

## АЛГОРИТМ ВЫБОРА КОМПОНЕНТОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДЛЯ АДАПТИВНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ

М.Н. Краснянский, А.Д. Обухов, Д.Л. Дедов,  
А.А. Сиухин, А.Е. Архипов

Докт. техн. наук, профессор М.Н. Краснянский; канд. техн. наук  
А.Д. Обухов; канд. техн. наук Д.Л. Дедов; аспирант А.А. Сиухин;  
аспирант А.Е. Архипов (ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный  
технический университет»)

Представлен алгоритм выбора компонентов визуализации для адаптивных тренажеров. Разработана система классификации компонентов визуализации, позволяющая осуществить их группировку и ранжирование. Алгоритм позволяет формализовать основные объекты технической системы, для которой разрабатывается тренажер, соотнести их с компонентами визуализации, сгруппировать, оценить и ранжировать компоненты визуализации по пяти критериям: времени интеграции, стоимости использования и качества визуализации компонента, качества и времени обучения, получить оптимальное решение. На основе алгоритма осуществлена разработка адаптивного тренажера для угледобывающей отрасли.

**Ключевые слова:** адаптивный тренажер, виртуальная реальность, классификация компонентов визуализации, алгоритм выбора компонентов тренажера.

### **Algorithm for Selecting Visualization Components for Adaptive Simulators. M.N. Krasnyanskiy, A.D. Obukhov, D.L. Dedov, A.A. Siukhin, A.E. Arkhipov**

The paper presents an algorithm for selecting visualization components for adaptive simulators. Classification system for grouping and ranking visualization components has been developed. The algorithm allows to formalize the main objects of the technical system, for which the simulator is developed, correlate them with visualization components, evaluate and classify visualization components according to five criteria: integration time, utilization value and quality of component visualization, training period and quality of training, optimal solutions. The algorithm has formed the basis for the development of an adaptive simulator for the coal mining industry.

**Keywords:** adaptive simulator, virtual reality, classification of visualization components, algorithm for selecting the simulator components.

В настоящее время тренажеры различных типов активно применяются для подготовки персонала человеко-машинных систем к деятельности как в штатных, так и чрезвычайных, аварийных ситуациях. Для обучения используются различные типы тренажеров: стендовые, пультовые, имитации реального оборудования, в последние годы в ходе развития вычислительной мощности

компьютеров и качества трехмерной визуализации к ним добавились тренажеры на базе виртуальной или дополненной реальности. Также стоит выделить адаптивные тренажеры: к ним относятся системы, позволяющие проводить эффективное комплексное обучение персонала с учетом индивидуальных особенностей каждого человека [1, 2].

Применение тренажеров при изучении технологий, процессов и механизмов любой степени сложности возможно без непосредственного присутствия на производственном объекте, когда он заменяется виртуальной и/или физической моделью, визуально приближенной к реальным объектам. Отметим, что важную роль при проектировании эффективных тренажерных систем играет выбор технологии визуализации, от которой во многом зависит качество и скорость обучения [3, 4].

В ходе проведенных исследований было выявлено, что на данный момент отсутствуют теоретические основы классификации средств визуализации при проектировании адаптивных тренажеров на базе виртуальной реальности [5]. При этом существует множество подходов к классификации средств визуализации, которую осуществляют по различным признакам, таким, как: габаритные размеры, принцип действия, угол охвата, наличие или отсутствие тактильных ощущений, возможность взаимодействия с визуализируемой средой и т.д. Также необходимо отметить, что в последнее десятилетие развитие средств визуализации вышло на качественно новый уровень, поэтому классические определения термина «визуализация», применяемые при описании информационных систем, не включают многие важные аспекты, связанные с системами обучения. Следовательно, необходимо его уточнение.

Ввиду отсутствия единой стандартизированной системы классификации компонентов визуализации, необходимо ее разработать для последующей реализации алгоритма выбора компонентов системы визуализации. Данный алгоритм позволит провести формализацию существующих средств визуализации, определить весовые коэффициенты для основных направлений применения и, как следствие, сформировать наборы правил для автоматизированной оценки эффективности применения той или иной конфигурации системы. Такой принципиальный подход позволит еще на этапе формирования технического задания выбрать и оценить будущий набор элементов обучающей системы, что, в свою очередь, даст возможность уйти от единственно возможного на сегодняшний момент экспертного подхода к выбору средств визуализации.

Предлагаемая система классификации может быть представлена в виде перечня признаков классификации (фасетов) и их значений и правил образования группировок путем комбинирования признаков-фасетов. Основными методами классификации являются иерархический и фасетный [6].

Для последовательного разделения множества объектов на группировки используется иерархический метод классификации, позволяющий получить

иерархическую древовидную структуру в виде ветвящегося графа, в котором объекты разделяются по уровням деления в соответствии со своими признаками. Другим подходом является параллельное деление множества объектов с использованием фасетного метода классификации, при котором выделяется множество фасет-признаков, совокупность которых позволяет образовывать отдельные системы классификации, определяемые соответствующими фасетными формулами [7]. Анализ технологий и средств визуализации показал, что построение классификации на основе фасетов является наиболее применимым, т.к. каждому средству можно поставить в соответствие некоторый перечень признаков, а вот однозначно выстроить иерархию средств визуализации не представляется возможным, поскольку некоторые средства визуализации могут вообще не иметь тех или иных признаков и ранжирование по данному параметру будет невозможным.

Оценивая подходы к выбору структуры компонентов тренажера, был проведен анализ существующих реализаций тренажеров различных предметных областей. Виртуальная реальность имеет большое значение при обучении персонала промышленных предприятий, например, в горнодобывающей, химической, металлургической отраслях [8]. Особое внимание уделяется обучению людей действиям в условиях аварийной ситуации, а также использованию индивидуальных средств защиты – самоспасателей. В транспортной и авиационной сферах виртуальные тренажеры нашли свое применение при обучении обслуживающего и управляющего персонала [9]. В авиатренажерах используются не только технологии виртуальной реальности, но и технологии дополненной реальности, а также различные методы моделирования углов наклона и перегрузок, аналогичные тем, что испытывают летчики в реальных условиях [10]. В сфере космических тренажеров для подготовки космонавтов к работе со сложным оборудованием, дорогим, но наилучшим решением будет использование полномасштабных аналогов частей летательных аппаратов [3, 11]. Таким образом, виртуальные тренажеры – это сложные обучающие системы, моделирующие разнообразные аварийные и нештатные ситуации, статические и динамические нагрузки, и ключевую роль в работе этих тренажеров играет система визуализации.

### **Классификация и оценка компонентов визуализации в адаптивных тренажерах**

Для формализации структуры системы визуализации, системы классификации компонентов визуализации, описания математических соотношений, используемых в процессе выбора и оценки компонентов визуализации, применяются методы и инструменты теории множеств. Для осуществления классификации средств визуализации и их последующего выбора по предлагаемому алгоритму необходимо сначала определиться с терминологией.

Под термином «визуализация» в контексте адаптивного тренажера будем понимать процесс динамического отображения различных режимов функционирования и свойств человеко-машинных систем профессионального назначения в тренажере в соответствии с задаваемыми алгоритмами и моделями с помощью воздействия на органы чувств человека.

Под компонентом визуализации понимается совокупность программных методов (алгоритмов) и аппаратных средств, направленных на представление информации в виде, удобном для наблюдения или анализа человеком и максимально приближенном к реальному восприятию объекта [12].

Для реализации алгоритма выбора компонентов визуализации необходимо формализовать общую систему классификации. Для этого используем фасетный метод. В формализованной форме это будет означать, что каждому компоненту визуализации  $v_i$  из множеств всех компонентов  $V$  соответствует некоторое подмножество признаков классификации  $f_j$ , на основе которых осуществляется их группировка в массивы  $V_j$ :

$$\begin{aligned} v_i &\rightarrow \{f_j^i\}, \\ FV : f_j &\rightarrow \{v_i \mid f_j \in \{f_j^i\}\}, \\ f_j^i &\in F, v_i \in V, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $f_j^i$  – признак  $f_j$  классификации, характеризующий компонент  $v_i$ ;  $v_i$  – элемент множества компонентов визуализации, каждому из которых ставится в соответствие множество признаков  $\{f_j^i\}$ ;  $FV$  – функция формирования классификации по признаку  $f_j$ , которая ставит в соответствие каждому признаку  $f_j$  набор компонентов  $\{v_i\}$ , обладающих этим признаком.

Используя представленный алгоритм, можно сформировать классификацию компонентов визуализации по некоторым выбранным признакам. Если же поставить в соответствие признакам некоторое множество решаемых задач, то каждому признаку соответствует некоторое подмножество задач  $Z_j$  из множества всех возможных задач  $Z$  разработки системы визуализации:

$$f_j \rightarrow \{z_{jk} \mid z_{jk} \in Z_j\}, Z_j \in Z. \quad (2)$$

Тогда при решении задач  $\{z_{jk}\}$  формирования системы визуализации тренажера необходимо выбрать наилучшее сочетание из Парето-множества оптимальных компонентов визуализации  $V^*$ . Для определения этого множества предлагается использование адаптированных под предметную область тренажера критериев, отличающихся учетом специфики структуры и функционирования тренажеров и основанных на системном анализе уже реализованных тренажеров для различных предметных областей. К основным критериям оценки компонентов визуализации относятся:

1) Время интеграции  $T_i$   $i$ -го компонента системы визуализации, зависящее от сложности и времени адаптации выбранных компонентов:

$$T_i = (td_i + ta_i) \cdot k_{dev}(v_i), \quad (3)$$

где  $td_i$  – оценка времени разработки программных модулей для использования  $i$ -го компонента в рамках системы визуализации (в человеко-часах), определяемая, например, по методике СОСОМО II;

$ta_i$  – оценка времени адаптации  $i$ -го компонента для обеспечения его работоспособности с другими компонентами (в человеко-часах);

$k_{dev}(v_i)$  – коэффициент сложности взаимодействия с  $i$ -м компонентом на основе экспертной оценки разработчиков (в диапазоне от 0 до 1).

2) Стоимость использования  $E_i$   $i$ -го компонента системы визуализации, основанная на затратах на его приобретение, внедрение и поддержку:

$$E_i = (ep_i + ei_i \cdot T_i + es_i \cdot ts), \quad (4)$$

где  $ep_i$  – первичные затраты на покупку компонента визуализации, руб.;

$ei_i$  – затраты на интеграцию компонента в систему визуализации, равные заработной плате разработчика за 1 человеко-час, руб.;

$es$  – затраты на поддержку работоспособности компонента, руб.;

$ts$  – время гарантийной поддержки системы визуализации, месяцев.

3) Качество визуализации  $Q_i$   $i$ -го компонента системы визуализации, зависящее от реалистичности погружения в виртуальную реальность:

$$Q_i = \frac{\sum_{j=1}^{nP} \sum_{k=1}^{nZ} \frac{q_{ijk}}{nZ}}{nP}, \quad (5)$$

где  $q_{ijk}$  – оценка качества за  $k$ -ю задачу  $i$ -го компонента  $j$ -м обучающимся в диапазоне от 0 до 1;

$nZ$  – общее количество тестовых задач для оценки компонентов;

$nP$  – общее количество обучаемых, оценивающих компоненты.

4) Качество обучения  $QT_i$  с использованием  $i$ -го компонента системы визуализации, зависящее от успешности выполнения заданий:

$$QT_i = \frac{\sum_{j=1}^{nP} \sum_{k=1}^{nK} \frac{vp_{jk}(v_i)}{v_{jk}}}{nP \cdot nK}, \quad (6)$$

где  $vp_{jk}$  – количество выполненных заданий при использовании  $i$ -го компонента;

$v_{jk}$  – полный объем заданий в рамках  $k$ -й компетенции;

$nK$  – количество анализируемых компетенций.

5) Время обучения  $TT_i$  с использованием  $i$ -го компонента системы визуализации, основанное на экстраполяции эмпирических оценках предыдущих испытаний на тренажерах:

$$TT_i = \frac{\sum_{j=1}^{nP} tt_j(v_i)}{nP}, \quad (7)$$

где  $tt_j$  – общее время обучения пользователя  $j$ -го обучающегося.

Используя перечисленные выше критерии, можно построить рейтинг компонентов визуализации в рамках своей категории, что позволяет выбрать оптимальные технологии и средства визуализации. Однако маловероятно нахождение компонентов, оптимальных сразу по всем критериям одновременно. Поэтому на практике имеем Парето-множество оптимальных решений, среди которых предлагается выбрать наилучшее путем ранжирования полученного множества по выбранному критерию.

Задача  $z_{jk}$  считается решенной тогда, когда используемые средства визуализации позволяют воспроизвести моделируемые объекты в рамках данной задачи с некоторым заданным уровнем качества, определяемым совокупностью критериев (3–7).

Далее сформируем категории компонентов визуализации, в рамках которых будем в дальнейшем ранжировать технологии и средства визуализации [1, 13]. Основные признаки, по которым возможно классифицировать компоненты визуализации, можно представить в виде структурной схемы (рис. 1).



Рис. 1. Структурная схема основных признаков классификации компонентов визуализации

Перечисленные в ней признаки лишь в достаточной мере характеризуют средства и технологии визуализации и могут быть расширены при необходимости. Предлагаемая структурная схема классифицирует известные средства и технологии визуализации в единой системе признаков, что позволяет осуществить их группировку и ранжирование при решении задач выбора компонентов системы визуализации.

### Алгоритм выбора компонентов визуализации

Используя разработанную систему классификации компонентов визуализации и математическое обеспечение для их оценки по выбранным критериям (3–7), рассмотрим алгоритм выбора компонентов системы визуализации. Основным цикл включает следующие этапы:

1. Анализ технической системы (ТС). Включает исследование основных объектов ТС и взаимодействий между ними, которое можно формализовать в структуру вида:

$$TS = (U, C, O, L), \quad (8)$$

где  $TS$  – техническая система;

$U$  – множество объектов технической системы, в том числе управляющее оборудование, окружение, инструменты и приборы;

$C$  – множество состояний объектов технической системы в некоторые моменты времени  $t$ ;

$O$  – множество операций над объектами;

$L$  – множество ограничений на выполнение операций, параметры объектов и системы в целом.

Также данный этап включает анализ деятельности персонала, который представим в виде модели:

$$PM_j = \{(pr_{jk}, pa_{jk})\}, pr_{jk} \in PR_j, pa_{jk} \in PA_j, \quad (9)$$

где  $PM_j$  – модель деятельности  $j$ -го пользователя в виде множества упорядоченных пар продукционных правил  $PR_j$  и действий  $PA_j$ , осуществляемых пользователем в случае выполнения правила.

2. Декомпозиция структуры технической системы. Полученные на предыдущем этапе структура ТС и модель деятельности пользователей используются для декомпозиции технической системы на отдельные элементарные объекты  $u_i \in U$ . Для каждого объекта необходимо учесть множество соответствующих ему состояний, производимых операций и ограничений, а также выделить признаки  $f_{ij}$  объекта в соответствии с выбранной классификацией средств и технологий визуализации:

$$u_i \rightarrow \{f_{ij}\}. \quad (10)$$

3. Определение соответствия между объектами технической системы и компонентами визуализации. На основе определенных для каждого объекта ТС признаков осуществляется сопоставление объектов ТС и компонентов визуализации, обладающих сходными признаками:

$$u_i \rightarrow \{v_i \mid f_j^i \leftrightarrow f_{ij}\}, \quad (11)$$

то есть каждому объекту  $u_i$  ставятся в соответствие такие компоненты визуализации  $v_i$ , признаки  $f_j^i$  которых тождественны признакам  $f_{ij}$  объекта  $u_i$ .

4. Выбор компонентов визуализации. Полученное множество альтернатив для каждого объекта вида  $(u_i, \{v_i\})$  поступает на вход следующего этапа. Далее осуществляется сужение области определения возможных альтернатив за счет проверки ограничений технической системы и ограничений технических объектов. Неудовлетворяющие ограничениям сочетания «объект–компонент визуализации» удаляются из множества всех альтернатив. Полученная в результате область определения используется при многокритериальной оптимизации с целью получения области Парето-допустимых решений. На данном этапе возможно получение единственного оптимального решения, в противном случае необходимо выделить наименьшую область Парето для следующего этапа оптимизации.

На последнем шаге данного этапа используются общеизвестные методы, например, лексикографическая оптимизация. Осуществляется упорядочивание критериев по степени относительной важности, после чего выбирается оптимальное решение в соответствии с иерархией критериев, например:

$$E_i > QT_i > Q_i > T_i > TT_i. \quad (12)$$

Другой способ – линейная свертка  $R_i$  критериев с использованием весовых коэффициентов  $\omega$ :

$$R_i = \frac{\left( \omega_E \frac{E_{\max} - E_i}{E_{\max}} + \omega_{QT} \frac{QT_i}{QT_{\max}} + \omega_Q \frac{Q_i}{Q_{\max}} + \omega_T \frac{T_{\max} - T_i}{T_{\max}} + \omega_{TT} \frac{TT_{\max} - TT_i}{TT_{\max}} \right)}{5}, \quad (13)$$

где  $E_{\max}$ ,  $QT_{\max}$ ,  $Q_{\max}$ ,  $T_{\max}$ ,  $TT_{\max}$  – максимальные значения критериев в заданной области определения задачи. Таким образом, оцениваться будут нормированные значения критериев.

И в первом, и во втором случаях приоритетность критериев зависит от экспертного решения либо от требований заказчика, поэтому может варьироваться в каждом конкретном случае.

Итоговое решение представляет собой структуру системы визуализации, включающую оптимальный набор компонентов, используя которую возможно осуществить ее программную реализацию наиболее эффективно.

### **Апробация разработанного алгоритма при реализации тренажера для персонала угледобывающей отрасли**

Представленный алгоритм применялся на практике при разработке системы визуализации для тренажера угледобывающей шахты [14]. Приняты некоторые допущения: количество вариантов компонентов визуализации сокращено для уменьшения размерности задачи, для получения некоторых оценок осуществлена группировка компонентов в конфигурации в соответствии с их программно-аппаратной совместимостью. Также при проведении тестирования фокус-группами будем в итоговый результат помещать среднеарифметическую оценку каждой группы.

Первый этап алгоритма включает анализ предметной области и формализацию основных требований к разрабатываемому тренажеру. Поставлено задание разработать реалистичную систему визуализации шахты и ее компонентов, а также смоделировать аварийные процессы в ней (пожаротушение, задымление и затопление). Для задачи сформулированы граничные условия по каждому из критериев, а также требования к функциональности тренажера. Для оценки компонентов системы визуализации сформировано несколько фокус-групп общим объемом 200 человек, включающие как шахтеров разных возрастов, так и неподготовленных людей.

Следующий этап алгоритма – декомпозиция технической системы шахты и исследование технических объектов, входящих в ее состав с использованием математического обеспечения, представленного на этапе 1-го алгоритма. Проанализировав протекающие в шахте процессы, сформирована структура основных объектов (поверхность шахты, огнетушитель, шкаф, рельсы, вагонетка, телефон, электрические провода, техническое оборудование и т.д.), их состояний, возможных действий оператора над ними (взятие предмета, взаимодействие с ним, отпускание на пол и т.д.), а также составлен ряд ограничений как на выполнение операций, так и на протекание процессов в рамках виртуальной реальности (например, огнетушитель не работает, если не взят в руки). В соответствии с выражением (8) получим:

$TS$  – техническая система шахты;

$U$  – множество технических объектов шахты: огнетушитель, шкаф для хранения, вагонетка, телефон, дверь, распределительный щит, соответственно;

$S$  – множество состояний огнетушителя (нормальное, взят в руки, работает, пустой, выброшен), шкафа (закрыт, открыт), вагонетки (нормальное, горит, потушена), телефона (нормальное, трубка взята, звонок совершен), дверей (закрыта, открыта), распределительного щитка (нормальное, выключен, короткое замыкание);

$O$  – множество операций: перемещение объекта, взятие объекта, взаимодействие с объектом;

$L$  – множество ограничений на выполнение операций: отсутствие объекта, неправильное состояние объекта.

Так как пользователь также присутствует в виртуальной реальности, но не является техническим объектом, то необходимо отдельно описать и его состояния:

$$p = \{cp_1, cp_2, cp_3, cp_4\}, \quad (14)$$

где  $\{cp\}$  – множество состояний пользователя: нормальное, под физической нагрузкой, под эффектом задымления, под эффектом затопления.

На основе перечня операций формализована модель деятельности персонала, включающая следующие этапы: обнаружение источника пожара, перемещение к телефону, взятие трубки, оповещение о чрезвычайной ситуации, перемещение к шкафам с огнетушителями, открытие шкафа, взятие огнетушителя в руки, перемещение к источнику пожара на безопасное расстояние, тушение пожара до его полной ликвидации, утилизация огнетушителя, оповещение об успешном устранении пожара по телефону.

Каждому техническому объекту согласно этапу 2-го алгоритма ставим в соответствие набор признаков из разработанной системы классификации.

Далее осуществлены экспериментальные исследования по тестированию ряда конфигураций тренажера:

К1: Шлем VR HTC Vive, контроллеры HTC, трекары положения тела HTC, беговая дорожка, самоспасатель, 3D-моделирование в Unity.

К2: Шлем VR HTC Vive Pro, перчатки виртуальной реальности, трекары положения тела HTC, управляемая беговая дорожка с регулировкой угла наклона, имитатор самоспасателя, 3D-моделирование в Unity.

К3: Шлем VR HTC Vive Pro, контроллеры HTC, трекары положения тела HTC, управляемая беговая дорожка, самоспасатель, 3D-моделирование в Unreal Engine.

К4: Шлем VR Oculus Rift, контроллеры Oculus, видеосистема отслеживания положения тела, классическая беговая дорожка, имитатор самоспасателя, 3D-моделирование в Unreal Engine.

Каждая конфигурация была оценена отдельными подгруппами обучаемых по критериям качества визуализации, качества и времени обучения, после чего для каждого компонента конфигурации рассчитаны время интеграции в тренажер и стоимость использования. При расчете критериев использовалась линейная свертка.

Результатом данного сравнения стал выбор следующих компонентов, показавших наилучшие совокупные показатели: шлем виртуальной реальности (HTC Vive), контроллеры виртуальной реальности (совместимые с трекарами и шлемом HTC), трекары для отслеживания положения ног, управляемая беговая дорожка для имитации физических нагрузок, имитатор самоспасателя для реализации процессов дыхания в условиях шахты, 3D-моделирование в среде разработки Unity.

### Практическая реализация адаптивного тренажера

Реализация полученного тренажера представлена на рисунке 2. Процесс перемещения пользователя в виртуальном пространстве тренажера основан на использовании управляемой беговой дорожки, фиксирующей посредством трекеров положение пользователя на полотне. На основе этого положения программное обеспечение формирует управляющий сигнал, увеличивающий или уменьшающий скорость движения полотна. Текущая скорость полотна используется также для перемещения камеры в виртуальном пространстве.

Второй важный аппаратный компонент тренажера – имитатор самоспасателя, позволяющий моделировать процессы дыхания в изолирующих дыхательных аппаратах на основе регенеративного продукта без использования химических реагентов. Это достигается за счет программного управления заслонкой (для обеспечения требуемого сопротивления дыханию) и нагревателем (для нагрева газодыхательной смеси до заданной температуры). Внешний вид и структура имитатора самоспасателя представлена на рисунке 3.



Рис. 2. Общий вид тренажера



Рис. 3. Имитатор самоспасателя

Внешний вид имитатора полностью соответствует самоспасателю ШСС-ТМ и включает следующие основные части (рис. 3): 1 – загубник; 2 – имитатор теплообменника; 3 – гофрированная трубка; 4 – основной корпус (включает механизм управления заслонкой, нагреватель и блок управления); 5 – дыхательный мешок.

Для обеспечения управления имитатором самоспасателя, отслеживания и протоколирования показателей обучаемого используется соответствующее программное обеспечение (рис. 4). Панель позволяет гибко регулировать параметрами имитатора, фиксировать пневмотахограмму и спирограмму на основе преобразования данных, получаемых от датчика давления.

Программная реализация системы визуализации представлена на рисунке 5 и включает в себя трехмерную визуализацию шахты, оборудования, процессов пожаротушения.

Таким образом, с помощью разработанного алгоритма получен адаптивный тренажер и сформирована система визуализации для него. Причем в рамках поставленной задачи под визуализацией понимается не только реализация виртуальной реальности, но и интеграция подсистем имитации физических нагрузок (дорожки) и дыхательных процессов (имитатор самоспасателя), позволяющих осуществить комплексное воздействие на все органы чувств человека.

Предлагаемый алгоритм имеет высокую практическую и научную ценность по сравнению с классическим экспертным подходом к выбору компонентов: в разработанном алгоритме возможно снизить влияние человеческого фактора, повысить объективность оценки. Кроме того, он позволяет решать ряд смежных задач: классифицировать средства и технологии виртуальной реальности, ранжировать их по различным критериям, формализовать компоненты для их последующей реализации в виртуальной реальности.

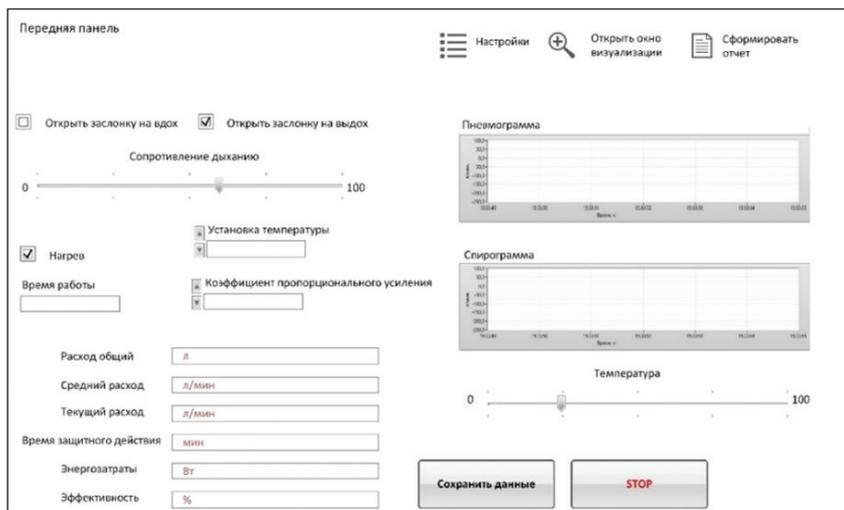


Рис. 4. Программное обеспечение имитатора самоспасателя



Рис. 5. Примеры функционирования системы визуализации

## Выводы

Сформулирован оригинальный алгоритм выбора компонентов визуализации для адаптивных тренажеров. В рамках предложенного алгоритма рассмотрены и решены задачи разработки системы классификации компонентов визуализации, их оценки, выбора оптимального набора компонентов для системы визуализации тренажера.

Предложенный алгоритм по сравнению с классическим подходом к экспертному выбору компонентов имеет ряд достоинств: большая объективность полученных оценок, сокращение времени на принятие решения. Это позволяет говорить о его научно-практической ценности.

Полученные результаты достаточно универсальны и могут быть адаптированы для применения при решении задач классификации компонентов различных тренажеров, например, для персонала транспортной, авиакосмической, промышленной отраслей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-013-00567 с использованием вычислительного оборудования ЦКП «Цифровое машиностроение».

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кручинина А.П., Латонов В.В., Чертополохов В.А. Обзор технологий визуальной имитации в тренажерных системах // Пилотируемые полеты в космос. – 2019. – № 3(32). – С. 89–107.
- [2] Patle D.S., Ahmad Z., Rangaiah G.P. Operator training simulators in the chemical industry: review, issues, and future directions // *Reviews in Chemical Engineering*. – 2014. – Т. 30. – № 2. – pp. 199–216.
- [3] Жохов А.И., Игнатьев С.В. Перспективы внедрения технологии интерактивных электронных технических руководств в практику эксплуатации тренажеров ПКА. // Пилотируемые полеты в космос. – 2019. – № 3(32). – С. 47–56.
- [4] Naderpour M., Lu J., Zhang G. An intelligent situation awareness support system for safety-critical environments // *Decision Support Systems*. – 2014. – Vol. 59. – pp. 325–340.
- [5] Bauer J., Ebert A. Mobile devices for virtual reality interaction. A survey of techniques and metaphors // *Virtual Realities*. – Springer, Cham, 2015. – С. 91–107.
- [6] Tuia D., Flamary R., Courty N. Multiclass feature learning for hyperspectral image classification: Sparse and hierarchical solutions // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2015. – Vol. 105. – pp. 272–285.
- [7] Hjørland B. Facet analysis: The logical approach to knowledge organization // *Information processing & management*. – 2013. – Vol. 49. – No 2. – pp. 545–557.
- [8] Hua H. Enabling focus cues in head-mounted displays // *Proceedings of the IEEE*. – 2017. – Vol. 105. – No 5. – pp. 805–824.
- [9] Roberts E., Beck A. Management and Training Programs of Military Drone Small Unmanned Aircraft Systems // *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. – Sage CA: Los Angeles, CA : SAGE Publications, 2017. – Vol. 61. – No 1. – pp. 1131–1135.
- [10] Kasirzadeh A., Saddoune M., Soumis F. Airline crew scheduling: models, algorithms, and data sets // *EURO Journal on Transportation and Logistics*. – 2017. – Vol. 6. – No 2. – pp. 111–137.
- [11] Nazir S., Manca D. How a plant simulator can improve industrial safety // *Process Safety Progress*. – 2015. – Vol. 34. – No 3. – pp. 237–243.
- [12] Zhu E. et al. Augmented reality in healthcare education: an integrative review // *Peer J*. – 2014. – Vol. 2. – p. 469.

- [13] Yi Y., Cheng Y., Xu C. Mining human movement evolution for complex action recognition // *Expert Systems with Applications*. – 2017. – Vol. 78. – pp. 259–272.
- [14] Design and development of Adaptive Simulators Using 3D Modeling. Dedov D., Krasnyanskiy M., Obukhov A., Arkhipov A. // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2017. – Vol. 12. – No 20. – pp. 10415–10422.

## REFERENCES

- [1] Kruchinina A.P., Platonov V.V., Certopoloha V.A. Review of visual imitation technologies in simulation systems // *Scientific Journal “Manned Spaceflight”*. – 2019. – No 3(32). – pp. 89–107.
- [2] Patle D.S., Ahmad Z., Rangaiah G.P. Operator training simulators in the chemical industry: review, issues, and future directions // *Reviews in Chemical Engineering*. – 2014. – V. 30. – No 2. – pp. 199–216.
- [3] Zhokhov A.I., Ignatiev S.V. Prospects for the introduction of the interactive electronic technical manuals technology in the practice of operation of manned spacecraft simulators. // *Scientific Journal “Manned Spaceflight”*. – 2019. – No 3(32). – pp. 47–56.
- [4] Naderpour M., Lu J., Zhang G. An intelligent situation awareness support system for safety-critical environments // *Decision Support Systems*. – 2014. – Vol. 59. – pp. 325–340.
- [5] Bauer J., Ebert A. Mobile devices for virtual reality interaction. A survey of techniques and metaphors // *Virtual Realities*. – Springer, Cham, 2015. – pp. 91–107.
- [6] Tuia D., Flamary R., Courty N. Multiclass feature learning for hyperspectral image classification: Sparse and hierarchical solutions // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2015. – Vol. 105. – pp. 272–285.
- [7] Hjørland B. Facet analysis: The logical approach to knowledge organization // *Information processing & management*. – 2013. – Vol. 49. – No 2. – pp. 545–557.
- [8] Hua H. Enabling focus cues in head-mounted displays // *Proceedings of the IEEE*. – 2017. – Vol. 105. – No 5. – pp. 805–824.
- [9] Roberts E., Beck A. Management and Training Programs of Military Drone Small Unmanned Aircraft Systems // *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. – Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications, 2017. – Vol. 61. – No 1. – pp. 1131–1135.
- [10] Kasirzadeh A., Saddoune M., Soumis F. Airline crew scheduling: models, algorithms, and data sets // *EURO Journal on Transportation and Logistics*. – 2017. – Vol. 6. – No 2. – pp. 111–137.
- [11] Nazir S., Manca D. How a plant simulator can improve industrial safety // *Process Safety Progress*. – 2015. – Vol. 34. – No 3. – pp. 237–243.
- [12] Zhu E. et al. Augmented reality in healthcare education: an integrative review // *Peer J*. – 2014. – Vol. 2. – p. 469.
- [13] Yi Y., Cheng Y., Xu C. Mining human movement evolution for complex action recognition // *Expert Systems with Applications*. – 2017. – Vol. 78. – pp. 259–272.
- [14] Design and development of adaptive simulators using 3D modeling. Dedov D., Krasnyanskiy M., Obukhov A., Arkhipov A. // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2017. – Vol. 12. – No 20. – pp. 10415–10422.