

КОМПЬЮТЕРНЫЙ ТРЕНИНГ ОПЕРАТОРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ – ЗАСТОЙ ИЛИ ПУТЬ К НОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ: ИСТОРИЯ, РЫНОК, НАПРАВЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОГО ПРОРЫВА, ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ

**В.М. Дозорцев, В.П. Погорелов, Д.В. Агафонов, А.А. Аносов,
И.В. Слостенков, А.И. Фролов (ООО "Центр цифровых технологий")**

Приводится исторический очерк возникновения и развития компьютерных тренажеров (КТ) для обучения операторов технологических процессов. Прослеживается эволюция КТ от первых систем для мэйнфреймов до адаптируемых интеллектуальных тренажеров на локальных сетях ПК. Приводятся текущие показатели и прогнозы мирового рынка КТ. Рассматриваются тренды современного тренажеростроения: облачные решения, цифровые двойники ТП, иммерсивные интерфейсы пользователей, использование искусственного интеллекта для инструктирования операторов, персонализации и оценки результатов тренинга. Обсуждаются проблемы импортозамещения мировых КТ на отечественном рынке и перспективы развития российских тренажерных систем.

Ключевые слова: компьютерные тренажеры, динамическое моделирование ТП, интерфейсы оператора, автоматизированное инструктирование, цифровые двойники, автоматическая оценка действий оператора, виртуальная и дополненная реальность, адаптируемые интеллектуальные тренажеры.

ВВЕДЕНИЕ. КРИЗИС НА ФОНЕ СОВЕРШЕНСТВА?

Исторически первые компьютерные тренажеры (КТ) для обучения операторов ТП появились в атомной промышленности и электроэнергетике, где число аварийных инцидентов, связанных с человеческим фактором, достигает 80% [1] и 70% [2] соответственно. В перерабатывающих отраслях промышленности доля инцидентов из-за некорректных действий человека несколько ниже (40...50%) [3], но именно нефтегазовая отрасль стала драйвером КТ из-за сложности и опасности технологических процессов и чрезвычайно высокой цены операторских ошибок.

Так, средние за четверть века потери отрасли от аварий и аварийных инцидентов, вызванных ошибками операторов, составили 0,55 долл. США на тонну перерабатываемого сырья, что в масштабах российской нефтепереработки дает порядка 140 млн. долл. США на 2021 г. С учетом доли и цен российского рынка это обеспечивает окупаемость КТ при сокращении числа

аварий и инцидентов всего на 8,8% [3]. Как минимум не меньшим объемом оцениваются потери, вызванные снижением производительности и качества продукции из-за несовершенного операторского управления. Другими словами, даже при безаварийной работе компьютерный тренинг, протекающий в безопасной для операторов и производственных активов среде, ускоряет и качественно улучшает подготовку персонала, что приносит предприятиям существенные экономические выгоды за счет более уверенного и эффективного ведения ТП. Тренажеры незаменимы также при пуске новых объектов, в разработке и проверке технологических решений и стратегий управления.

Важным фактором, обеспечивающим внедрение КТ, являются и ужесточающиеся нормативные требования к подготовке операторов по всему миру. Так, в России в нефтегазовой отрасли тренинг обязателен для оперативного персонала всех объектов I-й и II-й категории взрывоопасности¹ и традиционно делится на достаточно

¹ <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=390702&ysclid=mn73536n1f562229708>

продолжительный начальный (при поступлении на работу), периодический (не реже одного раза в квартал) и повторный (при длительном отсутствии оператора на рабочем месте или по решению линейного руководителя). Успех компьютерного тренинга за последние полвека впечатляет. После ковидного спада мировой рынок КТ восстановился и демонстрирует умеренный, но стабильный рост. В то же время проблемы этого важнейшего направления промышленной автоматизации и необходимость серьезной модернизации КТ нарастают и все острее ощущаются сообществами исследователей, разработчиков и пользователей [4].

Количество внедренных тренажеров растет, несмотря на это проявляется четкий тренд на снижение интереса у конечных пользователей (операторов и инструкторов). Согласно глобальному мировому опросу консалтинговой группы ARC [5], среднее время тренинга составило чуть меньше 14 дней в год, включая продолжительный начальный тренинг перед пуском установки и тренировки в ответ на возникающие нештатные ситуации. На регулярный тренинг приходится едва ли половина этого времени. Ситуация в России еще менее благополучна. Исследование НПЗ крупнейшей российской нефтяной компании выявило существенный разброс времени тренинга — от одного дня в квартал до нескольких часов однократной годичной сессии (и то примерно для 60% операторов). Часто тренинг превращается в рутину, база тренировочных упражнений практически не обновляется, а операторы по прошествии первых лет эксплуатации тренажера практически теряют к нему интерес.

Причин такого положения дел несколько. Во-первых, за четверть века, прошедшую с пика тематики КТ, произошло изменение роли оператора. С усложнением процессов и систем управления у оператора все больше ответственности и рисков, но вместе с тем ему оставляют все меньше самостоятельных решений. В суперопасной атомной отрасли, вообще, его задача сводится к максимально быстрому поиску причины нарушения и четкому следованию заранее определенной процедуре.

Во-вторых, новое поколение операторов менее ориентировано на глубокое освоение профессии, престиж которой снижается. Во многом разрушена система профессиональной подготовки операторов. Меняется и роль инструктора: тренажер как средство передачи обучаемым уникального индивидуального профессионального опыта затребован все меньше. К тому же в отсутствие надежных инструментов анализа действий оператора инструкторы и не в состоянии полно и объективно оценить всех обучаемых операторов. А без такой оценки нет обратной связи оператору и невозможно его индивидуализированное обучение.

Все это происходит на фоне изменения самих тренажеров — усложняются математические модели ТП, появляются новые пользовательские интерфейсы, КТ интегриру-

ются с другими высокотехнологичными инструментами управления, в том числе — усовершенствованным управлением ТП, цифровыми двойниками (ЦД), искусственным интеллектом (ИИ)².

Встречается мнение, что компьютерный тренинг перестал быть научной проблемой. Действительно ли пик пройден и все в тематике КТ сделано? Представляется, что это далеко не так.

Тренажеры — парадоксальный инструмент: они состоят из сугубо технических компонентов (модели процессов, пользовательские интерфейсы, системы автоматизированного инструктирования, др.), но исполнение этих компонентов на высоком уровне не гарантирует, что получится КТ такого же качества. Цель компьютерного тренинга (научение операторов безопасному и эффективному управлению ТП³) находится за пределами чистой техники и ее невозможно достичь без развитой методики обучения. И такая методика не может быть «усредненной», рассчитанной на всех — операторы разные, им требуются различные составы, объемы и индивидуальные траектории обучения.

Показательно определение цели компьютерного тренинга, известное одному из авторов настоящей работы из личной коммуникации с опытейшим консультантом, много лет подготавливавшим инструкторов КТ на заводах компании ВР по всему миру. Он утверждал (конечно, с определенной долей преувеличения), что все операторы делятся на три группы: первым (15%) не нужны никакие КТ — они уже все понимают и умеют; другим (тоже 15%) — не помогут никакие тренажеры, они практически необучаемы и, скорее всего, профессионально непригодны. Но между ними располагаются 70% остальных операторов, и задача КТ — приблизить их к первой группе.

Определенно, мировой компьютерный тренинг в кризисе, и, возможно, стоит на пороге принципиальных изменений. Но разобраться в причинах и наметить пути выхода из кризиса нельзя без восстановления исторической и текущей картины этого направления.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. Вначале дается краткий очерк истории КТ в мире и в России, характеризуется текущий и прогнозируемый рынок тренажеров, анализируются тренды их развития с особым вниманием ко все ширящемуся проникновению искусственного интеллекта в построение и эксплуатацию КТ. Наконец, рассматривается проблема импортозамещения западных решений и делается попытка обозначить перспективы современных российских КТ.

ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК КТ

Первые КТ появились еще в «доцифровую» эпоху (начало 1960-х гг. XX века) и реализовывались на физических

² Steve Jackson. Digital Twins & Operator Training Simulators / <https://www.linkedin.com/pulse/digital-twins-operator-training-simulators-jackson-ma-ceng-euring/>

³ Отличие от обучения (целенаправленного педагогического процесса) научение — процесс и результат приобретения оператором индивидуального опыта (в том числе, работы в группе).

Таблица. Этапы развития КТ для обучения промышленных операторов

Этапы		Мировые КТ	Советские и российские КТ
1	Основы динамического моделирования химических процессов (1960–1970 гг.)	Разработан математический и вычислительный базис КТ (активность в этом направлении не прекращается) [7, 8, 29–32].	Строгий математический аппарат и имитационное моделирование динамики ТП (численные схемы и устойчивость решения) [9].
2	Первые промышленные КТ (1980–1990 гг.)	Переход на мэйнфреймы, позже – на мини-ЭВМ, микрокомпьютеры, затем на ПК. Концепция диспетчерского тренажера в электроэнергетике (численное моделирование, ЧМИ диспетчера, интерфейс инструктора) [10].	Программные интерфейсы оператора и инструктора, воспроизведение аварийных ситуаций. Разработки в центральных и отраслевых институтах (ЦНИИКА, ВНИИНефтехим, ВНИПИнефть, НИИхиммаш, Гипрокаучук) и в ведущих вузах (МЭИ, РГУ нефти и газа, Уфимский нефтяной институт).
		Тренажер Линча: интерфейс реальной системы управления [33].	ПК и многопользовательские локальные сети. Промышленные КТ для теплоэнергетики и нефтепереработки. В целевой архитектуре – модель ТП, пользовательские интерфейсы, сценарии аварий.
		Концепция EPRI ⁴ . КТ нового поколения с учетом эффективности и экономической выгоды от КТ. Широкое внедрение по всему миру [34].	Промышленные КТ для теплоэнергетики и нефтепереработки [11, 43, 3].
3	Систематическая теория КТ (1990–2000 гг.)	Ключевые работы по теории КТ и когнитивному моделированию деятельности оператора [13, 14].	Формирование российской школы КТ [15, 3].
			Архитектуры и отраслевые решения [42, 43]. Теоретический и методологический фундамент КТ: информационно-функциональная структура, когнитивная модель операторской деятельности [3].
4	Полномасштабные промышленные КТ (2000–2010 гг.)	Наиболее цитируемый обзор и полный промышленный кейс [16, 17].	КТ для нефтехимии, нефтепереработки, газовой промышленности, металлургии, энергетики (включая атомную). Сетевые многопользовательские учебные классы, 3D-визуализация. Тренажерные платформы – от рыночных компаний, инжиниринговых центров в вузах (Москва, СПб., Казань, пр.) [18, 19].
5	Комплексная методология КТ. VR/AR-тренажеры (после 2010 гг.)	VR-тренажеры для формирования у оператора сложных причинно-следственных связей, объясняющих поведение оборудования [22].	Предтренажерная подготовка операторов: навыки обнаружения отклонений, диагностики их причин, исполнения процедур [20, 21].
		Взаимодействие полевого и консольного операторов в аварийных ситуациях на базе AR-технологии [23].	Переход от отдельных навыков к развитию компетенций персонала [44].
		Цифровые двойники (ЦД) биореактора, позволяющий обучаемому в VR-среде реагировать на редкие события на объекте и получать оценку своих действий [38].	Панорамные интерфейсы полевого оператора – российская альтернатива VR-тренажерам [24].
6	Адаптивные интеллектуальные КТ (после 2020 гг.)	Агентное моделирование и машинное обучение для адаптации тренинга к текущим потребностям отдельных обучаемых [26].	Автоматическая оценка действий оператора [25].
		ЦД как среда обучения с адаптацией, переносом навыков и прогнозированием поведения обучаемого. Предварительная архитектура мультиагентного КТ будущего. [27]. Обучения до пуска реального объекта. ЦД прокладывают путь к on-line тренажерам, связанным с реальными РСУ (on-line настройка математической модели, пополнение базы тренировочных упражнений, пр.) [39, 40].	КТ как доверенный интеллектуальный агент оператора. Тренинг эффективных операторских стратегий в опасных ситуациях [28].

⁴ SEPRI (Electric Power Research Institute) – независимая некоммерческая организация, проводящая исследования и разработки в области генерации, распределения и использования электроэнергии.

макетах, аналоговых моделях и натуральных панелях, имитирующих реальные щиты управления. Как правило, они включали в себя не более 15 контроллеров, были дорогими, громоздкими и малогибкими [6].

Периодизация собственно цифровых КТ традиционнo строилась на эволюции их технических составляющих и выделяла три поколения КТ: тренажеры на аналоговых, гибридных и первых цифровых ЭВМ; тренажеры на мэйнфреймах и первых персональных компьютерах (ПК); тренажеры на локальных сетях мощных ПК [3]. На сегодня такая периодизация выглядит чересчур техноцентричной; более содержательная версия кратко представлена в таблице.

Советская и российская история КТ в целом коррелирует с общемировой, но с важными нюансами (сравн. средний и правый столбцы таблицы). Предпосылки развития КТ в СССР, превращавшегося к началу 1960-х в крупную индустриальную державу, лежат в масштабной автоматизации энергетики, химии, металлургии и нефтепереработки, обострившей потребность в качественно новой подготовке операторов сложных непрерывных ТП.

Основы КТ (динамическое моделирование ТП, численные решатели моделей), заложенные в мировой науке в 1960-1970 гг. [7-9], были использованы уже в первых тренажерах на базе мэйнфреймов, мини- и микрокомпьютеров, а затем и на базе ПК. Ключевые отрасли того периода – энергетика [10, 11] и нефтепереработка [12, 3]. Накопленный опыт отразился в теоретических и методических работах по КТ [13-15, 3].

На этом этапе произошло разделение тренажеров на типовые и специализированные. Типовые предназначались для обучения студентов и операторов-новичков и были снабжены моделями стандартных ТП (без кастомизации под специфику процесса), упрощенным интерфейсом и ограниченными функциями обучения. Специализированные системы основывались на фундаментальном моделировании конкретных промышленных установок, высокоточном воспроизведении среды операторского управления и на продвинутых методах обучения.

Расцвет КТ (1995-2010 гг.) – период широкого промышленного внедрения, приведший к появлению «золотого стандарта» тренажеров, подразумевавшего фундаментальное моделирование ТП, высокоточную эмуляцию или стимуляцию (то есть использование «родного» ПО) систем управления и операторских интерфейсов, развитый набор инструкторских инструментов [16-19]. Это позволило отграничить такие полномасштабные КТ от систем другого класса – с не столь развитыми и полными базами данных о физико-химических свойствах веществ, наборами реакций, решателями динамических моделей, библиотеками технологического оборудования; с не столь точным воспроизведением операторских интерфейсов и с урезанной функциональностью инструментов автоматизированного инструктирования. Такие

упрощенные системы находят свою рыночную нишу, и их не следует смешивать с примитивными продуктами, маскирующимися под КТ и покупаемыми только для формального соблюдения нормативных требований.

Базовые отрасли этого периода – нефтепереработка, нефтехимия, газовая промышленность, металлургия, энергетика. На мировых рынках доминировали крупные вендоры (подробнее – см. следующий раздел). В России появилось несколько тренажерных платформ, разработанных коммерческими фирмами, отраслевыми центрами и вузами. Параллельно началось проникновение западных производителей на российский рынок.

В начале 2010-х гг. наметился серьезный поворот к комплексной методологии тренинга (предтренажерная подготовка операторов [20, 21]) и к новой визуализации (VR/AR-тренажеры – [22-24]). Наконец, с 2020 г. можно отсчитывать активный интерес к интеллектуальным КТ: автоматическая оценка действий оператора [25], персонализация и адаптация обучения под отдельных операторов [26, 27], КТ как персональный интеллектуальный агент обучаемого [28]. Последний этап будет внимательно рассмотрен ниже при обсуждении современных трендов развития КТ.

Особенности советской и российской школы

Государственная поддержка разработок КТ в СССР мотивировалась масштабностью промышленного производства и высокими рисками, связанными с человеческим фактором. Страна располагала развитой теорией и практикой автоматического управления, сильной математической и инженерной школой. Отечественные тренажеры периода 1970-1980-х гг. не уступали, а иногда и превосходили зарубежные аналоги (правда, исключая интерфейсный компонент КТ).

Важные отличия советского (а затем и российского) тренажеростроения от западного – фокус на глубокие математические модели и интеграцию с распределенными системами управления (PCY); системный подход к созданию КТ; приоритет безопасности перед производительностью; глубоко разработанный инженерно-психологичной подход к моделированию деятельности оператора в тренинге в отличие от преимущественно поведенческого анализа за рубежом (см. обзор в работе [3]). Оператор в таком подходе изначально рассматривался не как «элемент системы», а как активный субъект деятельности. Это определяет высокую потенциальную готовность российских разработчиков к реализации современных трендов тренажеростроения.

РЫНОК КТ – ОБЪЕМЫ, СЕГМЕНТАЦИЯ, ПРОГНОЗ⁵

Объем глобального рынка КТ (по всем отраслям применения) составил в 2025 г. 14,1 млрд. долл. США и по прогнозам к 2035 г. вырастет до 26,8 млрд. при годовом росте 6,7%⁶. В рассматриваемом нефтегазовом сегменте имеем, соответственно, 3,1 млрд. (2025 г.) и 5 млрд. (2035 г.)

⁵ Предупреждаем, что приводимый в этом разделе прогноз развития рынка относится к концу 2025 г. и в новой реальности вполне может измениться.

⁶ <https://www.gminsights.com/industry-analysis/operator-training-simulator-market>

с годовым ростом 5,1%. Доля этого сегмента в общем объеме падает: 22% (2025 г.) и 18,7% (2035г.), соответственно⁷. Это можно объяснить относительной насыщенностью нефтегазового сектора, куда тренажеры массово проникали еще в 90-х гг. XX века. Собственно на переработку (downstream), наиболее сложный и опасный подсектор, приходится 42% общего объема.

Основные драйверы роста – переход от предотвращения аварий к проактивному управлению рисками; ужесточающиеся отраслевые требования к безопасности производства, компетентности и операционному соответствию операторов (в том числе полевых); строгие правила документирования процедур и результатов подготовки персонала; давление страхового рынка.

По компонентам продаж рынок делится на ПО (занимает 65%), оборудование (25%) и услуги (10%). Столь высокая доля ПО объясняется усложнением КТ (детальные математические модели ТП, эмулированная логика, управление сценариями) и появлением новых задач (обработка данных, интеграция со смежными системами управления). Те же причины определяют преимущественно прямые продажи КТ в нефтегазе: 81% систем покупается непосредственно у вендора, что удешевляет поддержание жизненного цикла продуктов и способствует долгосрочному сотрудничеству поставщиков и пользователей.

На мировой карте КТ Северная Америка занимает 27% (причем 83% из них приходится на США). Последний рынок имеет долгую историю и отличается наличием огромной нефтегазовой промышленности, строгими требованиями к безопасности, установкой на модернизацию и поддержку жизненного цикла систем, традиционным спросом на сложные решения (цифровые двойники, искусственный интеллект, пр.).

На европейский регион приходится 14,9% (при 4,8% годового роста). Это высоко регулируемый рынок со строгими требованиями к экологии, безопасности и операционной эффективности, фокусом на максимальную точность КТ, связь с ЦД, интеграцию с другими системами управления. Существенного роста продаж новых тренажеров трудно ожидать, в частности, из-за серьезного давления альтернативных источников энергии. Основные проекты в Европе – модернизация, замена и обновление существующих систем.

Азиатско-Тихоокеанский регион в 2025 г. занял 22,4% рынка и будет расти с темпом около 5,7% в год. В условиях быстрой индустриализации и высоких инвестиций спрос на КТ ожидается высоким из-за ввода новых мощностей и пробелов в квалификации операторов. Наконец, регион Ближнего Востока и Африки – лидер рынка (30,2% при предполагаемом годовом росте 5,3%), что определяется значительными инвестициями в несколько супер-крупных отраслевых строительных проектов на фоне дешевого сырья, доступности капитала, централизованных инвестиционных решений и требований по обучению и сертификации национальной рабочей силы.

⁷ <https://www.gminsights.com/ru/industry-analysis/oil-gas-ots-market>

⁸ <https://www.strategymarketresearch.com/market-report/operator-training-simulator-market>

Компании-лидеры мирового тренажерного рынка – Siemens, ABB, Aspen, Honeywell, Schneider Electric, Yokogawa Electric; у каждого из них свои сильные стороны – от бесшовной интеграции с PCSU и собственной платформой моделирования до серьезных инвестиций в ИИ-решения.

К факторам, сдерживающим рост, (и в мире, и в России) можно отнести следующие:

- существенные первоначальные затраты пользователя (цена входа для средних и небольших предприятий отрасли слишком высока),
- сложность разработки – разработчикам нужны высококвалифицированные кадры по широкому спектру решений,
- высокая цена поддержки и модернизации систем – КТ быстро устаревают, необходимы их постоянные улучшения,
- нехватка квалифицированных эксплуатантов: инструкторов (в том числе операторов-инструкторов), разработчиков сценариев, оценщиков результатов обучения на местах, пр.

КТ НА ПОРОГЕ ПРОРЫВА?

Традиционные классические КТ (1980-90-е гг.) предполагали автономные модели, не зависящие от реального состояния ТП, детерминированные неперсонализированные сценарии обучения, ручную настройку состава и сложности тренировочных упражнений, ручную оценку результатов тренинга экспертами-инструкторами. С тех пор в КТ пришло много новаций (см. Таблицу): совершенствовалась методология тренинга [20, 21], распространились облачные решения, которые обеспечили актуализацию тренажеров и доступ к ним операторам в удаленных и часто труднодоступных местах, что критически удешевило локальную инфраструктуру КТ [45]. Теперь стал возможен тренинг, где и когда удобно его участникам. Другая важная инновация – иммерсивные КТ (на глобальном рынке КТ в 2024 г. их было уже 38%, но в нефтегазе эта доля пока значительно скромнее). Существующие на сегодня VR/AR решения работают без связи с системами управления в реальном времени [23, 24], но в парадигме on-line КТ (см. ниже) иммерсивный подход станет еще актуальней.

На горизонте ближайших лет назревает принципиальный поворот – ключевым функциональным ядром новых КТ должны стать цифровые двойники и искусственный интеллект.

Благодаря ЦД преодолевается, как казалось, вечный разрыв между обучением и реальной работой объекта, а моделирование в КТ перестает быть изолированным процессом [46]. Практический пример – приобретение корпорацией Schneider Electric компании EcoStructure Power Operation для разработки связи КТ с ЦД процесса⁸. Конечно, не ставится задача постоянно поддерживать КТ в состоянии, соответствующем текущему режиму установки;

это технически нереализуемо и не имеет смысла. Однако периодическая синхронизация КТ с реальным ТП⁹, а также использование данных исторического модуля РСУ для определения состояний процесса, необходимых для обучения обнаружению отклонений хода ТП от нормы, – важные функции КТ как цифрового двойника процесса. В перспективе ЦД смогут отслеживать продуктивность обучаемого в реальном времени, анализировать поведение и даже намерения оператора (следить за взглядом и модуляцией голоса, распознавать позы, тестировать уровень стресса, концентрации внимания и когнитивной нагрузки) [47].

Влияние инструментов ИИ на развитие КТ чрезвычайно многосторонне. Выделим следующие перспективные направления, в которых уже накоплена критическая теоретическая база и делаются пробные практические шаги:

- интеллектуальная оценка операторских навыков и компетенций [48, 44],
- генерация и «ветвление» сценариев в зависимости от успешности действий конкретного оператора [49-51],
- адаптация сложности обучения (сложность сценария, скорость развития аварии, число параллельных отказов, степень неопределенности) под уровень конкретного оператора¹⁰ [52, 53],
- когнитивное моделирование операторов (внимание, память, нагрузка, стресс, принятие решений) для прогнозирования ошибок и тренировки ситуационной осведомленности [54],
- ИИ-инструктор, анализирующий действия оператора, выдающий подсказки, объясняющий ошибки и протоколирующий процесс обучения [55].

КТ как лично-адаптируемый интеллектуальный агент

На классическом этапе (1960-1990 гг.) оператор был объектом тренинга, но не частью интеллектуальной системы обучения. В когнитивных КТ (1990-2010 гг.) появилась модель деятельности оператора (на ней построена методология тренинга). Адаптивные когнитивные КТ (после 2010 г.) уходят от универсального тренинга к персонализированному обучению (моделирование индивидуального стиля управления, персональные траектории обучения, прогнозирование индивидуальных ошибок). Система обучения адаптируется под оператора, а не наоборот.

Интеллектуальные ассистенты оператора (после 2015 г.) совмещают функции поддержки принятия решений, экспертных систем и предиктивной аналитики. Но они пока недостаточно персонализированы, не формируют долгосрочную модель оператора и не дают глубокой адаптации.

Просматриваемая на сегодня целевая вершина – КТ как лично-адаптируемый интеллектуальный агент (ЛАИА), представляющий собой пер-

сонального когнитивного партнера, который строит и поддерживает индивидуальную когнитивную модель оператора, динамически адаптируется (подстраивается) под оператора, рассматривает его доверие к системе обучения как ключевую переменную [28]. ЛАИА естественно вырастает из КТ, потому что в современном тренажере уже есть обучающая среда, задатки когнитивной модели оператора, сценарии нарушений и контур адаптации.

ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ КТ

С задачей импортозамещения Россия столкнулась не первой. Опыт интенсивной модернизации высокотехнологичных отраслей экономики за счет внедрения собственных инновационных решений прошли Китай, Тайвань, Южная Корея и другие страны. Но наша ситуация обладает рядом особенностей:

- здесь не помогут протекционистские меры – западные производители сами ушли с рынка;
- мы, несомненно, нуждаемся в продвижении своих продуктов на внешние рынки: внутренний рынок слишком мал – только под него создавать дорогие инновационные решения нерационально. Это подразумевает сохранение разумных льгот для производителей ПО, критически важного для укрепления ключевой нефтегазовой отрасли;
- ушедшие КТ-вендоры оставили большую инсталлированную базу, которую все труднее сопровождать и все рискованней использовать. Пока сервера и рабочие станции КТ мало взаимодействуют с другими (в том числе критическими) сегментами инфраструктуры предприятия, но их операционные системы несовместимы с новейшими средствами кибербезопасности и уязвимы перед кибератаками. По мере перехода к on-line КТ эти риски будут резко возрастать;
- наблюдается устаревание тренажеров и рутинизация тренинга, причем в России этот процесс идет скорее, чем по миру;
- как результат, необходимы мощные отечественные платформы, не повторяющие западные решения и нацеленные на будущую трансформацию КТ.

В этой ситуации участникам рынка нужны приоритеты развития. Разработчикам надо осознать необходимость создания современного инновационного продукта: повторение существующих аналогов устареет еще до выхода на рынок. Предприятиям нет смысла покупать дешевые и функционально ограниченные продукты; они лишь ускорят обесценивание тренинга и не защитят ни персонал, ни активы предприятий. Конечным пользователям важно с первых этапов разработки включаться в сотрудничество с проектной и внедренческой командой производителя – это залог успеха тренажерного проекта.

⁹ Такие попытки в истории тренажеростроения известны: с помощью специальной системы ProcessSync КТ подстраивался под режим установки, зафиксированный в историческом модуле системы управления Honeywell EPKS [56]. Это усиливало тренинг (актуализация состояния процесса, демонстрация на КТ реальных режимов ТП и проверка последствий управляющих действий перед их реализацией на объекте).

¹⁰ <https://yenra.com/ai20/immersive-skill-training-simulations/>

Опыт одной тренажерной команды

На сегодня в отрасли работает несколько команд-разработчиков с разной историей и разным — по длительности и широте — опытом. Остановимся подробнее на команде, прошедшей свой 35-летний путь в тренажеростроении — от Института проблем управления (ИПУ) АН СССР¹¹ и СП «Петроком» до российского подразделения корпорации Honeywell и ООО «Центр цифровых технологий» (ЦЦТ).

Именно эта команда выходцев из ИПУ в начале 90-х, опираясь на опыт взаимодействия с компанией Atlantic Simulation (США), разработала первую в мире базирующуюся на ПК полномасштабную тренажерную платформу КТК-М, ориентированную на обучение операторов предприятий нефтегазовой отрасли [3]. В течение 1992-2005 гг. специалисты СП «Петроком», оставшиеся самым крупным в отрасли профессиональным коллективом разработчиков, выполнили более 50 тренажерных проектов на 20 технологических площадках России, стран СНГ и Восточной Европы. С присоединением в 2005 г. «Петрокома» к Российскому подразделению мирового лидера промышленной автоматизации корпорации Honeywell команда получила доступ к тренажерным технологиям мирового класса [56]; в период 2005-2022 гг. до ухода западных производителей силами тренажерного подразделения «Хоневелл» было выполнено более 130 проектов разного масштаба на 30 площадках отрасли (не считая проектов, реализованных подрядчиками на хоневелловских системах). При этом решение КТК-М было сохранено, чтобы на следующем этапе, начиная с середины 2010-х гг., в сотрудничестве с ЦЦТ (тогда одним из инжиниринговых центров МФТИ, а затем частью группы Рубитех) преобразоваться в новую санкционно-защищенную платформу DeltaSim, основанную на самых современных инструментах тренажеростроения [57].

Архитектура DeltaSim изначально ориентирована на облачные паттерны развертывания в пределах периметра заказчика (on-premise private cloud), поскольку построена не как набор изолированных рабочих станций, а как распределенная система с централизованной серверной частью и сетевым доступом клиентов. Центральный сервер хранит конфигурации моделей, операторские интерфейсы, начальные состояния, сценарии обучения, ведет журналы тренинга и статистику обучения, а также координирует расчет динамики модели на разных вычислительных узлах.

DeltaSim поддерживает горизонтальное масштабирование Центрального сервера, экземпляры которого могут быть развернуты на одной или нескольких виртуальных машинах со встроенным компонентом координации и балансировки нагрузки. Это позволяет увеличивать число параллельно работающих тренажеров и пользователей, как и перераспределять функции между узлами. Такая схема повышает и отказоустойчивость: при выходе из строя одного экземпляра его функции могут автоматически переноситься на оставшиеся узлы без остановки системы.

¹¹ Ныне Институт проблем управления РАН им. В.А. Трапезникова.

DeltaSim обеспечивает распределенный расчет динамики моделей на разных клиентских компьютерах или специализированных серверах. Система легко адаптируется к запуску на виртуальных машинах, в частных облаках и в контейнеризованных средах, что позволяет эластично наращивать вычислительные ресурсы под количество пользователей и интенсивность эксплуатации.

Важная характеристика DeltaSim — ее кроссплатформенность. Основные компоненты системы работают как под ОС Linux, так и под Windows. Эмуляции некоторых PCY и расчетные движки динамики моделей, пока зависящие от Windows, находятся на стадии миграции на ОС Linux, которая становится базовой платформой для большинства частных и гибридных облаков, отечественных виртуализационных стеков и сертифицированных операционных систем в рамках курса на импортонезависимую инфраструктуру.

В DeltaSim реализована автоматическая оценка операторских действий и линейка автоматизированных систем обучения, покрывающая функциональность так называемого предтренажерного обучения операторов [18]. Эта методическая база позволяет отойти от традиционной наработки отдельных операторских навыков и приблизиться к управлению компетенциями оперативного персонала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. КАКИЕ ШАНСЫ У РОССИИ?

Как и во всяком критическом переходе, обеспечение безопасности останется приоритетом российской промышленности, особенно в такой системообразующей отрасли, как нефтегазовая. Предприятиям придется прекратить имитацию подготовки персонала на КТ и перейти к серьезным решениям, действительно обеспечивающим качественный тренинг. Можно надеяться, что будет учтен исторический урок рубежа 1980-90-х гг., когда был существенно растерян потенциал отечественных КТ и большая часть рынка без боя была отдана западным производителям (здесь не в счет решения для атомной отрасли, как и тренажеры для других «чувствительных» промышленных объектов).

Западные компании пришли не на пустое место; исторически СССР и Россия были конкурентны в КТ — в стране были квалифицированные кадры разработчиков и эксплуатантов, сложились самобытные школы тренажеростроения. Отставание российских тренажеров от мирового уровня проявилось позже, что и привело к широкому распространению западных решений в 2000-х гг. Причина «проигрыша» состояла в невозможности в плановой экономике позднего СССР организовать разработку, внедрение и сопровождения КТ как бизнес-процесс. Только несколькими профессиональным командам удалось сохраниться на рынке, а многие специалисты были привлечены в российские подразделения западных производителей. Полученный ими опыт приобретает

особую ценность в наши дни, когда западные производители ушли, а экспорт систем из дружеских стран (Китай, Индия) не решит стратегических проблем, но может усугубить отставание.

Несмотря на очевидный кризис у российских разработчиков остается экспертиза высоко уровня, а высшая школа готова выпускать молодые кадры разработчиков. Так, тренажерная команда ЦЦТ на всех этапах (начиная со времен Петрокома) поддерживала большой тренажерный класс на Кафедре технологии переработки нефти в Губкинском университете [58]. Отечественные команды, уцелевшие на рынке или заново вернувшиеся на него после работы в российских представительствах ушедших мировых вендоров, обладают необходимым опытом разработки и потенциалом развития КТ-решений. При должном взаимодействии с заказчиками, даже без прямой поддержки государства, у сообщества разработчиков есть хорошие шансы сохранить и существенно усилить это важнейшее направление промышленной автоматизации. Делать это надо быстро. Самое ближайшее будущее покажет, удастся ли это.

Список литературы

1. IAEA Nuclear Energy Series, No. NG-T-2.7. Managing human performance to improve nuclear facility operation. – International Atomic Energy Agency, Vienna, 2013.
2. Пуликовский К.Б. Приоритет качеству подготовки, профессиональному обучению и аттестации работников организаций, поднадзорных Ростехнадзору // Безопасность труда в промышленности. 2006. №7. С. 2-8.
3. Дозорцев В.М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов. – М., Синтез, 2009. 372 с.
4. Marcano L., Haugen F. A., Sannerud R., Komulainen T. Review of simulator training practices for industrial operators: How can individual simulator training be enabled? // Safety Science. 2019. V.115. Pp. 414-424.
5. Дозорцев В.М. Насколько полезны компьютерные тренажеры для обучения операторов? Голос пользователей // Автоматизация в промышленности. 2016. No 7. С. 7-13.
6. Glaser D.C. The PC Simulator // Chemical Engineering Progress. 1986. Pp. 45-48.
7. Aris R. Introduction to the Analysis of Chemical Reactors. – NJ.: Prentice-Hall, 1965.
8. Himmelblau D. M., Riggs J. B. Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering. 9th Edn. – N.J.: Person, 2012. 896 p.
9. Закгейм А.Ю. Математическое моделирование химико-технологических процессов. – М.: Химия, 1973.
10. Latimer J.R., Masiello R.D. Design of a Dispatcher Training Simulator / Proc. IEEE 1977 Power Industry Computer Applications Conference. Toronto, Canada. 1977. Pp. 87-92.
11. Чачко А.Г. Подготовка операторов энергоблоков: Алгоритмический подход. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
12. Фурганг С.Р. Обучаться? Лучше всего - на компьютере! // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. 1989. №1. С. 123-126.
13. Duncan K.D., Shepherd A. A Simulator and Training Technique for Diagnosing Plant Failures from Control Panels // Ergonomics. 1975. Vol. 18. No. 6. Pp. 627-241.
14. Hollnagel E. Human reliability analysis: Context and control. – London: Academic Press, 1993. 336 p.
15. Чистякова Т.Б. Интеллектуальные автоматизированные тренажерно-обучающие комплексы в системах управления потенциально-опасными химическими производствами // Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. СПб., 1997.
16. Patle D.S. et al. Operator training simulators in the chemical industry: review, issues, and future directions // Reviews in Chemical Engineering. 2014. Vol. 30. No. 2. Pp. 199-216.
17. Gerlach I. et al. (2016). Operator Training Simulator for an Industrial Bioethanol Plant // Processes. 2016. Vol.4. No. 4. P. 34.
18. Дозорцев В.М., Агафонов Д.В., и др. Компьютерный тренинг операторов: непреходящая актуальность, новые возможности, человеческий фактор // Автоматизация в промышленности. 2015. № 7. С. 8-20.
19. Кувыкин В.С. Компьютерные технологии подготовки персонала нефтегазовой отрасли. – М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2002. – 44 с.
20. Назин В.А. Автоматизированные системы обучения персонала технологических установок // Автоматизация в промышленности. 2006. № 6. С. 10-14.
21. Dozortsev V.M. Methods for computer-based operator training as a key element of training systems (Present-day trends) // Automation and Remote Control. 2013. Vol. 74. No. 7. Pp. 1191-1200.
22. Kluge A. et al. Advanced Applications in Process Control and Training Needs of Field and Control Room Operators // IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors. 2014. Vol. 2(3-4). Pp. 121-136.
23. Lee J., Ma B. An Operator Training Simulator to Enable Responses to Chemical Accidents through Mutual Cooperation between the Participants // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, 1382.
24. Новичков А.Ю., Фролов А.И., Погорелов В.П., Дозорцев В.М. Интерфейс полевого оператора в компьютерном тренажере: 3D погружение или 2D панорама? // II междунар. научно-практич. конф. «Человеческий фактор в сложных технических системах и средах». СПб., 2016. С. 268-276.
25. Дозорцев В.М., Максименков В.Н., Власов А.К. Нормативно-описательный метод автоматического оценивания действий операторов технологических процессов // Автоматизация в промышленности, 2024, № 10, С. 21-29.
26. Källström J. Adaptive Agent-Based Simulation for Individualized Training / Proc. International Conference on Autonomous Agents and Multi Agent Systems, 2020. Pp. 2193 – 2195.
27. Samak V. et al. A Scalable and Parallelizable Digital Twin Framework for Sustainable Sim2Real Transition of Multi-Agent RL Systems. 2024. <https://arxiv.org/html/2403.10996v1>
28. Venger A.L., Dozortsev V.M. Trust in Artificial Intelligence: Modeling the Decision Making of Human Operators in Highly Dangerous Situations // Mathematics, 2023. Vol. 11(24), P. 4956.

29. *Denn M.M.* Process Modeling. – N-Y.: Longman, 1986. 324 p.
30. *Haynes J.B. et al.* Toward better and more economical process trainers: GEMS simulation has been successfully linked to Moore's DCS // Pulp and paper Canada. 1990. Vol. 91. No. 5. Pp.45-48.
31. *Kyuwa S. et al.* Operator Training Simulator with real-time transient stability analysis / IEEE Transactions on Power Systems. 1994. Vol. 9 No. 2. Pp. 721-729.
32. *Seborg D. et al.* Process Dynamics and Control. 4 Edn. – NJ: John Wiley & Sons, 2016. 515 p.
33. *Lynch C.A.* A dispatcher training simulator / IEE Colloquium on Power System Simulation. – L., 1989. Pp. 1-4.
34. *Podmore R. et al.* An Advanced Dispatcher Training Simulator // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1982. No. 1. Pp. 17-25.
35. Training Plant Operators // Chemical Week. 1983. Vol. 133. No. 12. Pp.50-53.
36. *Элстон Х., Поттер Д.* Применение тренажеров для обучения операторов технологических установок НПЗ // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. 1989. № 12. С. 112-115.
37. *Fairchild B.T., Clymer A.B.* Simulator Justification / Proc. Eastern Region Mini Conference, Society for Computer Simulation Int. NJ: Princeton, 1989. Pp.1-32.
38. *Hassan M. et al.* Virtual reality-based bioreactor digital twin for operator training // Digital Chemical Engineering. 2024. Vol. 11. 100147.
39. *Labisch D. et al.* Evolution eines Digital Twin am Beispiel einer Ethylen-Anlage - Konzept und Umsetzung // Atp magazine. 2019. Vol. 06-07. Pp. 70-85.
40. *Schueler M. and Mehling T.* Digital Twin – A System for Testing and Training // Computer Aided Chemical Engineering. 2023. Vol. 52. Pp. 2049-2055.
41. *Магид С. И.* Теория и практика тренажеростроения для тепловых электрических станций. – М.: Издательство МЭИ, 1998. 156 с.
42. *Захарова Г.Б. и др.* Компьютерный тренажер для управления доменной печью на основе экспертной системы // Известия ЮФУ. Технические науки. 2002. №3. С. 166-171.
43. *Колтацников С.А.* Обобщенная структура компьютерного тренажера оператора технологического процесса // Вестник СГТУ. Серия: Технические науки. 2010. №7. С. 221-224.
44. *Дозорцев В.М., Назин В.А., Баулин Е.С.* О проблеме управления компетенциями операторов ТП в свете внедрения системы профессиональных стандартов // Автоматизация в промышленности. 2019. № 10. С. 48-55.
45. *Bessiris Y. et al.* Long-Distance Operator Training // Computer Aided Chemical Engineering, 2011. Vol. 29. Pp. 1115-1119.
46. *Beloglazov et al.* The concept of digital twins for tech operator training simulator design for mining and processing industry // Electronic Markets. 2020. No. 2. Pp. 50–54.
47. *Kashevnik A. et al.* Intelligent Human Operator Mental Fatigue Assessment Method Based on Gaze Movement Monitoring // Sensors. 2024. Vol.24. No. 21. P. 6805.
48. *Marcano L.* A methodology for building a data-enclosing tunnel for automated online-feedback in simulator Training // Computers and Chemical Engineering. 2020. Vol. 132. P. 106621.
49. *Summerville A. et al.* Procedural Content Generation via Machine Learning (PCGML). 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1702.00539>
50. *Liaskos S. et al.* Designing and generating reinforcement learning training simulators using goal models // Data and Knowledge Engineering. 2026. P. 102603.
51. *Narvekar S. et al.* Curriculum Learning for Reinforcement Learning Domains: A Framework and Survey. 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.04960>
52. *Hunicke R.* The Case for Dynamic Difficulty Adjustment in games / ACE '05: Proceedings of the 2005 ACM SIGCHI International Conference on Advances in computer entertainment technology. – N.-Y., 2005. Pp.429 – 433.
53. *Kluge et al.* Designing training for process control simulators: a review of empirical findings and current practices // Theoretical Issues in Ergonomics Science. 2009. Vol. 10(6). Pp. 489–509.
54. *He et al.* From Digital Human Modeling to Human Digital Twin: Framework and Perspectives in Human Factors // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2024. Vol. 437 (9).
55. *Verniani A. et al.* Features of adaptive training algorithms for improved complex skill acquisition // Frontiers in Virtual Reality, 2024. Vol. 5. P. 1322656.
56. *Аносов А.А., Бородин П.Е. и др.* Высокотехнологичные решения корпорации Honeywell на базе платформы Experion PKS // Автоматизация в промышленности. 2011. № 8. С. 29-37.
57. *Погорелов В.П., Фролов А.И. и др.* Российская тренажерная платформа DeltaSim: характеристики, преимущества, история создания // Автоматизация в промышленности. 2022. № 9. С. 10-16.
58. *Попадько В.Е., Чернышева Е.А. и др.* Высокотехнологичные программные продукты ЗАО «Хоневелл» – основа качественной подготовки специалистов в РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина // Автоматизация в промышленности. 2015. № 7. С. 59-62.

Дозорцев Виктор Михайлович – д-р техн. наук, директор по развитию бизнеса,

Погорелов Валерий Петрович – ИТ-архитектор,

Агафонов Дмитрий Витальевич – генеральный директор,

Аносов Андрей Александрович – канд. техн. наук, директор по разработке программного обеспечения,

Сластенов Игорь Владимирович - руководитель разработки программного обеспечения (ВТМ),

Фролов Алексей Иванович - руководитель разработки программного обеспечения (АСУТП)

ООО «Центр цифровых технологий» (группа Рубитех).