часть головы.
2. Обработка антисептиком операционного поля: в качестве антисептика используется классический йодный раствор.
3. Подготовка пациента: фломастером обозначается линия разреза на височной части пациента, самого пациента накрывают стерильным покрывалом.
4. Рассечение кожно-апоневротического лоскута.
5. Гемостаз краев раны клипсами.
6. Рассечение височной мышцы по ходу волокон и ее оттягивание кпереди и книзу.
7. Инфильтрация и отслаивание надкостницы от кости.
8. Наложение фрезевых отверстий: выполнение возможно и перфоратором, и коловоротом.
9. Резекция костного лоскута колостомом или пилой Джильи.
10. Резекция твердой мозговой оболочки.
11. Ушивание надкостницы, височной мышцы и кожи головы.

Наше решение рассматривает непосредственно краниотомию, однако операция может включать в себя и шаги, связанные с удалением новообразований или гематом.

3. Наш опыт: проблемы и решения

Для реализации наших тренажёров, разрабатываемых на протяжении некоторого времени, были использованы как разные технологии, в частности, разные системы разработки интерактивных приложений, или *игровые движки* (от англ. game engine), так и разные подходы, которые позволили выстроить финальный процесс разработки, или *пайплайн* (от англ. pipeline), который мы планируем применять при создании следующих тренажёров из комплекта обязательных операций для ознакомления студентов-медиков. Во время выработки этого пайплайна перед нами встали следующие вопросы.

3.1. Можно ли создать универсальный конструктор?

Изначально был выработан подход для реализации виртуальных операций, представляющий собой универсальный конструктор, который содержит в себе различные уникальные механики. Среди них можно выделить разрезание тканей тела в произвольных местах, ушивание рассечённых тканей, обработку поверхностей антисептиком. Но такое решение требует обработки в реальном времени, что вызывает чрезмерную нагрузку на аппаратные мощности [40].

Так как человеческое тело содержит много слоёв плоти (кожа, подкожная клетчатка, апоневроз, мышцы и др.) и внутренних органов, реализация решения с возможностью проведения операции на всём теле в реальном времени достаточно трудоёмка. Поэтому акцент в обучении был смещён в сторону пошагового выполнения действий на определённом участке тела по строгому линейному сценарию.

3.2. Влияние игровых движков на пайплайн разработки

Большинство источников (см., например, [41, 42]) утверждает, что в разработке приложений расширенной реальности (XR) предпочтительнее использовать Unity (<http://www.unity.com/>), отмечая при этом, что выбор игрового движка – это лишь первый шаг. Поэтому первые наработки в реализации виртуальных операций (см. п. 2.1.1) были сделаны именно на этом движке [19]. Так как качество графики для нас было неудовлетворительным, было принято решение следующую операцию (см. п. 2.1.2) реализовать на альтернативном движке. Наш выбор был сделан

в пользу движка Unreal Engine (<https://www.unrealengine.com/>), который отличается огромным преимуществом в работе с новейшими графическими технологиями, предоставляя высокий уровень реализма без дополнительных работ по настройке и наладке процесса графического рендеринга, в то время как в стандартной поставке Unity имеет весьма скучную графику, а чтобы сделать очень оптимальную и реалистичную 3D-картину, необходимо приложить достаточно много усилий. Кроме того, последние версии движка Unity стали отличаться низкой стабильностью ключевых компонентов [43].

Также преимуществом движка Unreal Engine является встроенная система визуального скриптинга Blueprints. Этот инструмент позволяет в короткие сроки вносить поправки и редактировать классы объектов.

3.3. Оптимальный пайплайн, выработанный нами

Апробация движков показала очевидные преимущества движка Unreal Engine (см. п. 3.2), поэтому последующие операции, входящие в пакет обязательных операций, например, п. 2.1.3, были реализованы именно на этом движке.

Сборка приложений принимает шаблонный характер. Созданная архитектура тренажёра, трехмерные модели окружения, тела пациента, его внутренних органов, дублирующиеся анимации тканей пациента, пользовательский интерфейс могут быть использованы повторно. Однако уникальные разрезы и манипуляции должны быть интегрированы отдельно. Таким образом, наработанные механики и артефакты образуют некую библиотеку данных, к которым можно обратиться отдельно, не создавая большую нагрузку на аппаратные мощности, как в случае п. 3.1. Так как разработка моделей и трехмерных анимаций ведется отдельно, доступно лёгкое портирование¹ на другие гарнитуры виртуальной реальности, что решает проблему устаревания аппаратного и программного обеспечения.

Каждая виртуальная операция представляет собой отдельное приложение. Сценарий виртуальной операции выполняется пошагово и дополняется подсказками: для каждого шага подсвечивается инструмент, который необходимо взять;

¹ Портирование (англ. porting) или портация — адаптация программного обеспечения для работы в другой среде, отличающейся от той, под которую ПО была изначально написано, с максимальным сохранением её пользовательских свойств.

после взятия инструмента «в руку» появляется полупрозрачный силуэт инструмента над телом пациента, показывающий место для установки инструмента; имеются визуальная подсказка линии разреза; отображение названия инструмента при наведении на объекты операционной. Для повышения иммерсивности [15] в тренажёры добавляются звуковые эффекты откашливания пациента, открывания/закрывания инструментов, звуки оборудования и фоновый шум.

Тело пациента сохраняет реальные размеры, однако внутренние органы могут быть слишком мелкими для освоения правильности манипуляций. Для решения этой проблемы в приложение интегрировано дополнительное окно, отражающее ход операции в увеличенном виде (см. рис. 1).

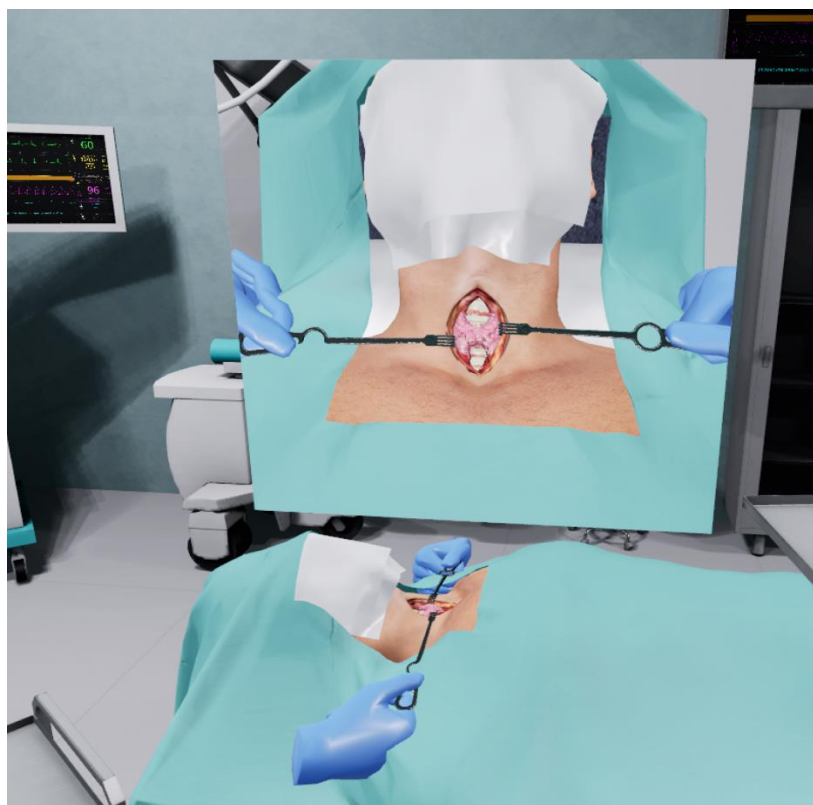


Рис. 1. Увеличенное изображение операционного поля

3.4. Симуляция разрезания тканей и осмотра внутренних органов

В зависимости от проводимой инвазивной операции изменяется расположение разрезов. В реализованном решении выполняется симуляция определенного разреза, через который пользователь получает доступ к другим слоям тела пациента и его внутренним органам. Такой подход позволяет повысить иммерсивность

обучения, готовя будущего хирурга к поведению мышечной, жировой ткани и других слоев человеческой плоти (далее – ткань), к появлению кровянистых выделений и слизи.

Разрезание ткани реализовано с помощью блендшейпов – 3D-моделей идентичной топологии [44]. Для этого сначала проводятся подготовительные операции по созданию блендшейпов: создается дубликат модели ткани, затем вершины дублированной модели переносятся для создания необходимой итоговой модели, например, разрезанной скальпелем. После этого 3D-редактор предлагает использовать управляющие ползунки для каждого из блендшейпов и установить ключевые кадры, зафиксировав значения блендшейпа в нужный момент времени – так создаются анимации.

3.5. Реализация механик операций

Система визуального скриптинга Blueprints позволяет создать множество разных объектов, которые наследуются от одного класса-родителя. Кроме того, движок включает в себя шаблон для VR, содержащий базовые функции телепортации, функции захвата и прикрепления предметов к руке и другие. Базовой отправной точкой программы стал такой шаблонный проект, из которого были удалены все механики, ненужные для проекта [45].

Основными объектами сцены являются хирургические инструменты. Класс каждого такого инструмента наследуется от базового класса инструмента *TMedicalTool* и содержит в себе компонент *TAnimationComponent*, который управляет анимациями: хранит в себе необходимые ссылки на анимационные ассеты, проигрывает с нужной скоростью, подписывается на события объектов класса *UAnimNotify* [46]. Также каждый класс инструмента реализует интерфейс *PickupActor*, ответственный за взятие в руки и опускание из рук.

Скелетом программы, отвечающим непосредственно за ход сценария, является класс *TScenarioManager*. Он содержит в себе компонент *TSequenceComponent*, который хранит последовательность инструментов: какие типы хирургического прибора за какими должны следовать – и дополнительные сведения, касающиеся непосредственно инструмента: кто его должен взять (хирург или ассистент), зависят ли данные типы инструмента от какого-то другого (например, иглодержатель и нить), номер шага.

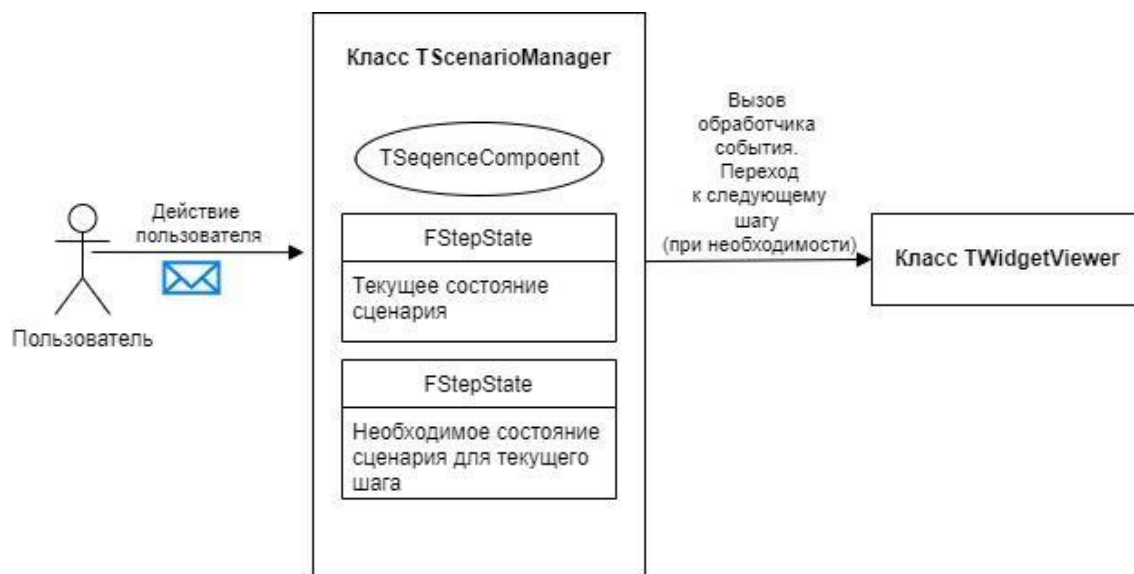


Рис. 2. Общая схема взаимодействия класса сценария с доской

Сам класс *TScenarioManager* содержит в себе массив структур *FToolstepInfo*, которые хранят состояния и действия для каждого шага. При переходе к каждому новому шагу из последовательности извлекается структура *FToolstepInfo* для следующего шага. *TScenarioManager* реагирует на все действия и события, происходящие в сценарии: поднятие инструмента, выбрасывание инструмента в урну, конец проигрывания анимации, – и в ответ на них вызывает соответствующие функции: проигрывание анимации, создание инструментов-подсказок (если это требуется в структуре *FToolstepInfo* для данного шага) и т. д.

Кроме того, класс сценария хранит в себе состояние сценария, представленное в виде структуры *FStepState*: информацию о том, какие действия уже были совершены на текущем этапе. Если состояние сценария соответствует конечному состоянию данного шага (конечное состояние сценария тоже хранится в структуре *FToolstepInfo*, т. е. структура *FToolstepInfo* содержит в себе структуру *FStepState*), то данный этап считается завершенным, и сценарий переходит к следующему шагу (см. рис. 2), оповещая об этом пользовательский интерфейс со сценарием (объект класса *TWidgetViewer*).

Такая тактика позволяет в короткие сроки добавить новые шаги в сценарий или изменить последовательность шагов сценария.

3.6. UX/UI

Создание интерфейса пользователя в VR имеет серьезные трудности. Реализованные традиционные виртуальные пользовательские интерфейсы, «привязанные» к голове (когда голова перемещается, интерфейс следует за ней), могут вызвать дискомфорт, поскольку у пользователя возникают проблемы со зрительным восприятием. Более того, элементы интерфейса, расположенные по краям поля зрения, менее читаемы, чем те, что расположены в центре, поскольку самое четкое изображение находится в центре взгляда пользователя [47].

В связи с рядом трудностей реализации традиционного пользовательского интерфейса в настоящем проекте интерфейс сгенерирован на трехмерном объекте, помещённом в игровом мире. Трехмерный объект, играющий роль пользовательского интерфейса, представляет собой доску (см. рис. 3), на которой расположены разные элементы интерфейса: (1) полоса прокрутки, содержащая шаги операции, (2) кнопки, позволяющие листать этапы сценария операции, а также выйти из приложения. Взаимодействие с интерфейсом происходит посредством (3) VR-указки: пользователь наводит указку на нужный элемент и подтверждает нажатие кнопкой контроллера.

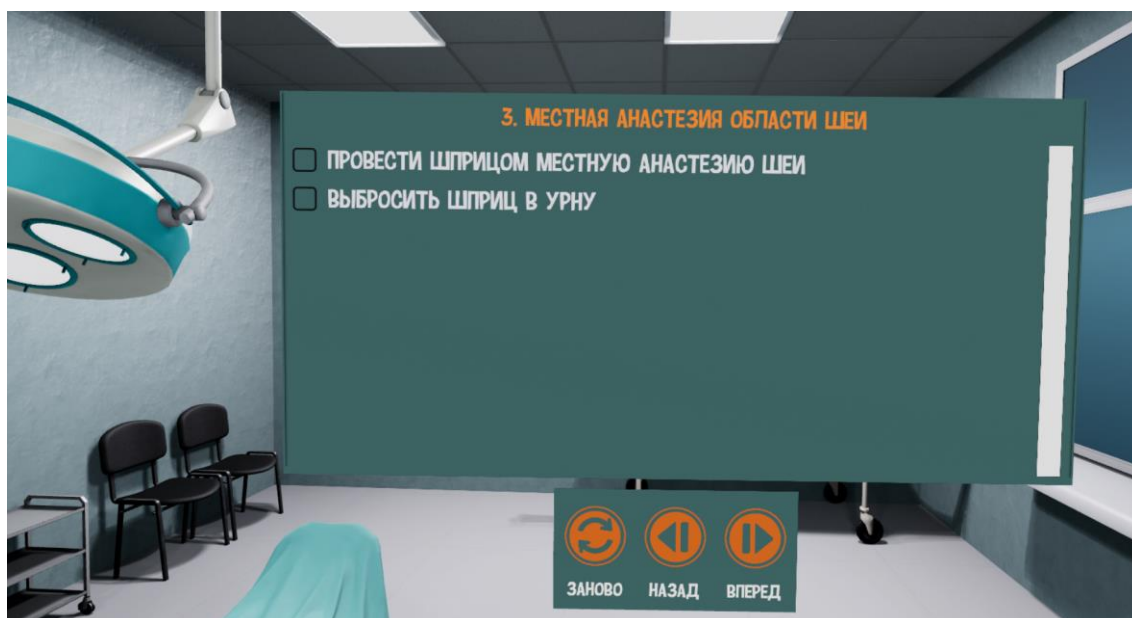


Рис. 3. Доска, играющая роль пользовательского интерфейса с кнопками

Для создания такой модели взаимодействия были использованы встроенные средства игрового движка Unreal Engine:

- *UMG* – инструмент, позволяющий создавать иерархические пользовательские интерфейсы и определять их функционал,
- *3D Widget Component* – инструмент, позволяющий показать *UMG*-виджет в 3D пространстве,
- *Widget Interaction Component* – инструмент, позволяющий игроку взаимодействовать с виджетами в 3D пространстве.

Подсказки на инструментах, появляющиеся в процессе операции, представляют собой тот же самый *UMG*-виджет, отображенный на сцене с помощью *3D Widget Component*, но пользователь никак не взаимодействует с ними напрямую: он лишь может влиять на их появление и исчезновение посредством наведения контроллера на нужный инструмент (см. рис. 4).

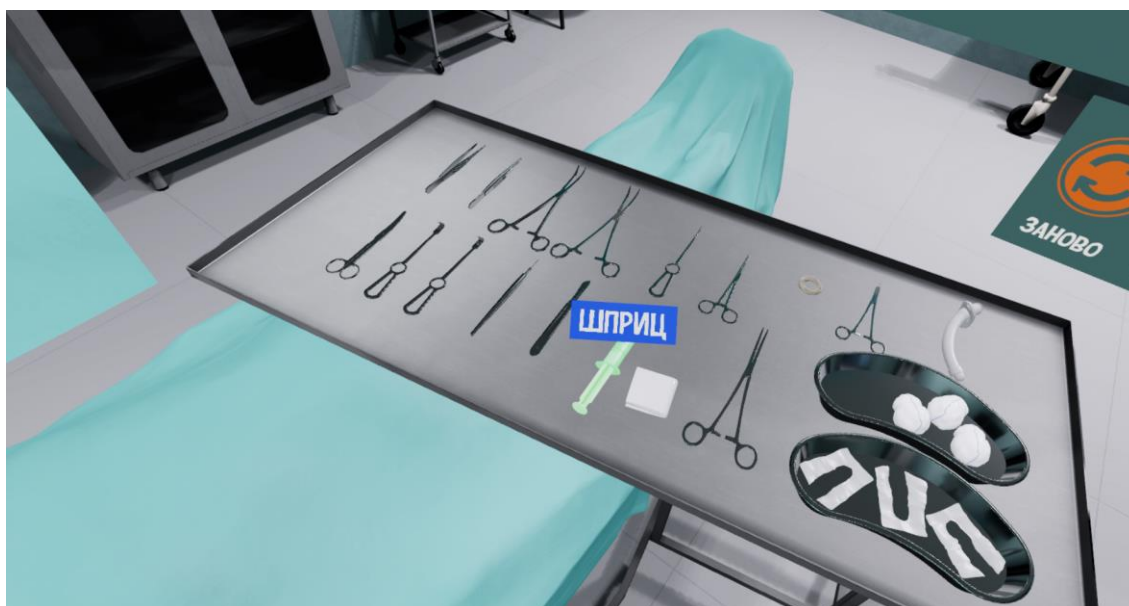


Рис. 4. Подсветка инструмента, появляющаяся в ходе сценария

3.7. Ассистирование

Не все шаги операции возможно выполнить в одиночку, поэтому в предложенном нами решении роль ассистентов выполняют виртуальные руки, которые появляются в ситуациях, когда нужно придержать инструменты. Несмотря на то, что определенные шаги в реальных операциях выполняются только ассистентами, наш подход знакомит будущего хирурга и с этими шагами для полноценного освоения тонкостей проведения операции [48].

На рис. 5 представлен момент участия при проведении операции в тренажёре VR Аппендэктомия нескольких виртуальных ассистентов на этапе вырезания аппендикса (*скальпель* держится контролером активного пользователя-студента, четыре *зажима Микулича* фиксируют фасцию и брюшину с четырех краёв): четыре руки отображают участие двух других ассистентов. Первый ассистент *окончатыми зажимами* придерживает правой рукой аппендикс, а левой рукой – слепую кишку, второй ассистент держит *кровоостанавливающие зажимы* правой рукой на основании брыжейки, левой рукой – над местом перевязки.

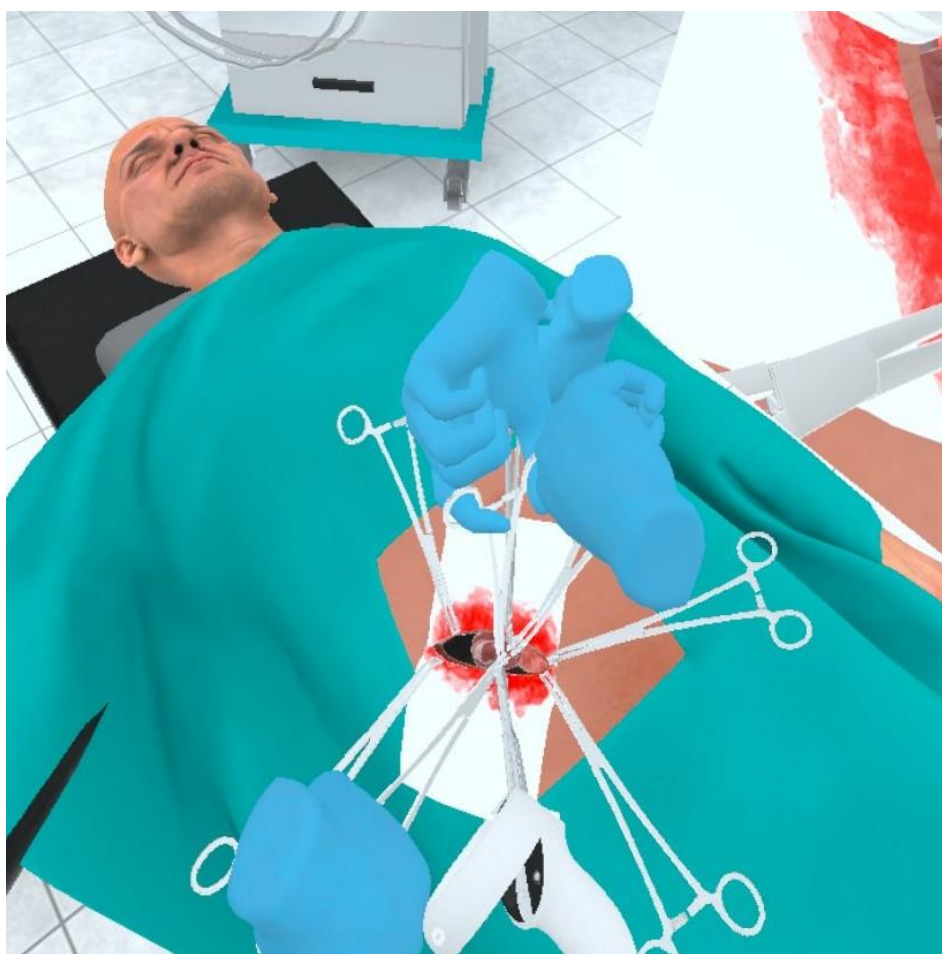


Рис. 5. Несколько виртуальных ассистентов помогают провести резекцию аппендикса

На рис. 6 представлен момент участия двух виртуальных ассистентов при проведении операции в тренажёре VR Трахеостомия, на других этапах проведения операции они помогают при мобилизации передних мышц шеи или перешейка от трахеи, в наложении кровоостанавливающих зажимов и т. п.

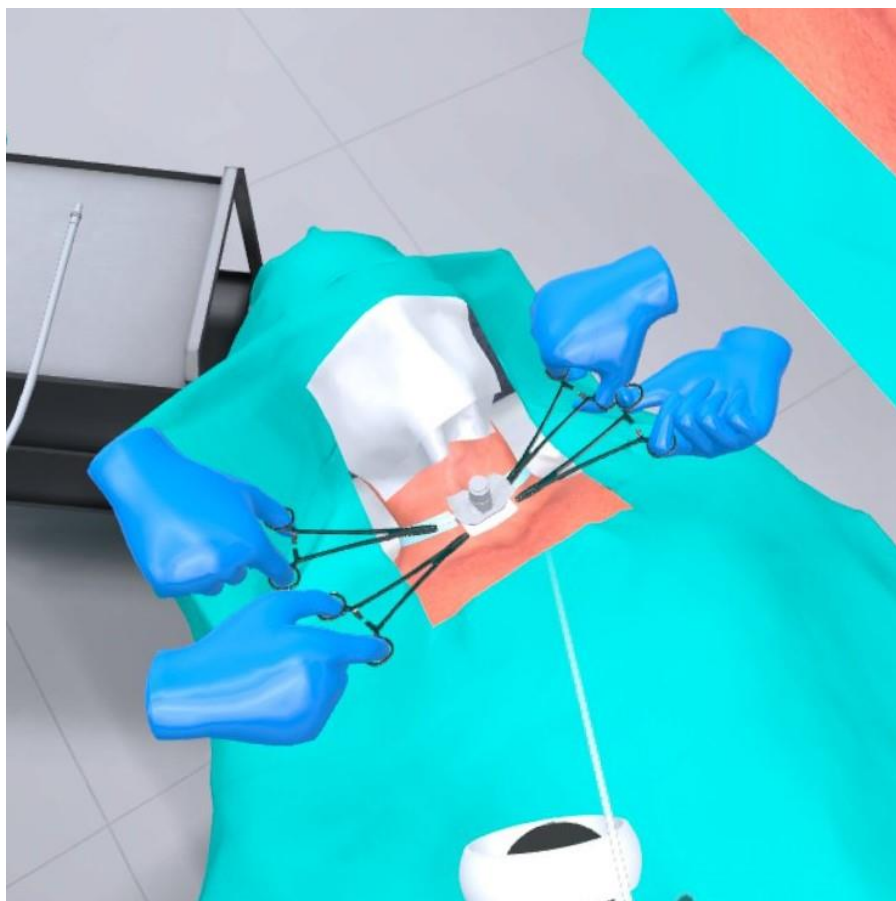


Рис. 6. Несколько виртуальных ассистентов помогают при установке трубки

3.8. Управление проектом и автоматизация рутин

Разработка виртуальных тренажеров относится к сфере разработки компьютерных игр, для которой характерны разделение команды по специализациям, распределение проектных задач по исполнителям в зависимости от их навыка, сильная связность между задачами. За разработку трехмерных моделей в проекте отвечали 3D-дизайнеры, за создание анимаций — аниматоры, а интеграцией моделей, анимаций и сборкой сценариев занимались программисты. Так образовалась цепочка событий: разработка модели→анимация модели→интеграция.

С учетом этих аспектов необходима автоматизация распределения задач по ролям с учетом последовательности выполнения для сокращения рутины менеджмента. Поэтому в управлении проектом по разработке виртуальных хирургических анимаций была использована система таск-трекинга для узкоспециализированных сфер разработки [49, 50]. При создании задач в таск-трекере проектным менеджером указывались метки, определяющие исполнителя из проектной команды, а

настройка зависимостей меток автоматизировала последовательное выполнение задач.

При имеющемся выстроенном процессе реализации проекта автоматизация передачи артефактов и дополнительных комментариев между группами специалистов становится важным условием корректной интеграции. Функции сохранения результатов и автоматического сбора цепочки артефактов, реализованные в таск-трекере, снизили риск неверной интеграции выработанных артефактов.

4. Развитие продукта

Тренажёр, выработанный благодаря оптимальному пайплайну работы, достаточен для приобретения первичных навыков проведения операции, так как разработан как доступный симулятор высокой достоверности. Таким образом, он является сильным кандидатом для выполнения требований институционального симуляционного обучения в качестве дополнения к учебной программе без исчерпания финансовых ресурсов. Но для повышения эффективности обучения и улучшения продукта необходимо повторить, эмулировать все практики, которые происходят при реальной операции, и для этого мы видим следующее логичное развитие функционала.

4.1. Реализация мультиплеера

Для совершенствования непрерывного медицинского образования необходимо расширить функционал многопользовательским режимом [51], позволяющим: (1) полноценно отрабатывать процедуры ассистирования; (2) участвовать в удаленных тренингах консилиумов для принятия решения на основе доступных медицинских изображений и свободного обсуждения; (3) отрабатывать совместные действия хирургических бригад вне зависимости от места нахождения обучающихся.

Для разработки многопользовательского режима или *мультиплеера* (от англ. multiplayer) можно применять в случае использования игрового движка Unity связку реализации микросервисов на Golang [52], которая представляется удачной для решений, в которых происходит передача данных в реальном времени, когда даже минимальная задержка может помешать погрузиться в процесс обучения, а

для игрового движка Unreal Engine стоит использовать подход использования одного из клиентов как сервера.

4.2. Режим экзамена и вариативность сценариев операций

Наличие готового сценария операции позволяет внести изменения в сценарий с целью тестирования знаний будущего хирурга. Разработанный «эталон» пошагового выполнения предполагает использование определенных инструментов. Однако одни и те же шаги операции могут выполняться несколькими допустимыми и недопустимыми инструментами. К примеру, наложение зажима Микулича вместо кровоостанавливающего зажима на кишечник может привести к его повреждению, а отрезание нитей допустимо любыми ножницами.

Порядок действий операций также может быть вариативным. При послойном разрезании слоев тела пациента такая вариативность мало реализуема, но пропуск определенных действий, например, гемостаза, ушивания тканей может привести к нагноению послеоперационной раны, в худшем случае — к смерти пациента.

Таким образом, во время режима экзамена запланирован контроль использования инструментов, пропуска шагов, а также критичности действий пользователя, отклоняющихся от традиционного подхода.

Итак, необходимо использовать потенциал Виртуальной операционной для применения в качестве инструмента объективной оценки для специальностей, основанных на конкретных процедурах, возможно, для дополнения сертификационных экзаменов хирургических советов. Симуляторы должны работать в контексте целостной учебной программы, тогда при долгосрочной интеграции в реальное обучение можно оценить их истинную эффективность [53].

4.2.1. Контроль процесса обучения

Моделируемая медицинская или хирургическая задача генерирует большое количество данных о том, как пользователь взаимодействует с моделируемым сценарием. Эти данные могут включать как базовые измерения, такие как, например, позиционирование хирургического инструмента, и более сложные измерения, такие как вращение инструмента, силы, приложенные к анатомическим структурам, или объем удаленных анатомических структур.

В [54] представлена прозрачная структура машинного обучения для создания образовательной платформы для сложных психомоторных задач. Для выбора метрик, отражающих текущие показатели опыта в области хирургии, необходимо опираться на опыт практикующих хирургов, чтобы выбрать то, что отражает эффективность работы хирурга при выполнении имитационной задачи. Полезно интегрировать чужие наработки в более ранних симуляционных решениях или попытаться разработать уникальные и ранее неизвестные метрики, способные дифференцировать такой опыт. В хирургическом контексте применение силы инструмента обучающимся трудно оценить инструкторам-хирургам. Компьютерные платформы способны извлекать как позиционные, так и качественные компоненты применения силы обучаемыми [55, 56], что позволяет количественно оценить эти новые метрики хирургической деятельности. Механизм создания метрик может дать новое представление об основополагающих конструкциях опыта для используемого хирургического сценария. Необходимо приложить усилия для создания как можно большего количества различных метрик, чтобы попытаться отразить многочисленные аспекты данного технического навыка.

Затем набор метрик должен быть сужен до тех, которые являются значимыми для алгоритма машинного обучения [57]. Для отбора метрик можно использовать несколько методов (см., например, [58, 59]). В [54] описана нейрохирургическая модель, применяющая 4 метрики (2 метрики безопасности и 2 метрики движения), веса которых несут информацию об относительной важности каждой метрики для процесса принятия решений модели [60, 61]. Метрика, соответствующий вес которой больше, будет играть большую роль в процессе принятия решений алгоритмом. Хотя алгоритм оценил метрику «расстояние до наконечника инструмента» как наиболее важную, авторы решили проконсультироваться с опытными нейрохирургами, чтобы определить, какие метрики будут наиболее важными для обучения в первую очередь. После консультации метрики безопасности были признаны более важными, чем метрики движения [62].

Следуя принципам теории когнитивной нагрузки [63], необходимо ограничить объем информации, предоставляемой пользователю, чтобы облегчить обучение, что достигается путем разделения метрик на группы [64], при этом обратная связь предоставляется поэтапно.

Цифровые платформы становятся всё более распространенными компонентами образовательных парадигм [65]. Однако исследования, связанные с использованием технологий в высшем образовании, выявили, что основными негативными эмоциями, испытываемыми студентами, являются пренебрежение, разочарование, неуверенность, потребность в подтверждении и дискомфорт [66]. Считается, что эти проблемы вызваны «отсутствием обратной связи или неправильным взаимодействием». А концепция *прозрачности оценивания* является центральной для решения этих проблем.

4.3. Достижение иммерсивности в интерактивном взаимодействии

В [67] проведены эксперименты в VR, доказывающие субъективный характер иммерсивности виртуальной среды, предложены подходы к оценке её уровня и связанных с ним степени вовлеченности пользователя и оценки эффективности его обучения. В применении этих подходов к комплексу Виртуальной операционной среды стоит выделить необходимость высокой реалистичности отображения процессов проведения хирургической операции: симуляции поведения слоев человеческой плоти при разрезании, отодвигании, сшивании и т. п. и поведения жидкостей организма, например, истечения крови.

Пока почти нигде (см. в п. 1 симулятор трахеостомия (СамГМУ) и симуляторы лапароскопии (Эйдос), где реализуются подхватывание манипуляторами плоти, надрезание, отодвигание в режиме реального времени) не используется полная эмуляция физических законов (Гука, тяготения и др.), и это следующий этап для достижения иммерсивности в интерактивном взаимодействии. Разрезание меша [68] в режиме реального времени – в общем случае уже решённая задача.

4.4. Дооперационное прогнозирование осложнений

Неизбежным спутником хирургии являются различные осложнения, возникающие в послеоперационный период. Они значительно ухудшают результаты хирургического лечения, увеличивают летальность, приводят к существенному увеличению сроков госпитализации пациентов и общих затрат на лечение. Как одна из безусловных практик в предоперационном периоде хирург (и анестезиолог), несмотря на возможный жесткий цейтнот, обязаны детально ознакомиться с состоя-

нием больного и провести его подготовку, направленную если не на полную нормализацию всех функций, то хотя бы на устранение наиболее опасных нарушений деятельности жизненно важных органов и систем. Одним из вариантов обучения в виртуальной операционной должна стать отработка такого сценария предоперационного анализа в режиме решения *случайным образом генерируемых проблем*. Это задача отдельного этапа VR-тренажёра для каждой из операций.

4.5. Проработка осложнений во время операции

Но возникают осложнения и во время операции, которые не были предусмотрены стандартным протоколом её проведения. Для выработки у студента быстрого принятия решений при возникающих вызовах во время прохождения им этапов операции, возможно уже отточенных в совершенстве, нужно включить режим проработки осложнений. Педагогически верно, чтобы они тоже были случайными и о них не было специального оповещения. Особо интересно реализовать каскадное наращивание проблем, если не было вовремя применено нужное ключевое решение, вплоть до летального исхода виртуального пациента. Казалось бы, точечными сценариями сложно описать всю возможную проблематику, но и проработка в виртуальной реальности вчерне важнейших осложнений уже будет стоить спасения чьих-то реальных жизней.

4.6. Достижение освоения техник разрезания плоти и наложения швов

Реализованные сценарии операций показывают корректное место рассечения и технику разрезания тканей и наложения швов. При использовании гарнитуры виртуальной реальности в стандартной поставке и применении контроллеров нельзя предложить контроль отработки мануальных техник. Использование цифровых перчаток позволяет эмулировать обратную тактильную связь – как от тяжести инструментов, так и от ощущения плоти пациента.

В КФУ существуют собственные подходы (см., например, [69–71]) к созданию цифровых перчаток и использующих их приложений. Такие перчатки ещё не позволяют получить полноценную обратную связь, но развитие этого направления разработки дополнительной периферии виртуальной реальности перспективно для усиления освоения соответствующих техник хирургии на этапе дооперацион-

ного обучения. Например, экзоскелетные перчатки Dexmo² [72] китайской компании Dextra Robotics с тактильной обратной связью (по силе хвата) способны передавать физические ощущения от взаимодействия пользователя с виртуальными объектами, несуществующими в реальности.

4.7. Психологическая подготовка студента

Медицинское образование эволюционировало со времен традиционного метода обучения «*See One, Do One, Teach One*» [7]. Возрастающая роль симуляции должна помочь повысить эффективность приобретения навыков [73]. Хотя отчасти эта тенденция может быть обусловлена сокращением сроков обучения и рабочего времени, в конечном итоге речь идет о пациентах и их жизнях. Структурированные подходы к обучению оперативным навыкам и тщательный контроль со стороны более старших коллег по мере того, как стажер переходит от новичка к эксперту, должны позволить снизить частоту осложнений, когда стажеры оперируют как в качестве основного хирурга, так и в качестве ассистента. Однако, несмотря на хорошую подготовку, когда стажер участвует в реальном уходе за пациентом, неизбежно возникает эмоциональная нагрузка, когда всё идёт не так, как надо. Осложнения неизбежны вне зависимости от опыта, поскольку «хирургия – суровый мастер». Эта прописная истина часто применяется к любой дисциплине, требующей сложных знаний, навыков и принятия решений, что, безусловно, включает все хирургические специальности.

Авторы [74] обнаружили, что инциденты, связанные с безопасностью пациентов, «могут иметь глубокие и длительные последствия для вовлеченных в них медицинских работников», и обсудили концепцию «феномена второй жертвы», когда специалисты испытывают психологический ущерб после инцидентов, связанных с безопасностью пациентов («врачебных ошибок»).

В последние годы наблюдается интерес к концепции «выгорания» среди хирургов, а также к роли нетехнических навыков и командной работы в оказании сложной медицинской помощи. Необходимость хирурга уметь справляться с эмоциональным бременем работы и проявлять «стойкость», чтобы избежать выгора-

² Dexmo. VR High-risk Industry Training, demo: <https://youtu.be/8cylQigg2GE>

ния, является характеристикой, которую следует учитывать на этапе выбора профессии и которая имеет отношение к обучению в бакалавриате и аспирантуре, а также к выбору специальности.

Хирургия в этом не уникальна – все медицинские профессии связаны со стрессом и способностью к выгоранию. В постпандемическом мире нельзя позволить себе терять врачей, на подготовку которых были затрачены огромные средства. Это будет трагедией, если произойдет в результате предотвратимой эмоциональной травмы, ведущей к выгоранию и ещё более преждевременному раннему выходу на пенсию, чем это происходит в настоящее время [75].

Итак, выявлена необходимость серьезного отбора медиков на ранних этапах их подготовки, с возможной сменой специализации [76–78] во время учёбы, что в свою очередь оправдывает необходимость внесения в виртуальные тренажёры инцидентов, инициирующих выгорание. Такие шоковые процедуры дадут возможность точно взвесить характеристики студентов и обосновать выбор специализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен апробированный процесс разработки виртуальных хирургических тренажёров без использования дополнительных аппаратных устройств, кроме стандартной поставки гарнитур виртуальной реальности. Показаны пути развития комплекса Виртуальная операционная: многопользовательский режим, вариативность сценариев операций, контроль процесса обучения, дооперационное прогнозирование осложнений, проработка осложнений во время операции. Представлена возможность расширения сферы применения комплекса Виртуальная операционная в образовательном процессе при использовании цифровых перчаток, позволяющих отрабатывать в виртуальной реальности разнообразные мануальные техники освоения хирургических инструментов. Отдельное внимание обращено на отработку инцидентов, инициирующих психологическое выгорание будущих хирургов и осознанный выбор специализации.

Необходимо отметить, что доступные симуляторы высокой достоверности для приобретения первичных навыков проведения операций являются в настоя-

щее время необходимым средством институционального симуляционного обучения в качестве дополнения к учебной программе без исчерпания финансовых ресурсов высших учебных медицинских заведений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета («ПРИОРИТЕТ-2030»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Спиотта А.М., Шленк Р.П.* Симуляционное обучение нейрохирургических интернов: новая парадигма // Медицинское образование и профессиональное развитие. 2017. № 1 (27). С. 24–30.
2. *Davids J., Manivannan S., Darzi A., Giannarou S., Ashrafian H. & Marcus H.J.* Simulation for skills training in neurosurgery: a systematic review, meta-analysis, and analysis of progressive scholarly acceptance // *Neurosurgical review*. 2022. Vol. 44. No. 4. P. 1853–1867.
3. *Haiser A., Aydin A., Kunduzi B., Ahmed K. & Dasgupta P.* A Systematic Review of Simulation-Based Training in Vascular Surgery // *Journal of Surgical Research*. 2022. Vol. 279. P. 409–419.
4. *James J., Irace A.L., Gudis D.A. & Overdevest J.B.* Simulation training in endoscopic skull base surgery: A scoping review // *World Journal of Otorhinolaryngology – Head and Neck Surgery*. 2022. Vol. 8. No. 1. P. 73–81.
5. *Saleem H.Y., Kaplan J.L., Torres-Guzman R.A., Avila F.R. & Forte A.J.* Simulation in Hand Surgery: A Literature Review // *World Journal of Surgery*. 2022. Vol. 46. No. 3. P. 718–724.
6. *Rohrich R.J.* See one, do one, teach one: an old adage with a new twist // *Plast. Reconstr. Surg.* 2006. Vol. 118. P. 257–258.
7. *Kotsis S.V., Chung K.C.* Application of the «see one, do one, teach one» concept in surgical training // *Plast. Reconstr. Surg.* 2013. Vol. 131. P. 1194–1201.
8. *Konge L., Lonn L.* Simulation-based training of surgical skills // *Perspect. Med. Educ.* 2016. Vol. 5. P. 3–4.

9. *Norman G.* Data dredging, salami-slicing, and other successful strategies to ensure rejection: twelve tips on how to not get your paper published // *Adv. Health Sci. Educ. Theory Pract.* 2014. Vol. 19. P. 1–5.

10. *Konge L., Clementsen P.F., Ringsted C., Minddal V., Larsen K.R., Annema J.T.* Simulator training for endobronchial ultrasound: a randomised controlled trial // *Eur. Respir. Journal.* 2015. Vol. 46. P. 1140–1149.

11. *Andersen S.A., Konge L., Caye-Thomasen P., Sorensen M.S.* Learning Curves of Virtual Mastoidectomy in Distributed and Massed Practice // *JAMA Otolaryngol. Head Neck Surg.* 2015. P. 1–6.

12. *Räder S.B., Henriksen A.H., Butrymovich V., et al.* A study of the effect of dyad practice versus that of individual practice on simulation-based complex skills learning and of students' perceptions of how and why dyad practice contributes to learning // *Acad. Med.* 2014. Vol. 89. P. 1287–1294.

13. *Brydges R., Nair P., Ma I., Shanks D., Hatala R.* Directed self-regulated learning versus instructor-regulated learning in simulation training // *Med. Educ.* 2012. Vol. 46. P. 648–656.

14. *Газизов P.P.* Физика веревки для реализации кетгутовой нити в виртуальной операционной // *Ученые записки института социальных и гуманитарных знаний КФУ.* 2019. Т. 17. № 1. С. 572–578.

15. *Kugurakova V.V., Elizarov A.M., Khafizov M.R. et al.* Towards the immersive VR: measuring and assessing realism of user experience // *ICAROB 2018: Proceedings of the 2018 International Conference on Artificial Life and Robotics.* 2018. P. 146–152.

16. *Abramov V.D., Kugurakova V.V., Rizvanov A.A. et al.* Virtual Biotechnological Lab Development // *BioNanoScience.* 2017. Vol. 7. Is. 2. P. 363–365.

17. *Lushnikov A., Kugurakova V., Nizamutdinov A.* Development of VR system to enhance understanding process of robot mechanisms // *ICAROB 2018: Proceedings of the 2018 International Conference on Artificial Life and Robotics.* 2018. P. 140–145.

18. *Kugurakova V.V., Abramov V.D., Sultanova R.R. et al.* Virtual Reality-Based Immersive Simulation for Invasive Surgery Training // *European Journal of Clinical Investigation.* 2018. Vol. 48. P. 224–225.

19. *Sultanova R., Sharaeva R.* Virtual reality-based immersive simulation mechanics for invasive surgery training // Proceedings of International Conference on Developments in eSystems Engineering, DeSE. 2019. Vol. October 2019. P. 924–928.

20. Программа для обучения аппендэктомии в виртуальной реальности: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020613665 Российская Федерация / В.В. Кугуракова, М.Р. Хафизов, В.Д. Абрамов, Р.А. Шараева, Р.Р. Газизов, Т.М. Зиннуров, С.В. Зинченко; заявитель и правообладатель Фед. гос. автоном. образоват. учреждение высш. образ. Казанский фед. ун-т. №2020612602; заявл. 10.03.2020; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 19.03.2020. 1 с.

21. Программа для обучения трахеостомии в виртуальной реальности: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661512 Российская Федерация / В.В. Кугуракова, А.П. Киясов, Р.И. Файзуллин, С.В. Зинченко, Р.Р. Галиева, Р.Р. Газизов, Н.Р. Курбангалиева, Р.А. Шараева, Н.Э. Романчук, М.Р. Хафизов; заявитель и правообладатель Фед. гос. автоном. образоват. учреждение высш. образ. Казанский фед. ун-т. № 2022660504; заявл. от 08.06.2022; зарег. в реестре программ для ЭВМ 22.06.2022. 1 с.

22. *Mao R.Q., Lan L., Kay J., Lohre R., Ayeni O.R., Goel D.P. & SA D.D.* Immersive Virtual Reality for Surgical Training: A Systematic Review // Journal of Surgical Research. 2021. Vol. 268. P. 40–58.

23. *Смирнов А.А., Татаркин В.В., Захматов И.Г., Марьянович А.Т., Андреевская М.В., Назмиев А.И., Кудлахмедов Ш.Ш., Рыбаков В.А.* Тренажёр для освоения мануальных навыков хирургических вмешательств на мозговом отделе черепа // Креативная хирургия и онкология. 2017. № 7(1). С. 63–68.

24. Аналогов в России нет: пермяки придумали тренажёр, на котором врачи научатся делать трепанацию черепа // 59.PY. 2017. URL: <https://59.ru/text/gorod/2017/08/14/50888691/> (дата обращения: 01.09.2022).

25. *Cevallos N., Zukotyński B., Greig D., Silva M. and Thompson R.M.* The Utility of Virtual Reality in Orthopedic Surgical Training // Journal of Surgical Education. 2022. Vol. 79(6). P. 1516–1525.

26. Новый интерактивный образовательный модуль с VR-тренажёром по отработке алгоритма оказания неотложной хирургической помощи доступен на Портале // Портал непрерывного медицинского и фармацевтического образования

Минздрава России, 2021. URL: <https://edu.rosminzdrav.ru/anonsy/anonsy/news/novyi-interaktivnyi-obrazovatelnyi-modul-s-vr-trenazh/> (дата обращения: 01.09.2022).

27. Ростех разработал виртуальный тренажёр для обучения хирургов // Ростех, 2022. URL: <https://rostec.ru/news/rostekh-razrabotal-virtualnyy-trenazher-dlya-obucheniya-khirurgov> (дата обращения: 01.09.2022).

28. *Sadeghi A.H., Peek J.J., Max S.A., Smit L.L., Martina B.G., Rosalia R.A., Bakhuis W., Bogers A.J., Mahtab E.A.* Virtual Reality Simulation Training for Cardiopulmonary Resuscitation After Cardiac Surgery: Face and Content Validity Study // *JMIR Serious Games*. 2022. Vol. 10. No. 1. P. e30456.

29. *Atli K., Selman W., Ray A.* A comprehensive multicomponent neurosurgical course with use of virtual reality: modernizing the medical classroom // *Journal of Surgical Education*. 2020. Vol.78(4). P. 1350–1356.

30. *Bing E.G., Parham G.P., Cuevas A., et al.* Using low-cost virtual reality simulation to build surgical capacity for cervical cancer treatment // *Journal Glob. Oncol.* 2019. P. 1–7.

31. *Chaudhary A.H., Bukhari F., Iqbal W., Nawaz Z., Malik M.K.* Laparoscopic training exercises using HTC VIVE // *Intell. Autom. Soft Co.* 2020. Vol. 26. P. 53–59.

32. *Logishetty K., Gofton W.T., Rudran B., Beaulé P.E., Cobb J.P.* Fully immersive virtual reality for total hip arthroplasty: objective measurement of skills and transfer of visuospatial performance after a competency-based simulation curriculum // *Journal Bone Joint Surg. Am.* 2020. P. e27.

33. *Luca A., Giorgino R., Gesualdo L., Peretti G.M., Belkhou A., Banfi G., et al.* Innovative educational pathways in spine surgery: advanced virtual reality-based training // *World Neurosurg.* 2020. P. 674–680.

34. *Arroyo-Berezowsky C., Jorba-Elguero P., Altamirano-Cruz M.A., Quinzaños-Fresnedo J.* Usefulness of immersive virtual reality simulation during femoral nail application in an orthopedic fracture skills course // *Journal Musculoskelet. Surg. Res.* 2019. P. 326–333.

35. *Hooper J., Tsiridis E., Feng J.E., et al.* Virtual reality simulation facilitates resident training in total hip arthroplasty: a randomized controlled trial // *Journal Arthroplasty.* 2019. P. 2278–2283.

36. *Logishetty K., Rudran B., Cobb J.P.* Virtual reality training improves trainee performance in total hip arthroplasty: a randomized controlled trial // *Bone Joint Journal*. 2019. P. 1585–1592.

37. *Lohre R., Bois A.J., Athwal G.S., Goel D.P.* Canadian Shoulder and Elbow Society (CSES). Improved complex skill acquisition by immersive virtual reality training: a randomized controlled trial // *Journal Bone Joint Surg. Am.* 2020. P. e26.

38. *Orland M.D., Patetta M.J., Wieser M., Kayupov E., Gonzalez M.H.* Does virtual reality improve procedural completion and accuracy in an intramedullary tibial nail procedure? A randomized control trial // *Clin. Orthop. Relat. Res.* 2020. P. 2170–2177.

39. *Praamsma M., Carnahan H., Backstein D., Veillette C.J., Gonzalez D., Dubrowski A.* Drilling sounds are used by surgeons and intermediate residents, but not novice orthopedic trainees, to guide drilling motions // *Can. Journal Surg.* 2008. P. 442–446.

40. *Sabbagh A.J., Bajunaid K.M., Alarifi N., et al.* Roadmap for developing complex virtual reality simulation scenarios: subpial neurosurgical tumor resection model // *World Neurosurg.* 2020. P. e220–e229.

41. Comparing Unity vs Unreal for VR, MR or AR Development Projects // *XR Bootcamp*, 2022.

URL: <https://xrbootcamp.com/unity-vs-unreal-engine-for-xr-development/> (дата обращения: 01.09.2022).

42. *Tsarouva M.* Choosing an engine for VR: Unity vs Unreal // *iTechArt*, 2022. URL: <https://www.itechart.com/blog/unity-vs-unreal-virtual-reality/> (дата обращения: 01.09.2022).

43. *Диденко Г.* Орёл или решка: сравнение Unity и Unreal Engine // *DTF*, 2017. URL: <https://dtf.ru/gamedev/7227-orel-ili-reshka-sravnenie-unity-i-unreal-engine> (дата обращения: 01.09.2022).

44. Блендшейпы (Blend Shapes), морфы (Morph), Shape key | Словарь // *ShutterLine*. URL: <https://3dyuriki.com/2010/05/02/blendshejpy-blend-shapes-i-morfy-morph-slovar/> (дата обращения: 01.09.2022).

45. VR Template // *Epic Games*. URL: <https://docs.unrealengine.com/4.27/en-US/Resources/Templates/VRTemplate/> (дата обращения: 01.09.2022).

46. Animation Notifications (Notifies) // Epic Games. URL: <https://docs.unrealengine.com/4.27/en-US/AnimatingObjects/SkeletalMeshAnimation/Sequences/Notifies/> (дата обращения: 01.09.2022).

47. Маккеффи М. Unreal Engine VR для разработчиков. Изд-во Бомбора, 2019. 256 с.

48. Хай Г.А. Ассистирование при хирургических операциях. СПб, 1998. 382 с.

49. Шараева Р.А., Кузурасова В.В., Селезнева Н.Э. Методика упрощения таск-трекинга в проектах игровой индустрии // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. No 3. С. 374–383.

50. Шараева Р.А., Кузурасова В.В. Оценка сокращения времени при использовании модифицированной методики таск-трекинга в управлении ИТ-проектами // Программные системы: теория и приложения. 2022. Т. 13. №3(54). С. 307–324.

51. Bowyer M.W., Streete K.A., Muniz G.M., Liu A.V. Immersive virtual environments for medical training // Semin. Colon. Rectal. Surg. 2008. P. 90–97.

52. Мухаметханов И.Р., Хафизов М.Р., Шубин А.В. Сравнение клиент-серверных решений при разработке многопользовательских онлайн-игр на Unity // Электронные библиотеки. 2022. №5.

53. Carter F.J., Schijven M.P., Aggarwal R., et al. Consensus guidelines for validation of virtual reality surgical simulators // Simul. Healthc. 2006. P. 171–179.

54. Mirchi N., Bissonnette V., Yilmaz R., Ledwos N., Winkler-Schwartz A., Del Maestro R.F. The Virtual Operative Assistant: An explainable artificial intelligence tool for simulation-based training in surgery and medicine // PLoS ONE. 2020. Vol. 15(2): e0229596. P. 1–15.

55. Sawaya R., Bugdadi A., Azarnoush H., Winkler-Schwartz A., Alotaibi F.E., Bajunaid K., et al. Virtual Reality Tumor Resection: The Force Pyramid Approach // Operative Neurosurgery. 2018. P. 686–696.

56. Wagner C.R., Stylopoulos N., Jackson P.G., Howe R.D. The benefit of force feedback in surgery: Examination of blunt dissection // Presence: teleoperators and virtual environments. 2007. P. 252–262.

57. Ladha L., Deepa T. Feature selection methods and algorithms // International journal on computer science and engineering. 2011. P. 1787–1797.

58. Lli J., Cheng K., Wang S., Morstatter F., Trevino R.P., Tang J., et al. Feature selection: A data perspective // ACM Computing Surveys (CSUR). 2018. P. 1–45.

59. Winkler-Schwartz A., Yilmaz R., Mirchi N., Bissonnette V., Ledwos N., Siyar S., et al. Assessment of Machine Learning Identification of Surgical Operative Factors Associated with Surgical Expertise in Virtual Reality Simulation // JAMA Network Open. 2019. P. e198363–e198363.

60. Yu L., Liu H. Efficient feature selection via analysis of relevance and redundancy // Journal of Machine Learning Research. 2004. P. 1205–1224.

61. Wang X., Wang Y., Wang L. Improving fuzzy c-means clustering based on feature-weight learning // Pattern Recognition Letters. 2004. P. 1123–1132.

62. Ryu W.H.A., Chan S., Sutherland G.R. Supplementary educational models in Canadian neurosurgery residency programs // Canadian Journal of Neurological Sciences. 2017. P. 177–183.

63. Sweller J. Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design // Learning and Instruction. 1994. P. 295–312.

64. Gobet F., Lane P.C., Croker S., Cheng P.C., Jones G., Oliver I., et al. Chunking mechanisms in human learning // Trends in Cognitive Sciences. 2001. P. 236–243.

65. Williamson B. Digital education governance: data visualization, predictive analytics, and ‘real-time’ policy instruments // Journal of Education Policy. 2016. P. 123–141.

66. Saplacan D., Herstad J., Pajalic Z. Feedback from Digital Systems Used in Higher Education: An Inquiry into Triggered Emotions—Two Universal Design Oriented Solutions for a Better User Experience // Studies in Health Technology and Informatics. 2018. P. 421–430.

67. Кузурасова В.В. Математическое и программное обеспечение многопользовательских тренажёров с погружением в иммерсивные виртуальные среды: дис. канд. техн. наук: 05.13.11. Казанский федеральный университет, 2018. 187 с.

68. Akhmetsharipov R.D., Khafizov M.R., Lushnikov A.Yu., Zigantdinov Sh.Ya. The soft tissue implementation with triangulated mesh for virtual surgery system // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2018. P. 163–167.

69. *Shigapov M.I., Kugurakova V.V.* Design and development of a hardware and software system for simulation of feedback tactility // Proceedings SIBCON. 2021. P. 1–6.

70. *Shigapov M.I., Kugurakova V.V., Zykov E.Yu.* Design of digital gloves with feedback for VR // Proceedings IEEE EWDTs. 2018. P. 1–5.

71. *Аглямков Ф.Р., Кузуряков В.С.* Тренажёр для реабилитации пациентов с проблемами мобильности руки, построенный с использованием технологий виртуальной реальности // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. No 3. С. 285–292.

72. *Friston S., Griffith E., Swapp D., Marshall A., Steed A.* Position-based control of under-constrained haptics: A system for the Dexmo glove // IEEE Robot Autom. [Internet]. 2019. P. 3497–3504.

73. *Bhalla S., Beegun I., Awad Z., Tolley N.* Simulation-based ENT induction: validation of a novel mannequin training model // Journal Laryngol. Otol. 2020. P. 74–80.

74. *McLaren O., Perkins C., Alderson D.* The effect of surgical complications on ENT trainees // Journal Laryngol. Otol. 2021. P. 293–296.

75. *Cherry J., Weir R.* Medicolegal and ethical aspects of ORL-HNS in the new millennium // Journal Laryngol. Otol. 2006. P. 737–740.

76. *Mayer A.W., Smith K.A., Carrie S.* A systematic review of factors affecting choice of otolaryngology as a career in medical students and junior doctors // Journal Laryngol. Otol. 2019. P. 836–842.

77. *Bhutta M., Mandavia R., Syed I., Qureshi A., Hettige R., Wong B.Y.W. et al.* A survey of how and why medical students and junior doctors choose a career in ENT surgery // Journal Laryngol. Otol. 2016. P. 1054–1058.

APPROACHES TO THE DEVELOPMENT OF VIRTUAL SURGICAL TRAINING

R. A. Sharaeva¹ [0000-0002-2359-1873], V. V. Kugurakova² [0000-0002-1552-4910],
R. R. Galieva³ [0000-0002-6468-2069], S. V. Zinchenko⁴ [0000-0002-9306-3507]

^{1,2,3} *Institute of Information Technologies and Intelligent Systems,*

⁴ *Institute of Fundamental Medicine and Biology*

Kazan (Volga Region) Federal University, ul. Kremlyovskaya, 35, Kazan, 420008;

¹r.sharaeva3496@gmail.com, ²vlada.kugurakova@gmail.com,

³galievarailina@gmail.com, ⁴zinchenkos.v@mail.ru

Abstract

The advantages of simulation training in clinical skills training are shown. Examples of simulators for building an optimal development process are reviewed. A way of transferring invasive surgery practices to the virtual operating room is presented.

As a logical development of functionality, approaches are presented that will be able to emulate all the practices that take place during real operations, including multi-player mode, variability in surgery scenarios, achieving mastery of manual techniques, and the need to introduce incidents that initiate psychological burnout of future surgeons and a conscious choice of specialization.

Keywords: *simulator, virtual reality, VR, surgical education, medical education, Unity, Unreal Engine.*

REFERENCES

1. *Spiotta A.M., SHlenk R.P.* Simulyacionnoe obuchenie nejrohirurgicheskikh intervov: novaya paradigma // *Medicinskoe obrazovanie i professional'noe razvitie.* 2017. No 1 (27). S. 24–30.
2. *Davids J., Manivannan S., Darzi A., Giannarou S., Ashrafian H. & Marcus H.J.* Simulation for skills training in neurosurgery: a systematic review, meta-analysis, and analysis of progressive scholarly acceptance // *Neurosurgical Review.* 2022. Vol. 44. No. 4. P. 1853–1867.
3. *Haiser A., Aydin A., Kunduzi B., Ahmed K. & Dasgupta P.* A Systematic Review of Simulation-Based Training in Vascular Surgery // *Journal of Surgical Research.* 2022. Vol. 279. P. 409–419.

4. *James J., Irace A.L., Gudis D.A. & Overdevest J.B.* Simulation training in endoscopic skull base surgery: A scoping review // *World Journal of Otorhinolaryngology – Head and Neck Surgery.* 2022. Vol. 8. No. 1. P. 73–81.

5. *Saleem H.Y., Kaplan J.L., Torres-Guzman R.A., Avila F.R. & Forte A.J.* Simulation in Hand Surgery: A Literature Review // *World Journal of Surgery.* 2022. Vol. 46. No. 3. P. 718–724.

6. *Rohrich R.J.* See one, do one, teach one: an old adage with a new twist // *Plast. Reconstr. Surg.* 2006. Vol. 118. P. 257–258.

7. *Kotsis S.V., Chung K.C.* Application of the «see one, do one, teach one» concept in surgical training // *Plast. Reconstr. Surg.* 2013. Vol. 131. P. 1194–1201.

8. *Konge L., Lonn L.* Simulation-based training of surgical skills // *Perspect. Med. Educ.* 2016. Vol. 5. P. 3–4.

9. *Norman G.* Data dredging, salami-slicing, and other successful strategies to ensure rejection: twelve tips on how to not get your paper published // *Adv. Health Sci. Educ. Theory Pract.* 2014. Vol. 19. P. 1–5.

10. *Konge L., Clementsen P.F., Ringsted C., Minddal V., Larsen K.R., Annema J.T.* Simulator training for endobronchial ultrasound: a randomised controlled trial // *Eur. Respir. Journal.* 2015. Vol. 46. P. 1140–1149.

11. *Andersen S.A., Konge L., Caye-Thomasen P., Sorensen M.S.* Learning Curves of Virtual Mastoidectomy in Distributed and Massed Practice // *JAMA Otolaryngol. Head Neck Surg.* 2015. P. 1–6.

12. *Räder S.B., Henriksen A.H., Butrymovich V., et al.* A study of the effect of dyad practice versus that of individual practice on simulation-based complex skills learning and of students' perceptions of how and why dyad practice contributes to learning // *Acad. Med.* 2014. Vol. 89. P. 1287–1294.

13. *Brydges R., Nair P., Ma I., Shanks D., Hatala R.* Directed self-regulated learning versus instructor-regulated learning in simulation training // *Med. Educ.* 2012. Vol. 46. P. 648–656.

14. *Gazizov R.R.* Fizika verevki dlya realizacii ketgutovoj niti v virtual'-noj operacii // *Uchenye zapiski instituta social'nyh i gumanitarnyh znanij KFU.* 2019. T. 17. № 1. С. 572–578.

15. *Kugurakova V.V., Elizarov A.M., Khafizov M.R. et al.* Towards the immersive VR: measuring and assessing realism of user experience // ICAROB 2018: Proceedings of the 2018 International Conference on Artificial Life and Robotics. 2018. P. 146–152.

16. *Abramov V.D., Kugurakova V.V., Rizvanov A.A. et al.* Virtual Biotechnological Lab Development // *BioNanoScience*. 2017. Vol. 7. Is. 2. P. 363–365.

17. *Lushnikov A., Kugurakova V., Nizamutdinov A.* Development of VR system to enhance understanding process of robot mechanisms // ICAROB 2018: Proceedings of the 2018 International Conference on Artificial Life and Robotics. 2018. P. 140–145.

18. *Kugurakova V.V., Abramov V.D., Sultanova R.R. et al.* Virtual Reality-Based Immersive Simulation for Invasive Surgery Training // *European Journal of Clinical Investigation*. 2018. Vol. 48. P. 224–225.

19. *Sultanova R., Sharaeva R.* Virtual reality-based immersive simulation mechanics for invasive surgery training // *Proceedings of International Conference on Developments in eSystems Engineering, DeSE*. 2019. Vol. October–2019. P. 924–928.

20. Программа для обучения аппендектонии в виртуальной реальности: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020613665 Российская Федерация / V.V. Kugurakova, M.R. Hafizov, V.D. Abramov, R.A. Sharaeva, R.R. Gazizov, T.M. Zinnurov, S.V. Zinchenko; заявитель и правообладатель Fed. gos. avtonom. obrazovat. uchrezhdenie vyssh. obraz. Kazanskij fed. un-t. №2020612602; заявл. 10.03.2020; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 19.03.2020. 1 с.

21. Программа для обучения трахеостомии в виртуальной реальности: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661512 Российская Федерация / V.V. Kugurakova, A.P. Kiyasov, R.I. Fajzullin, S.V. Zinchenko, R.R. Galieva, R.R. Gazizov, N.R. Kurbangalieva, R.A. Sharaeva, N.E. Romanchuk, M.R. Hafizov; заявитель и правообладатель Fed. gos. avtonom. obrazovat. uchrezhdenie vyssh. obraz. Kazanskij fed. un-t. № 2022660504; заявл. от 08.06.2022; зарег. в реестре программ для ЭВМ 22.06.2022. 1 с.

22. *Mao R.Q., Lan L., Kay J., Lohre R., Ayeni O.R., Goel D.P. & SA D.D.* Immersive Virtual Reality for Surgical Training: A Systematic Review // *Journal of Surgical Research*. 2021. Vol. 268. C. 40–58.

23. *Smirnov A.A., Tatarkin V.V., Zahmatov I.G., Mar'yanovich A.T., Andreevskaya M.V., Nazmiev A.I., Kudlahmedov Sh.Sh., Rybakov V.A.* Trenazhyor dlya

osvoeniya manual'nyh navykov hirurgicheskikh vmeshatel'stv na mozgovom otdele cherepa // Kreativnaya hirurgiya i onkologiya. 2017. № 7(1). С. 63–68.

24. Analogov v Rossii net: permyaki pridumali trenazhyor, na kotorom vrachi nauchatsya delat' trepanaciyu cherepa // 59.RU. 2017.

URL: <https://59.ru/text/gorod/2017/08/14/50888691/> (access date: 01.09.2022).

25. *Cevallos N., Zukotyński B., GReig D., Silva M. and Thompson R.M.* The Utility of Virtual Reality in Orthopedic Surgical Training // *Journal of Surgical Education*. 2022. Vol. 79(6). P. 1516–1525.

26. Novyj interaktivnyj obrazovatel'nyj modul' s VR-trenazhyorom po otrabotke algoritma okazaniya neotlozhnoj hirurgicheskoy pomoshchi dostupen na Portale // Portal nepreryvnogo medicinskogo i farmacevticheskogo obrazovaniya Minzdrava Rossii, 2021. URL: <https://edu.rosminzdrav.ru/anonsy/anonsy/news/novyi-interaktivnyi-obrazovatelnyi-modul-s-vr-trenazh/> (access date: 01.09.2022).

27. Rostekh razrabotal virtual'nyj trenazhyor dlya obucheniya hirurgov // Rostekh, 2022. URL: <https://rostec.ru/news/rostekh-razrabotal-virtualnyy-trenazher-dlya-obucheniya-khirurgov/> (access date: 01.09.2022).

28. *Sadeghi A.H., Peek J.J., Max S.A., Smit L.L., Martina B.G., Rosalia R.A., Bakhuis W., Bogers A.J., Mahtab E.A.* Virtual Reality Simulation Training for Cardiopulmonary Resuscitation After Cardiac Surgery: Face and Content Validity Study // *JMIR Serious Games*. 2022. Vol. 10. No. 1. P. e30456.

29. *Atli K., Selman W., Ray A.* A comprehensive multicomponent neurosurgical course with use of virtual reality: modernizing the medical classroom // *Journal of Surgical Education*. 2020. Vol.78(4). P. 1350–1356.

30. *Bing E.G., Parham G.P., Cuevas A., et al.* Using low-cost virtual reality simulation to build surgical capacity for cervical cancer treatment // *Journal Glob. Oncol*. 2019. P. 1–7.

31. *Chaudhary A.H., Bukhari F., Iqbal W., Nawaz Z., Malik M.K.* Laparoscopic training exercises using HTC VIVE // *Intell. Autom. Soft Co*. 2020. Vol. 26. P. 53–59.

32. *Logishetty K., Gofton W.T., Rudran B., Beaulé P.E., Cobb J.P.* Fully immersive virtual reality for total hip arthroplasty: objective measurement of skills and transfer of visuospatial performance after a competency-based simulation curriculum // *Journal Bone Joint Surg. Am*. 2020. P. e27.

33. Luca A., Giorgino R., Gesualdo L., Peretti G.M., Belkhou A., Banfi G., et al. Innovative educational pathways in spine surgery: advanced virtual reality-based training // *World Neurosurg.* 2020. P. 674–680.

34. Arroyo-Berezowsky C., Jorba-Elguero P., Altamirano-Cruz M.A., Quinzaños-Fresnedo J. Usefulness of immersive virtual reality simulation during femoral nail application in an orthopedic fracture skills course // *Journal Musculoskelet. Surg. Res.* 2019. P. 326–333.

35. Hooper J., Tsiridis E., Feng J.E., et al. Virtual reality simulation facilitates resident training in total hip arthroplasty: a randomized controlled trial // *Journal Arthroplasty.* 2019. P. 2278–2283.

36. Logishetty K., Rudran B., Cobb J.P. Virtual reality training improves trainee performance in total hip arthroplasty: a randomized controlled trial // *Bone Joint Journal.* 2019. P. 1585–1592.

37. Lohre R., Bois A.J., Athwal G.S., Goel D.P. Canadian Shoulder and Elbow Society (CSES). Improved complex skill acquisition by immersive virtual reality training: a randomized controlled trial // *Journal Bone Joint Surg. Am.* 2020. P. e26.

38. Orland M.D., Patetta M.J., Wieser M., Kayupov E., Gonzalez M.H. Does virtual reality improve procedural completion and accuracy in an intramedullary tibial nail procedure? A randomized control trial // *Clin. Orthop. Relat. Res.* 2020. P. 2170–2177.

39. Praamsma M., Carnahan H., Backstein D., Veillette C.J., Gonzalez D., Dubrowski A. Drilling sounds are used by surgeons and intermediate residents, but not novice orthopedic trainees, to guide drilling motions // *Can. Journal Surg.* 2008. P. 442–446.

40. Sabbagh A.J., Bajunaid K.M., Alarifi N., et al. Roadmap for developing complex virtual reality simulation scenarios: subpial neurosurgical tumor resection model // *World Neurosurg.* 2020. P. e220–e229.

41. Comparing Unity vs Unreal for VR, MR or AR Development Projects // *XR Bootcamp*, 2022.

URL: <https://xrbootcamp.com/unity-vs-unreal-engine-for-xr-development/> (дата обращения: 01.09.2022).

42. Tsarouva M. Choosing an engine for VR: Unity vs Unreal // *iTechArt*, 2022. URL: <https://www.itechart.com/blog/unity-vs-unreal-virtual-reality/> (access date: 01.09.2022).

43. *Didenko G.* Oryol ili reshka: sravnenie Unity i Unreal Engine // DTF, 2017. URL: <https://dtf.ru/gamedev/7227-orel-ili-reshka-sravnenie-unity-i-unreal-engine> (access date: 01.09.2022).

44. Blend Shapes, Morph, Shape key // ShutterLine. URL: <https://3dyuriki.com/2010/05/02/blendshejpy-blend-shapes-i-morfy-morph-slovar/> (access date: 01.09.2022).

45. VR Template // Epic Games. URL: <https://docs.unrealengine.com/4.27/en-US/Resources/Templates/VRTemplate/> (access date: 01.09.2022).

46. Animation Notifications (Notifies) // Epic Games. URL: <https://docs.unrealengine.com/4.27/en-US/AnimatingObjects/SkeletalMeshAnimation/Sequences/Notifies/> (access date: 01.09.2022).

47. *Makkefri M.* Unreal Engine VR dlya razrabotchikov. Bombora, 2019. 256 p.

48. *Haj G.A.* *Assistirovanie pri hirurgicheskikh operaciyah* // Russia, Sankt-Petersburg, 1998. 382 p.

49. *Sharaeva R.A., Kugurakova V.V., Selezneva N.E.* Metodika uproshcheniya task-trekinga v proektah igrovoj industrii // Programmnye produkty i sistemy. 2022. T. 35. No. 3. S. 374–383.

50. *Sharaeva R.A., Kugurakova V.V.* Ocenka sokrashcheniya vremeni pri ispol'zovanii modificirovannoj metodiki task-trekinga v upravlenii IT-proektami // Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya. 2022. T. 13. №3(54). S. 307–324.

51. *Bowyer M.W., Streete K.A., Muniz G.M., Liu A.V.* Immersive virtual environments for medical training // Semin. Colon. Rectal. Surg. 2008. P. 90–97.

52. *Muhamethanov I.R., Hafizov M.R., Shubin A.V.* Sravnenie klient-servernyh reshenij pri razrabotke mnogopol'zovatel'skih onlajn-igr na Unity // Elektronnye biblioteki. 2022. No. 5.

53. *Carter F.J., Schijven M.P., Aggarwal R., et al.* Consensus guidelines for validation of virtual reality surgical simulators // Simul. Healthc. 2006. P. 171–179.

54. *Mirchi N., Bissonnette V., Yilmaz R., Ledwos N., Winkler-Schwartz A., Del Maestro R.F.* The Virtual Operative Assistant: An explainable artificial intelligence tool for simulation-based training in surgery and medicine // PLoS ONE. 2020. Vol. 15(2): e0229596. P. 1–15.

55. *Sawaya R., Bugdadi A., Azarnoush H., Winkler-Schwartz A., Alotaibi F.E., Bajunaid K., et al.* Virtual Reality Tumor Resection: The Force Pyramid Approach // *Operative Neurosurgery*. 2018. P. 686–696.

56. *Wagner C.R., Stylopoulos N., Jackson P.G., Howe R.D.* The benefit of force feedback in surgery: Examination of blunt dissection // *Presence: teleoperators and virtual environments*. 2007. P. 252–262.

57. *Ladha L., Deepa T.* Feature selection methods and algorithms // *International journal on computer science and engineering*. 2011. P. 1787–1797.

58. *LLi J., Cheng K., Wang S., Morstatter F., Trevino R.P., Tang J., et al.* Feature selection: A data perspective // *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2018. P. 1–45.

59. *Winkler-Schwartz A., Yilmaz R., Mirchi N., Bissonnette V., Ledwos N., Siyar S., et al.* Assessment of Machine Learning Identification of Surgical Operative Factors Associated with Surgical Expertise in Virtual Reality Simulation // *JAMA Network Open*. 2019. P. e198363–e198363.

60. *Yu L., Liu H.* Efficient feature selection via analysis of relevance and redundancy // *Journal of Machine Learning Research*. 2004. P. 1205–1224.

61. *Wang X., Wang Y., Wang L.* Improving fuzzy c-means clustering based on feature-weight learning // *Pattern Recognition Letters*. 2004. P. 1123–1132.

62. *Ryu W.H.A., Chan S., Sutherland G.R.* Supplementary educational models in Canadian neurosurgery residency programs // *Canadian Journal of Neurological Sciences*. 2017. P. 177–183.

63. *Sweller J.* Cognitive load theory, learning difficulty, and instructional design // *Learning and Instruction*. 1994. P. 295–312.

64. *Gobet F., Lane P.C., Croker S., Cheng M.P.C., Jones G., Oliver I., et al.* Chunking mechanisms in human learning // *Trends in Cognitive Sciences*. 2001. P. 236–243.

65. *Williamson B.* Digital education governance: data visualization, predictive analytics, and ‘real-time’ policy instruments // *Journal of Education Policy*. 2016. P. 123–141.

66. *Saplacan D., Herstad J., Pajalic Z.* Feedback from Digital Systems Used in Higher Education: An Inquiry into Triggered Emotions—Two Universal Design Oriented Solutions for a Better User Experience // *Studies in Health Technology and Informatics*. 2018. P. 421–430.

67. *Kugurakova V.V.* Matematicheskoe i programmnoe obespechenie mnogopol'zovatel'skih trenazhyorov s pogruzheniem v immersivnye virtual'nye sredy: dis. kand. tekhn. nauk: 05.13.11. Kazanskij federal'nyj universitet, 2018. 187 p.

68. *Akhmetsharipov R.D., Khafizov M.R., Lushnikov A.Yu., Zigantdinov Sh.Ya.* The soft tissue implementation with triangulated mesh for virtual surgery system // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2018. P. 163–167.

69. *Shigapov M.I., Kugurakova V.V.* Design and development of a hardware and software system for simulation of feedback tactility // *Proceedings SIBCON*. 2021. P. 1–6.

70. *Shigapov M.I., Kugurakova V.V., Zykov E.Yu.* Design of digital gloves with feedback for VR // *Proceedings IEEE EWDTs*. 2018. P. 1–5.

71. *Aglyamov F.R., Kugurakov V.S.* Trenazhyor dlya reabilitacii pacientov s problemami mobil'nosti ruki, postroennyj s ispol'zovaniem tekhnologij virtual'noj real'nosti // *Programmnye produkty i sistemy*. 2022. T. 35. No. 3. S. 285–292.

72. *Friston S., Griffith E., Swapp D., Marshall A., Steed A.* Position-based control of under-constrained haptics: A system for the Dexmo glove // *IEEE Robot Autom.* [Internet]. 2019. P. 3497–3504.

73. *Bhalla S., Beegun I., Awad Z., Tolley N.* Simulation-based ENT induction: validation of a novel mannequin training model // *Journal Laryngol. Otol.* 2020. P. 74–80.

74. *McLaren O., Perkins C., Alderson D.* The effect of surgical complications on ENT trainees // *Journal Laryngol. Otol.* 2021. P. 293–296.

75. *Cherry J., Weir R.* Medicolegal and ethical aspects of ORL-HNS in the new millennium // *Journal Laryngol. Otol.* 2006. P. 737–740.

76. *Mayer A.W., Smith K.A., Carrie S.* A systematic review of factors affecting choice of otolaryngology as a career in medical students and junior doctors // *Journal Laryngol. Otol.* 2019. P. 836–842.

77. *Bhutta M., Mandavia R., Syed I., Qureshi A., Hettige R., Wong B.Y.W. et al.* A survey of how and why medical students and junior doctors choose a career in ENT surgery // *Journal Laryngol. Otol.* 2016. P. 1054–1058.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



ШАРАЕВА Регина Айратовна – инженер НИЛ Разработка интеллектуальных инструментов для компьютерных игр Института ИТИС КФУ. Сфера научных интересов – менеджмент проектов игровой индустрии.

Regina Airatovna SHARAEVA – Engineer of Laboratory for Development of Intelligent Tools for Computer Games, Institute ITIS KFU. Research interests include game industry project management.

e-mail: r.sharaeva3496@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2359-1873



КУГУРАКОВА Влада Владимировна – к. т. н., доцент кафедры программной инженерии Института ИТИС КФУ, руководитель НИЛ разработки AR/VR приложений и компьютерных игр. Сфера научных интересов – иммерсивность виртуальных сред, проблемы генерации реалистичной визуализации, различные аспекты проектирования игр, AR/VR, подходы к интерпретации UX.

Vlada Vladimirovna KUGURAKOVA, PhD., Docent of the Institute ITIS KFU, Head of Laboratory «AR/VR applications and Gamedev». Research interests include immersiveness of virtual environments, problems of generating realistic visualization, various aspects of game design, AR/VR, approaches to UX interpretation.

email: vlada.kugurakova@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1552-4910



ГАЛИЕВА Раилина Рафаэлевна – лаборант-исследователь НИЛ SIM – Лаборатории симуляционных технологий в биомедицине Института ИТИС КФУ. Сфера научных интересов – разработка AR/VR проектов на движке Unreal Engine.

Railina Rafaelevna GALIEVA – research assistant of SIM – Lab. of simulation technologies in biomedicine, Institute ITIS KFU. Research interests include development of AR/VR projects on the Unreal Engine.

email: galievarailina@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6468-2069



ЗИНЧЕНКО Сергей Викторович – д. м. н., профессор, заведующий кафедрой хирургии, акушерства и гинекологии ИФМиБ КФУ, врач-онколог Медико-санитарной части Научно-клинического центра прецизионной и регенеративной медицины КФУ, врач-хирург Медико-санитарной части КФУ, заместитель главного врача по медицинской части, руководитель хирургического направления.

Sergey Viktorovich ZINCHENKO – MD, Professor, Head of the Department of Surgery, Obstetrics and Gynecology KFU, Medical Oncologist at the KFU Scientific and Clinical Center for Precision and Regenerative Medicine, Surgeon at KFU Medical and Clinical Center, Deputy Head Physician for Medical Services, Head of the Surgical Department.

email: zinchenkos.v@mail.ru

ORCID: 0000-0002-9306-3507

Материал поступил в редакцию 12 сентября 2022 года