

ОТ НЕКЛАССИЧЕСКОЙ К ПОСТНЕКЛАССИЧЕСКОЙ НАУКЕ: ПРИМЕР КОМПЬЮТЕРНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ ОПЕРАТОРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В.М. Дозорцев

Аннотация. Дан обзор проблематики построения и применения компьютерных тренажеров для обучения операторов технологических процессов в рамках периодизации научной рациональности от классической и неклассической к постнеклассической. Представлены ключевые постнеклассические характеристики современных тренажеров — саморазвитие, междисциплинарность, антропоцентрический фактор, ориентация на практику. Особое внимание уделено технике имитационного моделирования как принципиально новому способу определения отклика сложной технической системы на произвольные вмешательства пользователей, а также иммерсивным инструментам воспроизведения рабочей среды обучаемого оператора. Исследована постнеклассическая роль инструктора, сочетающая функции организатора тренинга, агента развития, инициирующего перенастройку компонентов тренажера и совершенствование методик обучения, а также ключевого звена капитализации знаний лучших профессионалов. Показаны принципиальные изменения в организации и реализации тренажерного проекта, охватывающего теперь не только стадии исследования и разработки, но и сопровождение, и развитие тренажерных систем. Рассмотрены перенос приобретаемых в тренинге навыков и современные подходы к автоматизированной оценке работы операторов на тренажере. Проанализированы базовые тенденции в тренажеростроении: изменение мотивов тренинга (превалирование профессионального роста и самореализации работников), поколенческий сдвиг на фоне революционного обновления средств труда (виртуальная и смешанная реальности, советчики на базе искусственного интеллекта), развитие и оценка профессиональных компетенций работников. С учетом высокой синтетичности тренажерных технологий изложение опирается на широкий понятийный контекст, включая научно-технические, когнитивно-психологические, педагогические, социально-экономические и литературные феномены.

Ключевые слова: классическая, неклассическая и постнеклассическая научная рациональность, технологические процессы, компьютерные тренажеры для обучения операторов, саморазвивающиеся системы, человекоразмерность сложных технических систем, междисциплинарный подход.

ВВЕДЕНИЕ

Представления о наступившей «постнеклассической» фазе научной рациональности, поначалу относимые преимущественно к гуманитарным наукам [1], все явственнее распространяются на науки технические, в том числе на науку управления [2]. В то же время некоторые базовые разделы этой науки, в том числе, управление производством, пока в указанном контексте не рассматривались.

Необходимость такого анализа более чем назрела, имея в виду поистине революционные изменения, переживаемые современным производством.

Даже не вдаваясь в специальный методологический анализ, легко обнаружить очевидные сдвиги в нормах и инструментах достижения научной истинности, используемых теорией и практикой управления производством. Действительно, предметом исследования *классической* теории регулирования/управления являлся объект (техническая система), свойства которого полностью определя-

лись характеристиками составляющих его элементов, одинаковыми как внутри, так и вне системы. Поведение объекта объяснялось детерминистически, а случайные процессы относились к действию скрытых детерминант (помех). За скобки выносилось все связанное с самим исследователем и средствами его деятельности.

Кибернетика как наука об общих закономерностях процессов управления в технических системах, живых организмах и обществе ознаменовала переход к *неклассической* фазе [3], когда в поле исследования попали сложные системы, не сводящиеся к сумме своих элементов. На уровне подсистем в таких системах работают механизмы саморегулирования, а целостность системы сохраняется благодаря небольшому числу параметров высокого уровня. Производственные технические системы стали рассматриваться во всей своей полноте, включая технологическую, экономическую и организационную составляющие. Для управления подобными объектами понадобились методы, подстраивающиеся под меняющиеся свойства объекта и внешней среды, от базовых адаптивных систем до методов информационного управления, управления активными системами, рефлексивного управления [3]. Принципиально, что на этой стадии наука управления начала опираться на появившуюся и вскоре невероятно окрепшую вычислительную технику, позволившую автоматизировать проверку расчетов и исследовать поведение объекта с помощью численных моделей (системы управления производством подверглись компьютеризации сразу же вслед за оборонными и космическими, и, естественно, в куда более широком масштабе). Было признано также, что между исследователем и исследуемым явлением имеется посредник — человеческая деятельность. В применении к управлению производством это означает, что установки и профессиональные приемы разработчиков стали непосредственно определять состав и функциональность систем управления (переход от наблюдаемых систем к наблюдающим системам).

Наконец, *постнеклассическая* фаза, оформившаяся на рубеже нового тысячелетия, имеет дело со сложными саморазвивающимися системами, включающими в себя, помимо собственно технико-технологического базиса, человека (разработчика/интегратора/конечного пользователя), экологическую и даже культурную среду, которая должна принять новую технологию. В последние годы к таким системам относят, в частности, сложные компьютерные сети, все глубже проникающие в практику управления производством. Как никогда становится важна человекоразмерность, особенно в человеко-машинных комплексах, где грань между естественным и искусственным все больше стирается. Для современной научной рациональности

характерны междисциплинарность и проблемно-ориентированный подход, в котором объединяются теория и эксперимент, фундаментальные и прикладные составляющие исследования. Объекты современного производства открыты и саморазвиваются, что предполагает постоянное обучение средств управления из-за неостанавливающегося накопления опыта и знаний лучших практик управления схожими объектами. Также важна прямая соотнесенность современного научного знания с социокультурными ценностями и нормами, гуманистическими ценностями, этическими обязательствами и запретами, порожденными вызовами современных технологий.

Яркий пример перехода к постнеклассической парадигме — компьютерные тренажеры (КТ) для обучения операторов технологических процессов (ТП), вместившие в себя широкий спектр научных и технических компонентов, бытующие в напрямую несвязанной с «физикой» виртуальной среде и находящиеся в фокусе проявлений человеческого фактора современного производства.

В работе дан детальный обзор проблематики построения и применения КТ в свете постнеклассической научной рациональности. Анализируются новые характеристики тренажерных компонентов — широкая междисциплинарность, антропоцентрический фактор, ориентация на практику. Изложение опирается на широкий понятийный контекст, включая не только научно-технические, но и когнитивно-психологические, педагогические, социально-экономические феномены и даже художественные тексты.

Подчеркнем, что настоящая работа не является исследованием собственно КТ и на примере прорывной тренажерной технологии сосредоточена на анализе изменений, проявляющихся в науке управления на ее постнеклассическом этапе. Читатель, интересующийся проблематикой современного тренажеростроения, отсылается к ключевым работам [4–9].

1. ЧТО ТАКОЕ ТРЕНАЖЕР

1.1. Немного истории

Компьютерные тренажеры — порождение уже неклассической эпохи; их доцифровые прототипы, хоть и интересны с исторической точки зрения, не могли достичь необходимого качества тренинга без неклассических технологий, прежде всего таких, как развитые системы имитационного моделирования ТП и средства визуализации операторской рабочей среды.

«Гражданский» тренажерный проект (как в свое время атомный и космический) имеет «военную» подоплеку, только в случае КТ для операторов ТП эта война протекает на поле промышленной



Рис. 1. Натурный тренажер для обучения кавалеристов, содержащий базовые компоненты тренажерной системы

безопасности. По имеющимся оценкам [4], только в переработке углеводородов среднегодовые потери (согласно сорокалетней статистике [10]) от некачественного операторского управления с учетом аварий, потерь качества, упущенной выгоды из-за приостановки производства, составляют около 7—8 млрд. долл. (в современных ценах¹). Удерживается этот фронт ежегодным внедрением промышленных тренажерных систем примерно на 0,6 млрд. долл.². Среди основных причин столь колоссальных потерь — все усложняющиеся задачи, с которыми сталкиваются операторы, упущения в системе их профессиональной подготовки, ухудшающаяся демографическая ситуация (можно даже говорить об определенном поколенческом сдвиге, когда падает престиж операторской профессии и снижается качество приходящих в отрасль специалистов). К сожалению, качественного улучшения статистики потерь от несоответствующего операторского управления не наблюдается, несмотря на серьезные усилия всего промышленного сообщества. Более того, мы видим проявление «иронии автоматизации» [11], когда усложнение ТП и средств управления, призванных защитить производство, приводит только к дальнейшему повышению рисков. Вырваться из этой спирали можно, лишь радикально повысив уровень подготовки операторов, что и определяет все возрастающий интерес к

¹ Самая крупная в истории авария в нефтепереработке произошла 30 лет назад на НПЗ в Пасадене (Техас). В ней погибли 23 и ранены 314 чел. Общие потери от аварии составили 1,6 млрд. долл. по ценам 1989 г. (сейчас это было бы минимум вдвое больше). Причина — ошибка оператора при переключении технологических линий на установке получения полиэтилена.

² Легко подсчитать, что тренажеры окупаются, если снижать аварийные потери всего на 8 %.

ним как к ключевому элементу обеспечения безопасности и эффективности производства.

В любом самом простом тренажере присутствуют три обязательных элемента: модель объекта (его заместитель), информационная модель (модель среды управления), посредством которой обучаемый взаимодействует с моделью объекта, и модель обучения, определяющая содержание тренинга. Тренажер — средство обучения, в нем всегда есть обучаемый (или несколько обучаемых) и тренер (инструктор). На рис. 1 показан натурный тренажер для кавалериста, возможно, еще позапрошлого века. Механическая лошадь — модель объекта; седло и уздечка — модель среды управления; почти скатившийся с лошади — будущий наездник; скромно выглядывающий на заднем плане и его коллега на переднем — инструкторы, реализующие модель обучения. Угадывается и третий инструктор за кадром; в нужный момент он дергает «лошадь» за задние ноги.

По-видимому, раньше других серьезные тренажерные системы появились в авиации, что не удивительно, принимая в расчет недоступность тренировок в полете и риски, связанные с недостатком операторских навыков. Эволюция авиационных тренажеров прослеживается на рис. 2 от установ-

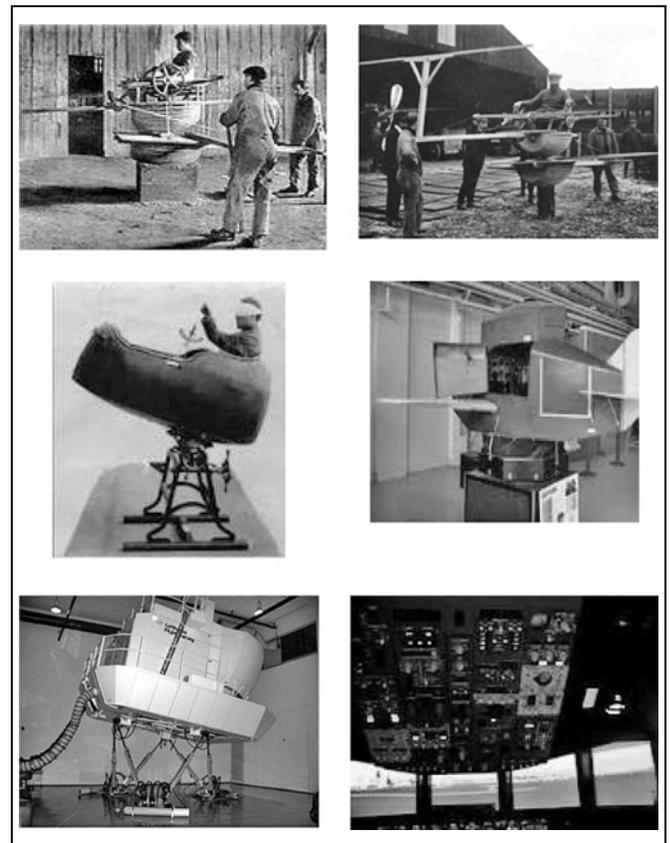


Рис. 2. Эволюция авиационных тренажеров

ленной на резиновой шине гондолы до полномасштабной реплики кокпита, изменяющего ориентацию в пространстве, с точным воспроизведением приборной доски и обстановки вне кабины.

Операторы сложных ТП работают в особенных условиях: их объект управления сосредоточен вдалеке от защищенных операторных, т. е., в отличие от пилотов они не ощущают непосредственной угрозы. Тем сложнее задача тренинга операторов ТП с мотивационной точки зрения. На рис. 3 дана принципиальная схема КТ для обучения операторов

в неклассическом варианте. В контуре реального *производства* оператор управляет технологической установкой посредством системы управления (СУ). В *тренажерном* контуре этим элементам соответствуют модель ТП и интерфейс оператора. Принципиальный компонент КТ — станция инструктора, снабженная функциями ведения тренинга. В контуре *разработки* показаны необходимые экспертизы разработчика, а в контуре *внешнего окружения* — факторы, определяющие назначение и функциональность тренажерной системы. По ходу

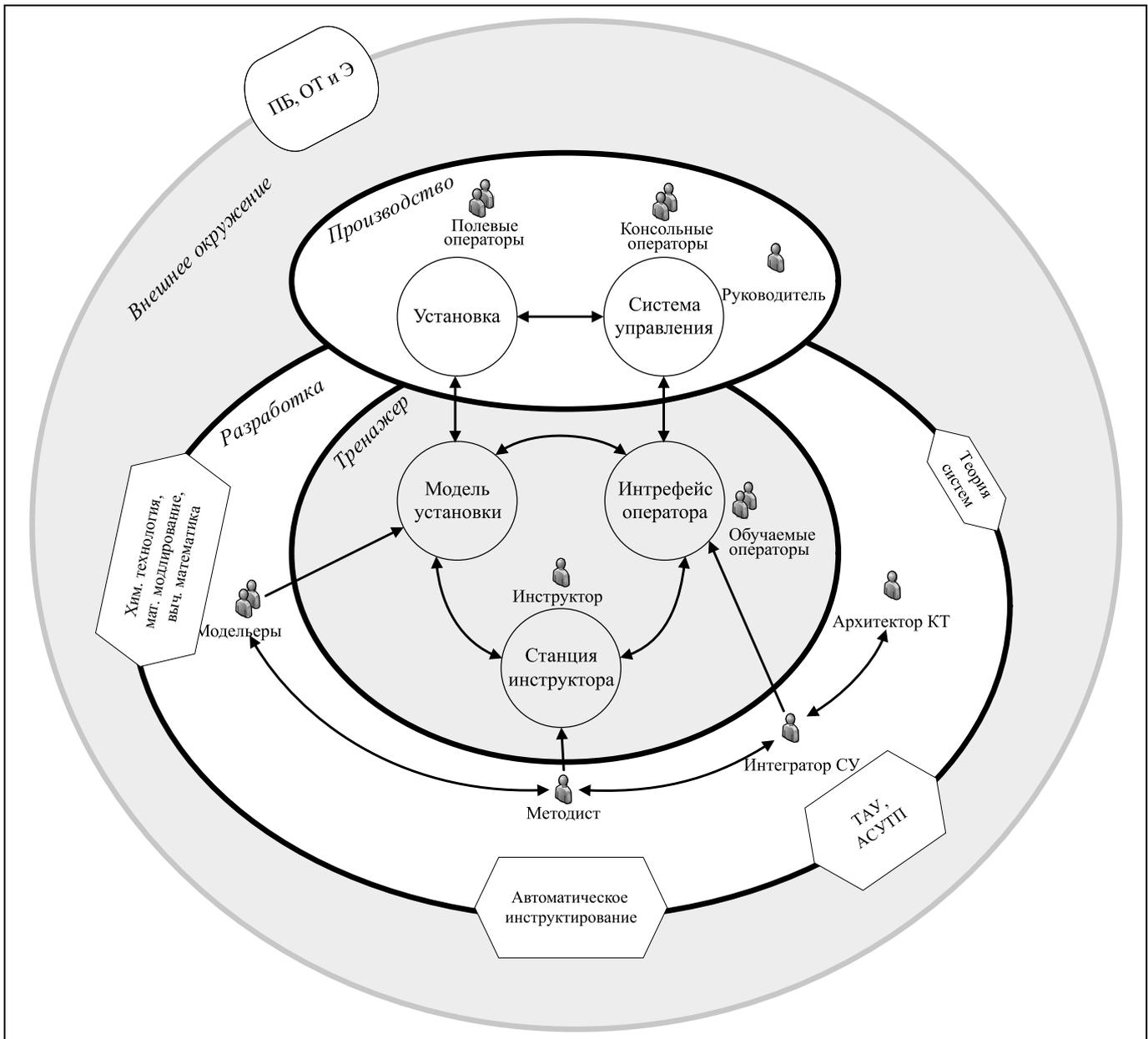


Рис. 3. Принципиальная схема неклассического компьютерного тренажера: ПБ, ОТ и ОС — промышленная безопасность, охрана труда и окружающей среды; СУ — система управления; ТАУ — теория автоматического управления; АСУТП — автоматизированные системы управления ТП



изложения читатель будет отсылаться к рис. 4 для иллюстрации перехода от неклассической к постнеклассической парадигме (рис. 3 содержится в рис. 4; добавления выделены **полужирным**). Постнеклассика проявляется в первую очередь в дополнительных функциях разработки и сопровождения тренажеров, в необходимых для этого экспертизах и в широком наборе факторов внешнего окружения.

1.2. Целое больше суммы частей

Все компоненты тренажера — технические: имитационные модели процесса, интерфейсы оператора, средства автоматизированного инструктирования. Давно пройденная ловушка классической науки: потребуем высокого качества исполнения отдельных элементов и получим отменное качество тренажера в целом. Бесспорно, это необходимо требовать. Вернемся к винтажному трена-

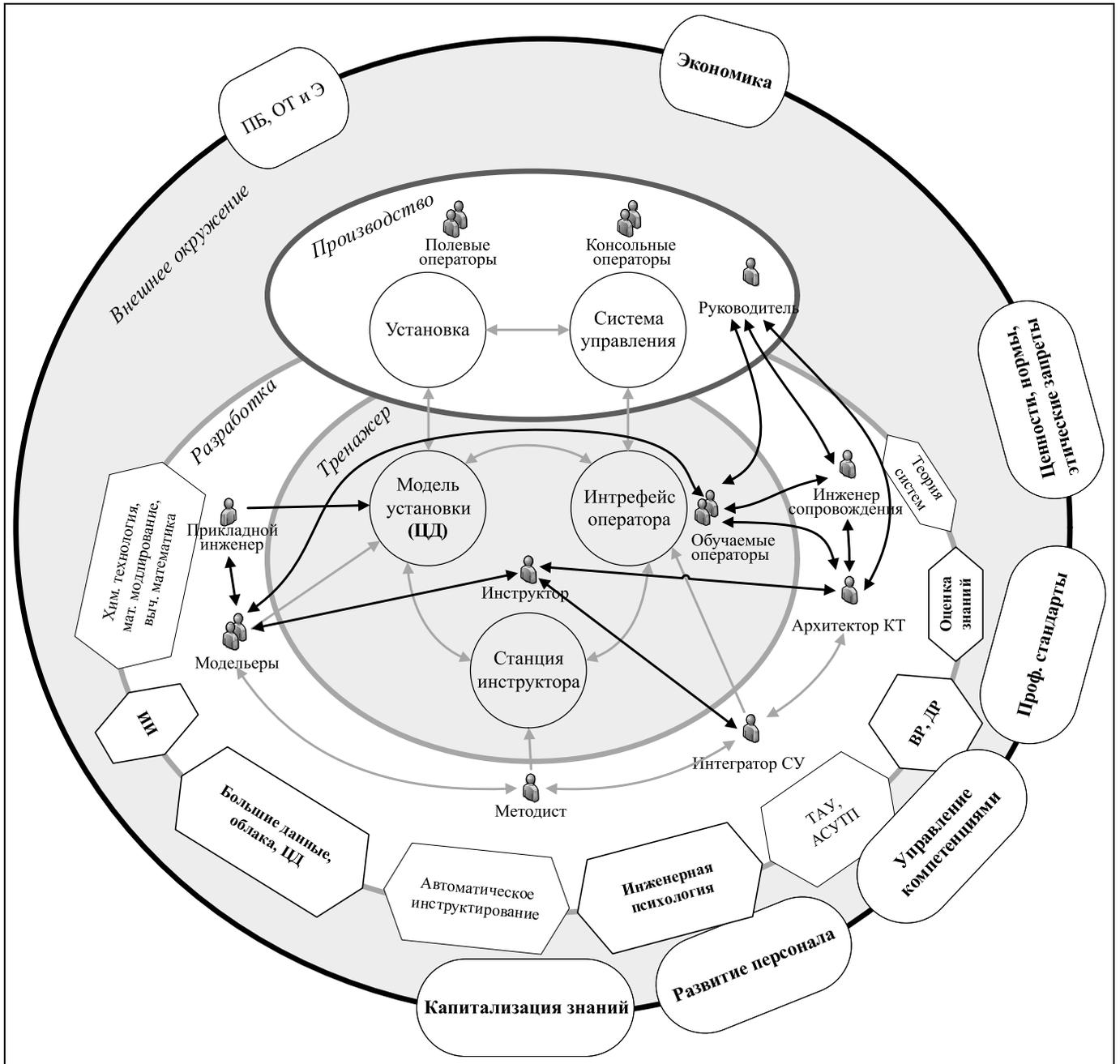


Рис. 4. Принципиальная схема постнеклассического компьютерного тренажера: ЦД — цифровой двойник; ИИ — искусственный интеллект; VR и DR — виртуальная и дополненная реальности; дополнительные постнеклассические связи, экспертизы и факторы внешнего окружения набраны полужирным

жеру для кавалериста (см. рис. 1). Если шаг, рысь, аллюр смоделированы неверно, навык может получиться ложным; а что может быть хуже, если автоматизированное действие ложно (ведь, навык и есть именно автоматизированное действие)? Лучше уж ничего не автоматизировать. Если седло неправильной формы, поводья ошибочной длины, натяжение неверно, как потом оператор сможет управлять живой лошадью? Наконец, если инструктор не сможет поставить «модель» на дыбы, как наездник научится справляться с такой неожиданностью в реальной практике?

Но всего этого недостаточно; иными словами, если составить тренажер из перечисленных компонентов, исполненных идеально, но без учета самой задачи обучения, тренажер не превратится в столь же высококачественный. Цель тренинга — выработка навыка, а он станет истинным и его перенос в реальную практику положительным, только если будет соблюден принцип подобия деятельности оператора в тренинге и в реальной работе. Причем это подобие не только (и даже не столько) физическое, сколько психологическое. Оператор должен ощущать себя так же, как на рабочем месте. Последнее достигается, прежде всего, информационным подобием: информация в тренинге должна поступать, обрабатываться и претворяться в управленческие решения подобно соответствующим процессам в реальной работе — по объему, типу, составу, последовательности, динамике и пр. [4, гл. 2]. Элементы тренажера, объединяясь в систему, приобретают целостность, влияя друг на друга и создавая нетехническое качество объединенных в целое технических частей.

1.3. Антропоцентрический подход в тренажеростроении

Тренажеры — образцовый пример антропоцентрической технологии. Они предназначены для обучения людей-операторов под руководством людей-инструкторов. Критерием их совершенства служит психолого-педагогический принцип подобия, не сводимый к сумме критериев качества отдельных элементов. Достижение критерия (исключая сугубо технические моменты) оценивается людьми-экспертами. Наконец, пользователем готового изделия выступает особый человеческий коллектив, отражающий, но не копирующий производственную иерархию: это, скорее, передача уникальных навыков и знаний (в совокупности — умений) от более опытных работников к менее опытным и даже новичкам.

Отмеченная «неизоморфность» отношений в парах «начальник — подчиненный» и «инструктор — обучаемый» создает известное социально-психо-

логичное напряжение в тренинге. Недочет этого фактора, как и других психологических феноменов компьютерного тренинга, может существенно повредить разработке. Добавим к этому и еще одну черту постнеклассики в тренажеростроении: разработчики-исследователи, к которым из-за стирания границ между разработкой, инжинирингом и поддержкой присоединяются инженеры-прикладники и инженеры сопровождения, не могут, как прежде, оставаться вне исследуемого предмета. На всех этапах разработки и внедрения они вступают в плотный контакт с экспертами и будущими пользователями; подчас этот контакт, оставаясь выраженным на обыденном «технологическом» языке, затрагивает самые основы научно-технического содержания работы (см. рис. 4).

2. ПОСТНЕКЛАССИЧЕСКИЙ ВЗГЛЯД НА МОДЕЛИРОВАНИЕ

2.1. Как менялось представление о точности модели

Классика настаивала, что точность модели — феномен объективный; она проверяется в строгом эксперименте; если объект изменяется, модель нужно перестроить. Неклассика предположила, что модель может быть изменена непосредственно в контуре управления. Появилась идея адаптации, означавшая, что точность имеет смысл здесь и сейчас. При этом, согласно принципу дуального управления А.А. Фельдбаума [12], нельзя качественно управлять, не имея хорошей модели объекта, а идентифицировать объект нельзя, не испортив управление. Другими словами, нельзя обучить модель, наблюдая за жестко управляемым объектом, нужно «испортить» управление, поставить объект в сложные, не полностью управляемые условия; только тогда изучение станет эффективным³.

С приходом постнеклассики оказалось, что в КТ точности модели как таковой нет; она определяется только в самом процессе построения и применения тренажера, причем, скорее, не разработчиком, а пользователем. Сначала это происходит на стадии разработки, затем повторяется день за днем в тренинге. Только пока инструктор и оператор верят, что модель точна (точнее, адекватна — о чем далее), полноценный тренинг возможен.

³ Как не вспомнить здесь: *Если друг оказался вдруг / И не друг, и не враг, а так, / Если сразу не разберешь, / Плох он или хорош, — / Парня в горы тьяни, рискни, / Не бросай одного его, / Пусть он в связке в одной с тобой — / Там поймешь, кто такой.* (В.С. Высоцкий, 1967.)



Идея, что точность модели зависит от решаемой задачи, не нова⁴. Крайне остро проблема обрисовалась именно в постнеклассический период. Обратимся к интуитивному кладезю догадок на этот счет — роману Станислава Лема «Солярис».

Планета Солярис, открытая за 130 лет до описываемых в романе событий, непригодна для жизни человека. Всю ее площадь покрывает обладающий высокоразвитым разумом Океан, на поверхности которого обнаруживаются замысловатые структуры, построенные на основе сложнейшего математического аппарата⁵. Для установления контакта на Солярисе строится научно-исследовательская станция. Прибывший на Солярис психолог Крис Кельвин застаёт хаос и запустение, один из обитателей станции наложил на себя руки, двое других — на грани помешательства. Выясняется, что на станции появляются «гости», фантомы, точные (исходя из памяти членов экипажа) копии ранее знакомых им людей, с которыми связаны травмирующие и вызывающие стыд воспоминания или фантазии. Кельвину Океан посылает его юную возлюбленную Хари, десятью годами ранее покончившую с собой после размолвки с ним...

Рассмотрим эпизод с платьем (гл. «Хари»). Ошарашенный первым приходом девушки, Крис решает избавиться от нее, отправив ракетой в никуда. Для этого ей надо снять платье и переодеться в комбинезон.

Но тут выяснилась удивительная вещь. Платье нельзя было снять, у него не было никакой застежки, ни молнии, ни крючков, ничего. Красные пуговицы посередине были только украшением. Хари смущенно улыбнулась. Сделав вид, что это самая обычная вещь на свете, я поднятым с пола похожим на скальпель инструментом разрезал платье на спине, в том месте, где кончалось декольте. Теперь она могла снять платье через голову... (С. Лем. Солярис. 1960.)

Харри соткана из воспоминаний Криса; он запомнил само платье, но не удержал в памяти функциональных деталей. Когда появляется «следующая» Хари, он начинает воспринимать пришлицу как реальную девушку, хотя и понимает, что «настоящей» Хари нет, и перед ним созданный Океаном фантом. Его мучает необъяснимая вина («здесь, скорее, что-то с совестью», как говорит один из обитателей станции).

⁴ Так, геоцентрическая система Птолемея была в корне неверна, но благодаря введению эпицикла (малого круга, по которому движутся Солнце и планеты, тогда как центр эпицикла, в свою очередь, перемещается вокруг Земли) она оказалась достаточно точной. Более того, когда Коперник представил правильную гелиоцентрическую систему, ему также пришлось прибегнуть к эпициклам, причем точность его системы даже уступала птолемеевой. Только через 100 лет Кеплер предложил эллиптические, а еще через 100 лет Ньютон обосновал гиперболические траектории движения, что сделало расчеты прозрачными и точными.

⁵ Это <была> скорее охватывающая несколько кубических миль модель целой математической системы <...>. Самой простой была, естественно, мысль, что перед нами какая-то «математическая машина» живого океана, созданная в соответствующих масштабах модель расчетов, необходимых ему для неизвестных нам целей. (С. Лем. Солярис. 1960.)

Отметим аналогию предложенной Лемом сюжетной конструкции с проблемой тренажера. В современных системах поведенческое сходство тренажерной и реальной рабочей среды крайне высоко; например, по законодательству некоторых стран, тренажер не разрешается располагать непосредственно в операторной, чтобы оператор не перепутал и не принялся экспериментировать на реальной установке, как на тренажере. И все же участники тренинга всегда осознают, что работают со смоделированным объектом⁶. В терминах «Соляриса» они видят бесполезные пуговицы на платье, но это не мешает им поверить в адекватность модели, глубоко погрузиться в тренинг и добыть требуемый результат — прочные навыки управления процессом. И уж совсем неважно пользователю, как сделана модель; это проблема ее создателя. Точно так же, как Крису неважно, что Хари состоит из нейтрино.

2.1. Имитационное моделирование — на стыке неклассики и постнеклассики

Частая история: синтетическому и относительно молодому русскому языку не хватает научных слов. То, что старый и аналитический английский называет *simulation*, мы обозначаем как *имитационное моделирование* (ИМ). Теперь, когда так уже устоялось, признаем, что название не слишком удачное. В английском различают *modelling* как построение модели и *simulation* как ее воспроизведение (имитацию). Да и в первом слове — *имитационное* — есть двоякость: по-русски, имитация — это и воспроизведение чего-либо (*simulation*), и притворство (*pretense*).

В Интернете, который давно уже стал ценным источником данных для анализа терминологических предпочтений, по состоянию на середину 2019 г. на *моделирование* имеется более 37 млн. ссылок, из них 2 млн. на математическое, 1,2 млн. на компьютерное и 480 тыс. — на имитационное (13 % от общего числа). В англоязычном сегменте — 460 млн. ссылок на *modelling* и 340 млн. на *simulation*. Причем, *simulation modelling* употребляется в сотни раз меньше (только 920 тыс. ссылок или 0,2 %). Часто (в каждом шестом случае) это обозначает журнал «Simulation Modelling Practice and Theory», что, по сути, является сокращением от *simulation and modelling*. Последнее сочетание как раз встречается очень часто (110 млн. ссылок).

⁶ По современным теоретическим представлениям [13], уникальная особенность тренажеров как раз и заключается в феномене «пересечения границы» (англ.: *border crossing*) между компьютерным тренингом и рабочей практикой. Именно при таком пересечении формируется положительный перенос приобретаемого навыка.

Соответственно, обратный перевод «имитационного моделирования» на английский, как правило, дает просто *simulation*.

Сейчас все привыкли к термину ИМ, хотя и научный контекст *имитационного*, скорее, негативный. Поначалу основные применения ИМ были в задачах теории массового обслуживания, где моделируемый процесс описывался случайной величиной с некоторым распределением вероятностей (так, распределение по Пуассону любили применять для описания условно «массовых» процессов типа времени обслуживания заявок в очереди). Такой подход, с точки зрения классических управленцев, маскировал отсутствие модели вообще.

Если *моделирование* — построение модели, то ИМ — способ ее применения, в котором модель *проигрывается*, а результат проигрывания нужен тем, кто по каким-то причинам интересуется выходом модели. Интересоваться могут, например, аналитики, которым иначе никак не оценить поведение объекта. Ближе к нашему изложению — интересуются выходами ИМ, конечно, участники тренинга, которые получают возможность свободно манипулировать ТП и в режиме реального времени непосредственно наблюдать последствия такого манипулирования.

В понимании классической науки, ИМ — не аналитический инструмент, как это принято в методах регулирования по возмущению или в базовой теории оптимального управления. Там, модель — часто всего лишь контейнер параметров, подставляющихся в аналитические выражения для управляющего воздействия. Вообще, способ исследования реальности через ее воспроизведение (имитацию) — признак неклассической эпохи.

Как строится имитационная модель? В тренажерах аналитический *modelling* не работает: классическое описание термодинамического равновесия справедливо для изолированных систем, которые не обмениваются с окружающей средой ни веществом, ни энергией. Эта теория уже неверна для закрытых систем, обменивающихся с внешней средой только энергией. А в случае тренажерных имитационных моделей мы имеем дело с открытыми системами, что роднит их с живыми организмами, пропускающими через себя материальные и энергетические потоки, необходимые для поддержания жизнедеятельности и достижения поставленных целей [14]. Такие объекты существуют в режиме гомеостаза, т. е. саморегуляции, позволяющей открытой системе поддерживать неполное (частичное, подвижное или динамическое) равновесие, и живут только благодаря жесткому регулированию на базовом уровне, в то время как остальные параметры «отпускаются» (в живом организме жестко регулируются биохимия, температура тела, кровяное давление и пр.). Моделирование ди-

намических равновесий и движения к ним при возникновении сильных возмущений — особое искусство, конечно, опирающееся на имеющиеся теоретические достижения, но, по-прежнему, требующее опыта и креатива [15].

Особая трудность состоит в идентификации параметров моделей. Классическая идентификация в этом случае также не работает. Число восстанавливаемых параметров колоссально, такую задачу традиционными методами решить невозможно. Непонятно к тому же, поведение какого реального объекта мы восстанавливаем? Чему должна быть адекватна модель? Однажды наблюдаемой реальности, как в классических постановках? Но там речь идет о небольшом числе выходных переменных, к тому же строго регулируемых. В имитационных тренажерных моделях выходных переменных многие сотни. Для большинства из них поведение реального объекта, казалось бы, в одинаковых условиях, существенно различается в силу действия многочисленных ненаблюдаемых возмущений (погода, ветер, влажность, флуктуации состава сырья, топлива, состояние оборудования и пр.). В этих условиях подстройка параметров моделей к неповторяющимся наблюдениям становится бессмысленной.

В постнеклассической постановке метод идентификации параметров тренажерной модели диктуется пониманием адекватности модели, оцениваемой экспертами и операторами. А с их позиций в процессе имеется относительно небольшой набор *критических* режимных параметров, регулируемых автоматически и воспроизводимых с большой точностью (температуры, давления, уровни, составы). Имеются также *некритические* режимные параметры, точность воспроизведения которых значительно ниже, т. е. допустимый диапазон их изменений значительно шире. Остальные параметры рассматриваются как сугубо *инструментальные*, т. е. требования к их поведению либо очень мягкие, либо их нет вообще. Именно инструментальные переменные канализируют в себе отклики на упомянутые ненаблюдаемые возмущения.

Что же служит источником информации при настройке тренажерной модели? Помимо проектной и регламентной документации, исторических данных, данных лаборатории (которые, скорее, нужны для определения параметров статических режимов), основная информация поступает в качестве экспертного мнения профессионалов-пользователей: технологов, опытных операторов, инженеров по автоматизации (см. рис. 4). Формализация такой информации решающе важна как для определения параметров модели, так и для подтверждения адекватности модели на этапе сдачи и внедрения тренажера [16].



2.2. Тренажеры и цифровые двойники

Цифровые двойники (ЦД) в последние годы стали настоящим мемом [17]; с ними связывают большие (подчас преувеличенные) ожидания, но единого представления об их устройстве и назначении все еще не выработано. Главное, что часто упускается в описании ЦД: если есть двойник, должен быть и оригинал. Цифровой двойник — не просто модель, пусть даже точная (хотя мы видели ранее, что точность модели в постнеклассическую эпоху — понятие нетривиальное). Цифровой двойник — модель в «горячем» состоянии, т. е. максимально подобная реальному объекту благодаря постоянно получаемой и накапливаемой информации о его функционировании. Когда и если такой уровень подобия достигается, отклонения выходов модели от измеряемых параметров объекта становятся богатым источником информации для повышения эффективности управления.

Идея применять тренажерную модель в качестве ЦД кажется очевидной, поскольку ее назначение именно имитировать работу реального процесса. Это позволило бы решать многие сопутствующие тренингу задачи: инжиниринг ТП, инжиниринг систем управления, поиск причин неисправностей, предиктивная аналитика состояния оборудования (см. рис. 4).

Однако реализация идеи ограничивается возможностью синхронизации работы модели с текущим динамическим состоянием ТП. Сложность поведения процесса, огромное число восстанавливаемых переменных, значительное число удаленных полевых устройств, состояние которых не измеряется автоматически, делают задачу неразрешимой в масштабе всего ТП. В то же время там, где важно принципиальное поведение объекта (настройка режимов процесса, проверка возможности динамических переходов с режима на режим, расшивка «узких» мест, настройка системы базового регулирования, отладка системы блокировок и противоаварийной защиты, проверка стратегий управления) тренажерные модели, настроенные на различные проверяемые режимы, оказываются эффективными ЦД [18]. В последнее время имеются также удачные попытки применить фундаментальные имитационные модели отдельных узлов и аппаратов для предиктивного анализа состояния оборудования⁷.

⁷ Вместе с тем значительные усилия разработчиков направлены на применение в прогнозной аналитике методов искусственного интеллекта, в частности, искусственных нейронных сетей [19]. В ситуациях, когда большие и хорошие данные об объекте могут быть собраны, эти методы, действительно, обещают отличные результаты. Построенные на основе больших данных модели отдельных единиц оборудования могут быть органично встроены в тренажер, а с переносом КТ в Облако решается и проблема настройки таких ЦД под текущие характеристики оригинала.

3. НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ИНФОРМАЦИОННУЮ МОДЕЛЬ В ТРЕНАЖЕРЕ

— *Он сделан из цельного куска самого отборного черного мрамора!* — похвастался Хоттабыч.

— *Значит, внутри там ничего нет?* — разочарованно спросил Волька.

— *А разве внутри должно что-нибудь быть?* — забеспокоился Хоттабыч.

— *В таком случае, понятно, почему этот телефон не действует,* — сказал Волька. — *Ты сделал только макет телефона, без всего, что полагается внутри. А внутри аппарата как раз самое главное.*

— *А что там должно быть, внутри?* Объясни, и я тотчас же сделаю все, что необходимо.

— *Этого так просто не объяснишь,* — важно ответил Волька. — *Для этого нужно сначала пройти все электричество.* (Л. Лагин. Старик Хоттабыч. 1938.)

Этот отрывок из бестселлера для пионерского возраста содержит прекрасную метафору требований к информационной модели в тренажере. Важно не физическое сходство и, тем более, не красота исполнения. В тренажере важно функциональное и информационное подобие операторскому интерфейсу на реальном объекте.

Информация, которую использует консольный оператор, почти на 100 % инструментальная. Это показания приборов, временные тренды технологических параметров, сообщения тревожной сигнализации и др. Доля неинструментальной информации при принятии управленческих решений (телефонные и радиосообщения, сторонняя документация, устная коммуникация с коллегами) очень незначительна. На первый взгляд, воспроизведение реального консольного интерфейса в тренажере должно превратиться в рутину, тем более, что все чаще производители систем управления ТП предоставляют программные средства эмуляции своих интерфейсов. Это облегчает как задачу построения операторского интерфейса в тренажере, так и его модификацию при изменении на реальном рабочем месте.

На практике все не так просто: по техническим и стоимостным соображениям всегда остается часть интерфейса, невозпроизводимая автоматически и требующая эмуляции специально разработанными средствами [20]. Рациональное решение о том, каков объем и детальность воспроизведения, должно приниматься на основе когнитивной модели операторской деятельности в компьютерном тренинге [4, гл. 2].

Еще важнее привлечение аппарата когнитивной психологии к проблеме создания интерфейсов *полевого* оператора. Особенности его рабочей среды (большая производственная площадка с огромным объемом технологического и контрольно-

измерительного оборудования и, следовательно, неинструментальной информации) диктуют иные подходы к эмуляции его тренажерного интерфейса (см. дополнительные экспертизы на рис. 4).

Попытки применить для этого 3D-анимацию сопряжены с принципиальными трудностями. Странники такого подхода [21] часто без необходимого обоснования ссылаются на высокую точность, достигаемую средствами виртуальной реальности (VR). В то же время VR, как правило, предназначена для погружения в другой искусственный мир, а вовсе не для воспроизведения «реальной» реальности⁸. Отсюда искажения операторского восприятия в 3D-анимации (пространственного, сенсорного, но, прежде всего, психологического). Кроме того, анимация всегда сопровождается игровой установкой, снижающей ответственность обучаемого оператора, что недопустимо в тренинге столь потенциально опасной деятельности [23].

Разумной альтернативой 3D-анимации представляется интерфейс полевого оператора, построенный в технологии панорамных виртуальных туров [24]. Основанные на фото-панорамировании реальной технологической площадки с элементами дополненной реальности, эти интерфейсы лишены психологических недостатков анимационного решения, снабжены маркерами реальности, исключая игровую акцент в тренинге⁹. Немаловажно, что панорамные интерфейсы значительно дешевле анимационных как в создании, так и в модификации при изменении реальной рабочей среды.

4. ИНСТРУКТОР В ЭПОХУ ПОСТНЕКЛАССИКИ

Тренажеры для обучения операторов появились задолго до распространения компьютеров. Также давно появился инструктор тренинга, роль которого менялась по мере развития тренажерных тех-

⁸ Конечно, есть «индуцированные» VR-интерфейсы, специально направленные на копирование реальной среды. Они могут фильтровать, реконструировать или профессионально акцентировать отображения реальности [22]. Когда и если они войдут в состав систем управления, они будут переноситься и в тренажер, при этом их расхождение с реальностью не станет препятствием в обучении, поскольку будут повторять такое же расхождение в реальной работе оператора.

⁹ На крупном российском НПЗ в тренинге применяются два типа интерфейсов полевого оператора, выполненных в среде 3D-анимации и в технологии виртуального тура. Из персональной коммуникации автора с заводским специалистом по компьютерному тренингу следует, что операторы в прямом смысле «играют» в анимационный интерфейс, сетуя только на невозможность перепрыгнуть через стены при перемещении в заданную точку «поля». Вряд ли это оправданная тренажерная практика.

нологий. В классическую эпоху он был организатором тренировочной сессии (распределение задач, запуск упражнений, вводный инструктаж, «разбор полетов» и пр.). Ключевая роль инструктора была — поставить обучаемого в сложное положение, неожиданно вмешиваясь в ход моделируемого процесса (вновь обратимся к рис. 1).

На неклассическом этапе пришло понимание, что инструктор — часть тренажерного проекта в его развитии. Он — узкое организационное звено тренинга, поскольку именно инструкторы (не операторы) в дефиците. В саморегулирующейся системе он должен поставить обучение; уметь менять приемы тренинга, если они не работают достаточно эффективно; уметь накапливать опыт, обновлять содержание тренинга и пр. [4, гл. 4].

В постнеклассике тренажерная система рассматривается как саморазвивающаяся. Сама возможность саморазвития инструментально заложена разработчиками тренажера, но реализуется она прежде всего через инструктора. Только на технологической площадке становится заметна деградация системы из-за отставания модели процесса и информационной модели от реальной ситуации на объекте, причем поддержка тренажера разработчиками невозможна без участия инструктора. Он же — мотор развития и совершенствования методики обучения (см. новые связи на рис. 4).

При этом и сам инструктор начинает оцениваться по-другому: его квалификация как инструктора и как профессионала проясняется через тренажер. Конечно, инструктор должен быть педагогом (пусть и стихийным); сколько прекрасных специалистов отсеивались именно из-за нерасположенности к исполнению такой роли.

Важнейший тренд производства — капитализация знаний персонала (см. рис. 4), поскольку операторская профессия сложна, и профессионалы быстро теряются, перемещаются на другие позиции или уходят на пенсию, унося с собой уникальные знания и опыт [25]. В самой значительной степени это относится к инструкторам, причем функциональность современного тренажера дает им эффективный инструментарий капитализации знаний и опыта (прежде всего, путем создания упражнений).

5. ОЦЕНКА ОПЕРАТОРОВ — ТОЖЕ ЧАСТЬ ТРЕНИНГА

Полезность тренинга — вещь, на первый взгляд, самоочевидная, не требующая специального обоснования. В то же время попытки такого обоснования предпринимались всегда (см. обзор в работе [4, п. 5.1]), хотя по большей части они сводились



к декларативным оценкам эффекта от снижения аварийности и сокращения времени подготовки операторов. Изменения, претерпеваемые конкретным обучаемым, до последнего времени не были предметом изучения, прежде всего, из-за отсутствия инструментов их измерения. Оценки, предоставляемые инструкторами и руководителями, часто не обладают большой ценностью в силу их субъективности и фрагментарности взаимодействия конкретных инструкторов с обучаемыми.

Вместе с тем проблема переноса приобретенных обучаемыми навыков на реальную практику — едва ли не центральная; поток исследований на эту тему очень широкий, хотя акцент делается в основном на изучение влияния на перенос разнообразных факторов (мотивированности обучаемых, условий тренинга, уровня испытываемого стресса, личностных характеристик операторов и пр.) [26]. Заказчики дорогостоящих систем компьютерного тренинга вправе знать не только среднюю по миру/отрасли/стране эффективность тренажеров, но и индивидуальный прогресс работников по ходу обучения. Необходимо это и инструкторам: на основе объективных оценок они могут формировать обратную связь обучаемым, корректируя программу и фокусируясь на проблемных местах отдельных обучаемых.

Среди современных подходов отметим методы извлечения и оценки структурных знаний операторов по ходу тренинга [27], позволяющие не только проследить прогресс обучаемого с учетом индивидуальных личностных психологических характеристик, но и выявить дефициты причинно-следственных связей, складывающихся у оператора. Это отражает общую постнеклассическую тенденцию перехода от изучения человека-оператора вообще к учету его когнитивных, личностных и даже индивидуальных характеристик (см. рис. 4).

6. НОВЫЙ ТИП РАЗРАБОТКИ

В классическую эпоху составляющие тренажера, выполненные автономно специалистами разного профиля, объединяли в единый комплекс и сдавали заказчику, подтверждавшему их готовность согласно утвержденным заранее требованиям. Позже стало понятно, что без привлечения экспертов заказчика, начиная с самых ранних стадий разработки, ничего не получится.

По современным представлениям (см. новые связи на рис. 4), жизнь тренажера начинается задолго до его внедрения. Заказчик/будущий пользователь/владелец — полноправный хозяин системы; его роль в будущем саморазвитии тренажера

закладывается уже на стадии разработки при определении объема моделирования, первоначального набора упражнений, содержания методик.

Идеальна ситуация, когда специалист заказчика работает с командой разработчиков прямо по ходу создания тренажера. Собранный и «оживленная» технологическая схема впервые выносится на суд заказчика еще до интеграции с системой управления и, тем более, с информационной моделью. Его реакции на этой стадии позволяют исправить ошибки первоначальной конструкции, выявить упущенное, учесть идеи будущего эксплуатанта.

Тот же подход применяется и на стадии приемки. Как и всякая приемка, приемка тренажера — совокупность тестов. Но особенность в том, что «принять» необходимо практически живой организм, поведение которого крайне разнообразно, а вмешательство с целью исправить реакцию на отдельное воздействие может потребовать переверку других реакций. Более того (и это вполне характерно для постнеклассического подхода [1]), итоговое состояние тренажерной модели вполне может зависеть от набора проведенных тестов. Вот почему так важно обеспечить полноту и состоятельность тестов.

Центральный вопрос — интерпретация результатов тестирования в случаях, когда они не очевидны для участников приемки. Дискуссии разработчиков и пользователей — вещь совершенно нормальная; критерий — в той же модели, позволяющей практически неограниченное живое экспериментирование. Оно приводит либо к необходимости учесть в модели ранее неучтенное и добиться требуемого поведения, либо согласиться, что текущее поведение приемлемо. Это можно сравнить с консилиумом врачей, где пациент — не больной, а, скорей, на глазах растущий ребенок.

По мере взросления модель переболевает детскими болезнями, достигает расцвета, и, наконец, начинает требовать постоянного обслуживания. Это также часть проекта, без которой полноценный тренажер не живет.

7. ОТ КЛАССИКИ ЧЕРЕЗ НЕКЛАССИКУ К ПОСТНЕКЛАССИКЕ

Основные свойства современного тренажера были заложены еще на неклассическом этапе:

- участники проекта работают одним широким коллективом;
- они вместе корректируют модель (через требования к разработчикам) и создаваемые методики обучения;

- исчезает классическое представление, что единжды созданная система настолько хороша, что будет работать при всех изменениях в объеме и во всем диапазоне возможных возмущений;
- система становится самодостаточной, саморегулируемой; значительная часть возникающих дефицитов устраняется без вмешательства разработчика.

В постнеклассическом подходе трансформация продолжается.

Тренажер технически рассчитан на десятилетие (опыт показывает, что за этот период успевают отмереть старое и появиться новое поколение тренажеров). Без саморазвития тренажер не выживет; за десять лет сменятся все — инструкторы, практически все операторы, почти все руководство, в том числе отвечающее за подготовку операторов; значительно модифицируются требования к тренажерной системе и критерии оценки успешности обучения.

Тренажер ни при каких обстоятельствах не может «застыть», поскольку:

- изменяется реальный мир (объект, система управления, требования к содержанию обучения);
- развиваются участники и кураторы тренинга, их возможности и требования растут;
- сменяется команда (появляются новые операторы), меняются инструкторы;
- изменяется внешняя среда (законодательство, нормативные представления об операторах и их подготовке).

На заре промышленной автоматизации оператора считали единоличным командиром, которому помогала низовая автоматика. По мере роста возможностей автоматике он все больше превращался в ее придаток. Не случайно в тот период оператор исследовался наукой как «идеальный наблюдатель», «идеальный регулятор» и пр. Затем наступило понимание, что оператор — элемент эргатической (человеко-машинной) системы, причем наиболее важный, но и наиболее уязвимый.

Соответственно этой эволюции менялись и содержание компьютерного тренинга, и сами его мотивы. Помимо необходимости защитить персонал, активы и деньги на передний план выходит социальный фактор (профессиональный рост и самореализация работников) и экологические соображения.

Представляется, что роль тренажеров будет неуклонно возрастать. Кроме постоянного усложнения технологий и систем управления, требующего поддерживать боеготовность операторов на постоянно высоком уровне, появляются и дополнительные вызовы. Среди них — революционное

изменение средств труда и соответствующий поколенческий сдвиг работников. В перспективе без достаточного уровня компьютеризации, присутствия элементов искусственного интеллекта и виртуальной реальности операторская профессия перестанет привлекать молодых работников. Тренажер — один из эффективных инструментов погружения в эту новую рабочую среду.

Добавим к этому новую актуальность КТ в свете вводимых в действие профессиональных стандартов операторов [28]. Законодатель требует подтверждения профессиональных компетенций работников на основе указанных стандартов; в то же время так называемые практические (или процедуральные) компетенции не могут быть (в отличие от декларативных) оценены без воссоздания практической деятельности операторов. Применение в этих целях полномасштабных натуральных тренажеров (своего рода пилотных установок) не решает проблемы из-за массовости задачи оценки компетенций: только в перерабатывающей промышленности речь идет о нескольких миллионах оперативных работников, и создание для них натуральных тренажеров — экономически немыслимая задача. Компьютерные тренажеры здесь — практически единственная альтернатива [29].

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ. О ПОСТНЕКЛАССИЧЕСКОЙ ТРЕНАЖЕРНОЙ НАУКЕ

Что демонстрирует представленный в настоящей работе тренажерный пример в плане изменений научной рациональности, критериев научной истины и научных идеалов? Эволюция тренажеростроения, на наш взгляд, свидетельствует о следующем.

- Исследователю становится интересна не только и даже не столько техническая реализация тренажерных компонентов, которая с развитием разнообразных информационных технологий становится все более рутинной.
- При построении тренажеров необходимо добиться целей не сугубо технических, а социотехнических и даже гуманитарных (социальных, психологических, педагогических).
- Человек становится мерой всего проекта: это касается и собственно операторов, и инструкторов, и самих разработчиков.
- Все участники тренинга рассматриваются не как усредненная масса профессионалов, а как индивидуумы, обладающие когнитивными и личностными особенностями.
- Для создания системы необходимо собрать очень широкий спектр научной экспертизы.



Тренажерный проект — воистину междисциплинарный (даже трансдисциплинарный).

- Тренажерная система рассматривается эволюционно — от зарождения и реализации до поддержки и сопровождения. Тренажерный проект — симбиоз научного исследования, технической разработки и инжиниринга.
- Тренажер тянет за собой решение широчайшего круга смежных задач, основанное на моделировании процессов и эмуляции систем управления.

Представляется, что сходные изменения ждут и другие направления промышленной автоматизации. Как известно, нет ничего практичнее хорошей теории. Но теория становится постнеклассической, поглощая практику и растворяясь в ней.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Степин В.С.* Классика, неклассика, постнеклассика: критерии различия. — В кн.: «Постнеклассика: философия, наука, культура». — СПб.: Изд. дом «Мир», 2009. — С. 249—295. [*Stepin, V.S.* Classic, non-classic, post-non-classic: criteria of discernment / in: «Post-non-classic: philosophy, science, culture». — SPb.: Publishing house «Mir», 2009. — P. 249—295. (In Russian)]
2. *Ленский В.Е.* Философия и методология управления в контексте развития научной рациональности // Тр. XII Всерос. совещания по проблемам управления, ВСПУ—2014. — М.: ИПУ РАН, 2014. — С. 7785—7796. [*Lepsky, V.E.* Philosophy and methodology of control in the context of the development of scientific rationality // Proc. of the XII all-Russian conf. on control sciences, VSPU—2014, Moscow, ICS Russian Academy of Sciences, 2014. — P. 7785—7796. (In Russian)]
3. *Левфевр В.А.* Кибернетика второго порядка в Советском Союзе и на Западе // Рефлексивные процессы и управление. — 2002. — Т. 2, № 1. — С. 96—103. [*Lefebvre, V.A.* Cybernetics of the second order in the Soviet Union and in the West // Reflexive processes and control. — 2002. — Vol. 2, no. 1. — P. 96—103. (In Russian)]
4. *Дозорцев В.М.* Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов. — М.: СИНТЕГ, 2009. — 372 с. [*Dozortsev, V.M.* Computer-based training systems for industrial processes operators. — M.: SINTEG, 2009. — 372 p. (In Russian)]
5. *Sneesby, M.* Operator Training Simulator: Myths and Misgivings // Hydrocarbon Processing. — 2008. — Vol. 87, no. 10. — P. 125—127.
6. *Дозорцев В.М.* Современные компьютерные тренажеры для обучения операторов ТП: состояние и направления ближайшего развития // Автоматизация в промышленности. — 2007. — № 7. — С. 30—36. [*Dozortsev, V.M.* Modern Computer Simulators for Industrial Operators Training: State-of-the-art and Future Directions // Automation in Industry. — 2007. — No. 7. — P. 30—36. (In Russian)]
7. *Kluge, A.* The Acquisition of Knowledge and Skills for Taskwork and Teamwork to Control Complex Technical Systems. — Dordrecht: Springer, 2014. — 200 p.
8. *Patle, D.S., Ahmad, Z., & Rangaiyah, G.P.* Operator Training Simulators in the Chemical Industry: Review, Issues, and Future Directions // Reviews in Chemical Engineering. — 2014. — Vol. 30, no. 2. — P. 199—216.
9. *Дозорцев В.М., Агафонов Д.В., Назин В.А.* и др. Компьютерный тренинг операторов: непреходящая актуальность, новые возможности, человеческий фактор // Автоматизация в промышленности. — 2015. — № 7. — С. 8—20. [*Dozortsev, V.M., Agafonov, D.V., Nazin, V.A., et al.* Computer-based Operators Training: Lasting Relevance, New Opportunities, Human Factors // Automation in Industry. — 2015. — No. 7. — P. 8—20. (In Russian)]
10. *Large Property Damage Losses in the Hydrocarbon Industry, 25th ed.* — The Marsh & McLennan Companies, 2018.
11. *Bainbridge, L.* Ironies of Automation // Automatika. — 1983. — Vol. 19, no. 6. — P. 775—779.
12. *Фельдбаум А.А.* Основы теории оптимальных автоматических систем. — М.: Наука. — 1966. — 624 с. [*Feldbaum, A.A.* Fundamentals of the theory of optimal automatic systems. — M.: Nauka. — 1966. — 624 p. (In Russian)]
13. *Schön, D.A.* The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action. — Aldershot: Avebury, 1991. — 385 p.
14. *Гленсдорф П., Пригожин И.* Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации: пер. с англ. — М.: Мир, 1973. — 280 с. [*Glensdorf, P., Prigogine, I.* Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuation, translated from English. — M.: Mir. — 1973. — 280 p. (In Russian)]
15. *Dozortsev, V.M., Kreidlin, E.Yu.* State-of-the-art Automated Process Simulation Systems // Automation and Remote Control. — 2010. — Vol. 71, no. 9. — P. 1955—1963.
16. *Дозорцев В.М., Кнеллер Д.В., Левит М.Ю., Шестаков Н.В.* О проблеме адекватности тренажерных моделей технологических процессов // Тр. междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'2000)». — Москва, 2000. — С. 51—61. [*Dozortsev, V.M., Kneller, D.V., Levit, M.Yu., Shestakov, N.V.* On the Problem of Industrial Processes Simulation Models Adequacy // Proc. of the Int. conf. «Identification of systems and control problems (SICPRO'2000)», Moscow, 2000. — P. 51—61. (In Russian)]
17. *Fei Tao, Meng Zhang, Nee, A.Y.C.* Digital Twin Driven Smart Manufacturing. — L.: Academic Press, 2019. — 282 p.
18. *Стефенсон Г., Хендерсон П., Шиндлер Г., Дозорцев В.М.* За пределами тренинга операторов: другие области применения имитационного моделирования технологических процессов // Промышленные АСУ и контроллеры. — 2009. — № 6. — С. 22—26. [*Stephenson, G., Henderson, P., Schindler, G., Dozortsev, V.M.* Outside the Operators' Training: Other Applications of Industrial Processes Simulation // Industrial ACS and controllers. — 2009. — No. 6. — P. 22—26. (In Russian)]
19. *Qin, S.J.* Survey on Data-driven Industrial Process Monitoring and Diagnosis // Annual Review in Control. — 2012. — Vol. 36. — P. 220—234.
20. *Погорелов В.П., Баулин Е.С., Фролов А.И.* и др. О проблеме эмуляции среды управления в компьютерных тренажерных комплексах для обучения операторов технологических процессов // Автоматизация в промышленности. — 2019. — № 4. — С. 41—46. [*Pogorelov, V.P., Baulin, E.S., Frolov, A.I., et al.* On the Problem of Control Environment Emulation in Computer-based Simulators for Industrial Process Operators // Automation in Industry. — 2019. — No. 4. — P. 41—46. (In Russian)]
21. *Nazir, S., Kluge, A., Manca, D.* Immersive Virtual Environment or Conventional Training? Assessing the Effectiveness of Different Training Methods on the Performance of Industrial Operators in Accident Scenario / in: «Ergonomics and human factors in safety management». — Boca Raton, 2016. — P. 185—205.
22. *Сергеев С.Ф.* Введение в проектирование интеллектуальных интерфейсов. — СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. — 108 с. [*Sergeev, S.F.* Introduction into the design of intelligent interfaces. — SPb: SPb State University ITMO, 2011. — 108 p. (In Russian)]
23. *Дозорцев В.М.* Интерфейсы с погружением в обучении операторов технологических процессов // Датчики и сис-

- темы. — 2017. — № 6. — С. 54–64. [Dozortsev, V.M. Immersive Interfaces for Industrial Process Operators Training // Sensors & Systems. — 2017. — No. 6. — P. 54–64. (In Russian)]
24. Новичков А.Ю., Фролов А.И., Погорелов В.П., Дозорцев В.М. Интерфейс полевого оператора в компьютерном тренажере: 3D погружение или 2D панорама? // Вторая междунар. науч.-практ. конф. «Человеческий фактор в сложных технических системах и средах». — СПб., 2016. — С. 268–276. [Novichkov, A.Yu., Frolov, A.I., Pogorelov, V.P., Dozortsev V.M. Field Operator Interface in a Computer-based Simulator: 3D immersion or 2D panorama? // 2nd Intern. Scientific and practical conf. «Human factor in complex technical systems and environments» (Ergo—2016), St. Petersburg, 2016. — P. 268–276. (In Russian)]
25. Технология сохранения и воспроизведения когнитивного опыта / под ред. В.Н. Носуленко. — М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2016. — 456 с. [The technology of preservation and reproduction of cognitive experience / ed. V.N. Nosulenko. — Moscow: Publishing House «Institute of psychology RAS», 2016. — 456 p. (In Russian)]
26. Grossman, R., Salas, E. The Transfer of Training: What Really Matters // International Journal of Training and Development. — 2011. — Vol. 15. — P. 103–120.
27. Dozortsev, V., Nazin, V., Oboznov, A., et al. Evaluation of the Process Operator Knowledge Formation Resulting from Computer-Based Training // 21st European Concurrent Engineering Conf. 2015 (ECEC 2015). — Lisbon, 2015. — P. 118–123.
28. Федотова В.В., Талапова Н.В., Шинявская С.И., Пуратова Н.В. Профессиональные стандарты в России: современное состояние вопроса, возможности применения / под ред. В.В. Федотовой. — Екатеринбург: УрФУ, 2013. — 51 с. [Fedotova, V.V., Tolapova, N.V., Shinyavskaya, S.I., Puratova, N.V. Professional standards in Russia: the Current State of the Issue, the Possibility of Application / ed. V.V. Fedotova. — Ekaterinburg: UrFU, 2013. — 51 p. (In Russian)]
29. 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. [Dozortsev, V.M., Nazin, V.A., Baulin, E.S. On the Problem of Industrial Operators' Competencies Managing in the Light of Introducing Professional Standards System // Automation in Industry. — 2019. — No. 10. — P. 48–55. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии чл.-корр. РАН Д.А. Новиковым.

Поступила в редакцию 22.09.2019, после доработки 5.11.2019.
Принята к публикации 5.11.2019.

Дозорцев Виктор Михайлович — д-р техн. наук,
АО «Хоневелл», г. Москва,
✉ Victor.Doortsev@honeywell.com.

FROM NON-CLASSICAL TO POST-NON-CLASSICAL SCIENCE: AN EXAMPLE OF INDUSTRIAL OPERATORS' COMPUTER-BASED TRAINING SYSTEMS

V.M. Dozortsev

Honeywell JSC, Moscow, Russia

✉ Victor.Doortsev@honeywell.com

Abstract. A review of constructing and using of industrial operators' simulators in the framework of the periodization of scientific rationality from classical and non-classical to post-non-classical phase is given. The key post-non-classical characteristics of modern simulators are presented: self-development, interdisciplinarity, anthropocentric factor, orientation to practice. Special attention is paid to the simulation technique as a fundamentally new way to determine the response of a big technical system to user's arbitrary interventions, as well as to immersive tools for reproducing the trainees working environment. The post-non-classical role of the instructor was studied, combining the functions of a training organizer, a development agent, who initiates the reconfiguring of simulator's components and improving teaching methods, as well as a key link in the best professionals' knowledge capitalization. The fundamental changes in the simulator project organization and implementation are shown, covering now not only research and development, but also the maintenance and improvement of simulator systems. The transfer of skills acquired in the training and modern approaches to the automated assessment of the operators' work on the simulator are considered. The basic trends in the simulator constructing are analyzed: a change in the motives of training (the prevalence of workers' professional growth and self-realization), a generational shift against a revolutionary renewal of the means of labor (virtual and mixed reality, advisors based on artificial intelligence), the development and assessment of employees' professional competencies. Given the high synthetics of training technologies, the presentation is based on a wide conceptual context, including scientific, technical, cognitive-psychological, pedagogical, socio-economic and literary phenomena.

Keywords: classical, non-classical and post-non-classical scientific rationality, industrial processes, operators' computer-based training systems, self-developing systems, human-sizedness of complex technical systems, interdisciplinary approach.