

УДК 159.9

ГРНТИ 15.81.31

ПРЕДТРЕНАЖЕРНОЕ ОБУЧЕНИЕ ОПЕРАТОРОВ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ИНЖЕНЕРНО-ПСИХОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ, МЕТОДИКИ, МОДЕЛИ, ЦИФРОВЫЕ РЕШЕНИЯ

© 2025 г. Н.Н. Бахтадзе*, В.М. Дозорцев **, А.А. Обознов***,
Е.Д. Чернецкая****

** Доктор технических наук, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник
ФГБУН Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии
наук, г. Москва, Россия
e-mail: sung7@yandex.ru*

*** Доктор технических наук, директор по развитию бизнеса
ООО «Центр цифровых технологий» (Группа компаний «Рубитех»),
г. Москва, Россия
e-mail: vdozortsev@mail.ru*

**** Доктор психологических наук, главный научный сотрудник ФГБУН Институт
психологии Российской академии наук, г. Москва, Россия
e-mail: aao46@mail.ru*

***** Кандидат психологических наук, директор центра компетенций по культуре
безопасности и надежности человеческого фактора, АНО ДПО «Техническая академия
Росатома», г. Обнинск, Россия
e-mail: EIDChernetskaya@rosatom.ru*

Исследуется содержание и роль концептуальной модели и умственных навыков в обеспечении продуктивности компьютерного обучения операторов сложных технических систем. Обосновывается связь концептуальной модели со структурными знаниями о системе. Предлагается методика направленного формирования умственных навыков при предтренажерном обучении, основанная на актуализации концептуальной модели с

использованием информации о технической системе (в виде экспертных знаний, моделируемого поведения объекта или реальных данных о его функционировании). Приводится методика оценки структурных знаний, основанная на методе субъективного сетевого шкалирования, предоставляющая обратную связь по ходу обучения и индивидуализирующая программу тренинга. Описываются автоматизированные системы обучения, реализующие предлагаемые методики.

Ключевые слова: техническая система, компьютерные тренажеры, предтренажерное обучение, концептуальная модель, структурное знание, умственные навыки, РФ-метод сетевого шкалирования.

ВВЕДЕНИЕ

Современные компьютерные тренажеры (КТ) для обучения операторов сложных технологических систем (ТС) — признанное средство повышения профессиональной готовности персонала. Преимущества КТ отмечаются многими исследователями (Asbjörnsson et al., 2013). Тренажеры позволяют операторам изучать и понимать управляемый процесс, практикуя различные сценарии управления в условиях, безопасных для персонала и производственных активов. Без КТ невозможно сформировать надежные специализированные навыки управления, такие как работа в нормальных и нештатных условиях (вплоть до аварийных), обнаружение, диагностика и устранение последствий отклонений состояний ТС от нормы. КТ незаменимы для подготовки операторов к переходу на новые или модернизированные технологии и системы управления.

Обладающие высокоточными динамическими моделями технологических процессов, воспроизводящие с высокой степенью подобия реальную операторскую среду, оснащенные современными инструментами автоматизированного инструктирования, тренажеры повсеместно внедрены в практику подготовки операторов — в том числе, в нефтегазовом секторе, металлургии, энергетике и др. важных промышленных отраслях. В течение трех последних десятилетий рынок КТ рос высокими темпами и на сегодня только в сегменте непрерывных производств приближается к 800-900 млрд. долл. в год.

Однако в последнее время все слышнее претензии пользователей к эффективности компьютерного тренинга (Marcano et al., 2019). Их тревогу отражает неожиданно низкий уровень использования этих дорогостоящих систем подготовки. По данным (Komulainen, Sannerud, 2014), в среднем по миру тренинг операторов проходит раз в год, а его продолжительность варьирует от 3 до 5 дней. В России даже в крупных промышленных компаниях показатели еще ниже: обязательный периодический тренинг, как правило, занимает 4-8 часов и редко превышает два дня в год. В таких ограничениях уникальные возможности КТ выхолащиваются, тренинг превращается в рутину и рассматривается только как необходимое условие допуска персонала к работе. В то же время на фоне ускоряющейся смены поколений работников и несмотря на оснащенность предприятий современными КТ, имеется серьезный риск, что уникальные знания инструкторов-экспертов, в большинстве своем опытных операторов, утратятся и не будут переданы новым операторам. По утверждению специалистов, промышленность должна в сжатые сроки обеспечить качественное обучение новичков, которые заместят выходящих на пенсию опытных операторов (Alamo, Ross, 2017). Среди механизмов достижения этой приоритетной цели особый интерес представляют предтренажерное обучение, оценка прогресса и обратная связь обучаемым по ходу и по результатам тренинга.

В работе (Asbjörnsson et al., 2013) показано, что имеющиеся у оператора базовые знания о ТС влияют на их дальнейшее обучение и повышают продуктивность компьютерного тренинга. Существующая парадигма компьютерного тренинга предполагает, что оператор уже обладает априорно сформированной концептуальной моделью (КМ) технической системы, без чего невозможен ни эффективный тренинг, ни работа на реальном объекте¹. Поэтому перед обучением на тренажере необходимо

¹ В определенном смысле допуск к компьютерным тренажёрам операторов, не обладающих качественной КМ, хоть и не связан с риском для персонала и производственных активов, чреват выработкой ложных навыков и столь же непродуктивен, как и работа таких операторов на реальной промышленной установке.

убедиться, что операторы обладают достаточно сформированной КМ (Dozortsev, 2009).

Отмечается также, что владение базовыми знаниями снижает когнитивную нагрузку на оператора, что повышает эффективность и производительность компьютерного тренинга (Bell et al., 2008).

Согласно (Salas et al., 2012), конструктивная обратная связь делает тренинг операторов более эффективным и полезным, позволяет обучаемым извлекать уроки из ошибок. Обратная связь должна основываться на объективной оценке действий обучаемого и должна позволять определить, насколько хорошо он подготовлен к реальной работе (Vellaithurai et al., 2013). Оценка необходима также для определения потребностей в обучении и индивидуализации учебной программы в рамках подготовки и поддержания квалификации операторов (Håvold et al., 2015).

Несмотря на понимание практиками важности обратной связи, исследователи говорят о дефиците надежных оценок имеющихся у операторов знаний и навыков, что делает их излишне самоуверенными, приводит к умалению ими важности обучения и снижению его производительности (Bell et al., 2008). Отмечается, что на используемые на практике оценки оператора чрезмерно влияет опыт инструктора и его представления о «правильном» управлении ТС. Оценки часто субъективны, невозпроизводимы и, следовательно, малоэффективны. Указывается на необходимость разработки надежных и воспроизводимых инструментов оценки, включающих стандартизированные методы и проверенные процедуры обучения (Nazir and Manca, 2015). Известны примеры таких инструментов — они основаны на анализе базовых навыков операторских действий (Dozortsev, 2009), на сопоставлении действий обучаемых с нормативными действиями экспертов (Vellaithurai et al., 2013) и на оценках коллег-обучаемых (Park, Hyun, 2014). На особо ответственных производственных объектах, оснащенных полномасштабными компьютерными тренажерами, в качестве обратной связи выступают оценки успешности действий операторов при наступлении моделируемых нештатных ситуаций тренировок в нештатных ситуациях (Анохин, 2001).

В настоящей работе исследуется роль развитой КМ как необходимого условия продуктивного обучения на КТ и дальнейшего эффективного и безопасного управления ТС. Анализируется связь КМ со структурными знаниями (СЗ) и умственными навыками (УН) операторских действий. Предлагается подход к количественному и качественному оцениванию уровня сформированности структурного знания. Описываются автоматизированные системы формирования и укрепления умственных навыков, обеспечивающие направленное предтренажерное обучение операторов с использованием оценок индивидуального уровня сформированности СЗ.

Роль концептуальной модели и умственных навыков в обучении операторов

Понятие концептуальной модели, введенное в середине прошлого века Аланом Велфордом (A.T. Welford), до сих пор не имеет единого толкования и остается предметом активного обсуждения. В контексте управления технической системой под концептуальной моделью понимают представления оператора о составе и связях компонентов ТС, о состоянии системы и ее внешнего окружения, о способах управления системой. КМ не просто отражает реальную ТС, но выступает как базовая схема поведения оператора, формируемая и постоянно актуализируемая в процессе обучения и реальной работы.

Согласно Велфорду (Welford, 1961), КМ позволяет оператору создать и понять целостную умственную карту системы (когнитивная функция) и на этой основе эффективно управлять ею (регулятивная функция). Б.Ф. Ломов добавлял в КМ коммуникативную функцию (Ломов, 1991). Особенно содержательной представляется связь КМ с оперативным образом управляемого объекта, выстраиваемым оператором при выполнении конкретного действия (Ошанин, 1999). В.П. Зинченко видел назначение КМ в актуализации знаний, необходимых оператору для решения текущих задач (Зинченко, 1970). В.Ф. Венда подчеркивал роль КМ в выработке стратегии принятия решений и программы действий оператора, выделяя при этом постоянные КМ

(общие представления о ТС) и оперативные КМ (образы и схемы, необходимые для решения текущих задач) (Венда, 1990). Такой взгляд согласуется с зарубежными подходами. Так, в работе (Norman, 1983) в качестве оперативных КМ выделяются ментальные репрезентации, создаваемые для решения конкретной задачи; они относительно непрочны и при появлении других задач сменяются новыми репрезентациями. Ж.Ф. Ришар определял оперативные КМ как сведения о требуемой (должной) динамике ТС, необходимые для управления системой (Ришар, 1998). В отечественной психологии регуляция деятельности традиционно рассматривалась как преодоление рассогласования между текущим образом и образом-целью путем корректирующего управления или подстройки образа по текущему состоянию. Согласно ситуационно-деятельностному подходу к регуляции операторской деятельности, А.А. Обознов обосновывает циклический процесс упреждающего сличения на основе КМ заданного и фактического развития ситуации (Обознов, 2009).

В отличие от функций, содержания и структуры концептуальной модели, гораздо меньше проработаны особенности вовлечённых в КМ знаний, оценка уровня ее зрелости и способы формирования и укрепления модели в ходе направленного обучения. Эти вопросы становятся все актуальнее в силу отмеченных выше проблем компьютерного тренинга и появления развитых цифровых средств обучения. Постоянные КМ опираются на знания оператора — прежде всего морфологическое (т.е. знание о составе и иерархии компонентов ТС)² и структурное (знание о взаимосвязи и взаимовлиянии ее компонентов)³. Глубина КМ зависит от решаемой задачи управления и в случае сложной ТС должна отражать причинно-следственные связи компонентов, важнейшие для принятия операторских решений. В этом контексте СЗ рассматривают как связующее

² Современная промышленная техническая система включает в себя не только управляемый технологический процесс, но и систему управления им, все более сложную и интеллектуальную. ТС также расширяется до социотехнической системы, что отражает коллективный характер деятельности оператора, взаимодействующего с другими членами смены/бригады, руководителями, специалистами разных служб производства.

³ Совокупность морфологического и структурного знания иногда определяют как концептуальное знание.

звено между декларативными и процедурными знаниями; последние приобретаются в тренинге на КТ и в процессе реальной работы (Jonassen et al., 1993).

Как отмечалось выше, компьютерный тренинг требует уже сложившейся КМ, фундамент которой должен закладываться в предтренажерном обучении. Поскольку КМ выступает как базовая схема действий оператора, она должна охватывать требуемые для этих действий умения, включающие в себя не только декларативные («теоретические») знания, но и соответствующие навыки. Эти навыки отличаются от специализированных процедурных навыков, вырабатываемых на тренажере. В КМ необходимы умственные навыки базовых операторских действий, под которыми понимаются автоматизированные приемы и способы решения умственных задач, встречавшихся ранее в обучении или в реальной практике. В этом смысле предтренажерное обучение является «научением научению», когда предъявление операторам сходных проблем приводит ко все более успешному решению, формируя установку на эффективное научение (Дозорцев, Обознов, 2024).

Согласно модели принятия операторских решений (Дозорцев, 2009), КМ покрывает несколько этапов деятельности оператора, в том числе, обнаружение, диагностику и планирование процедуры компенсации последствий отклонений в ТС (включая аварийные ситуации). На этих этапах оператор мысленно прилагает к КМ разные варианты воздействий, прогнозирует соответствующие изменения в ее состоянии и сличает их с наблюдаемой симптоматикой. В результате КМ совершенствуется, а оператор приобретает соответствующие умственные навыки управления ТС.

Выработка любого умственного навыка предполагает наличие информации об изучаемой системе: обучаемый прилагает гипотетические воздействия к имеющейся у него КМ и сравнивает выход КМ с указанной информацией от ТС. Результат сравнения либо укрепляет КМ, либо изменяет (актуализирует) ее, обогащая новым подтверждающим опытом или исключая из КМ неподтвержденное таким опытом (Дозорцев, 2009). При этом информация о ТС должна быть адекватной (отражающей

истинное поведение системы), актуальной (подстраиваемой под изменения в системе), верифицируемой экспертами, ответственными за обучения операторов и, по мере возможности, прогностической (позволяющей предсказывать поведение системы в новых условиях).

В качестве источников такой информации могут выступать:

- экспертные знания опытных профессионалов, например, в форме причинно-следственных диаграмм (Cause-Effect Matrix). Такое описание обладает удобной и прозрачной формой, легко «извлекается», хорошо отражает объект с позиций именно структурного знания, базового для КМ; несет в себе индивидуальный опыт «учителя». Но по тем же причинам экспертная модель ТС субъективна, агрегирует в одной причинно-следственной связи множество конкретных ситуаций, недостаточно полно описывает динамику системы;

- точные модели ТС (построенные на основе фундаментальных законов) обеспечивают необходимую адекватность, хорошо описывают сложную динамику системы. Однако модели этого типа громоздки при использовании в обучении; трудоемки в реализации и сопровождении; напрямую не связаны ни с реальной ТС, ни с опытом ее эксплуатантов;

- модели, основанные на данных (data-driven), формируются с помощью методов интеллектуального анализа данных и машинного обучения (МО), основываются на реальной истории функционирования ТС и постоянно дообучаются по ходу ее работы. Такие модели существенно проще в использовании в системах обучения. Вместе с тем, как и всякие модели, они требуют формальной (статистической) и экспертной верификации. Современные методы синтеза систем управления позволяют использовать такие модели объекта для прогнозирования будущего поведения системы (Bakhtadze, 2022).

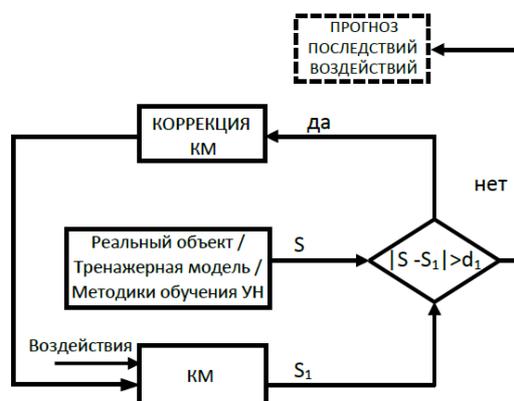
Разные умственные навыки (УН) требуют разных методов обучения и, возможно, разных типов моделей, включая гибридное моделирование ТС. В «докомпьютерное»

время широко практиковались методики формирования таких УН. Однако появление полномасштабных КТ породило иллюзию возможности эффективно отработать операторские действия в любых тренировочных ситуациях, из-за чего указанные умственные навыки во многом утратились. В наше время необходимость их восстановления все сильнее. Рассмотрим некоторые из них подробнее.

Умственный навык прогнозирования последствий воздействий на ТС

Навык состоит в мысленном прогнозировании отклика управляемой системы на предполагаемые управляющие воздействия или изменения внешней среды (опережающее отражение). Качество прогноза определяется адекватностью КМ реальной системе.

При формировании навыка наблюдаемые последствия (сигнал S , рис. 1) могут порождаться самой ТС по ходу реальной работы оператора, ее тренажерной моделью в тренинге или специальными методиками направленного обучения УН на базе экспертных знаний или предиктивной ассоциативной модели (Дозорцев, 2009; Bakhtadze, 2024). В последнем случае для рассматриваемого навыка используется методика прогнозирования последствий воздействий на техническую систему «What if?». Наблюдения S сличаются с откликами S_1 концептуальной модели. Если разница не превышает заданного порога d_1 , прогноз считается приемлемым, а КМ — адекватной рассматриваемой причинно-следственной связи; в противном случае происходит актуализация КМ.



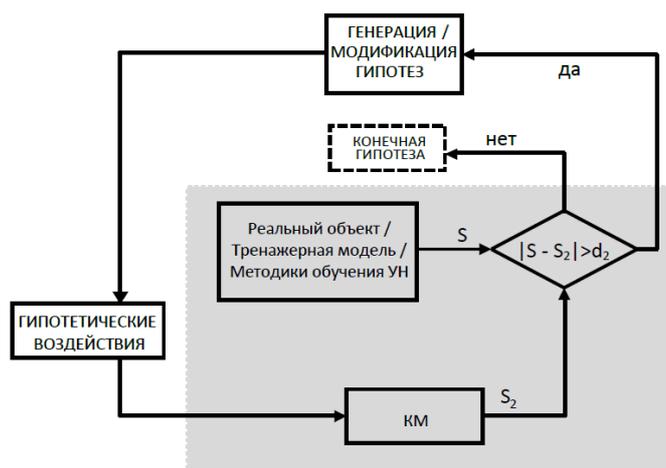
S - наблюдаемые симптомы; S_1 - прогнозируемые симптомы (реакция КМ);
 d_1 - порог корректности прогноза.

Рис. 1. Формирование навыка прогнозирования последствий

Умственный навык диагностики причин отклонений

Данный УН включает в себя описанный выше навык прогнозирования (выделен на рис.2), причем в качестве методики обучения для навыка диагностики используется «Генерация причин нарушений в ТС» (Дозорцев, 2009). Механизм поиска предполагает выбор текущей гипотезы о причинах отклонений и сличение наблюдаемых симптомов S с откликом КМ на гипотетические воздействия (S_2). Если разница достаточно небольшая, гипотеза считается приемлемой, иначе она подвергается модификации на основе обнаруженной разницы $|S - S_2|$.

Содержание практических задач диагностики чрезвычайно многообразно, поскольку многообразны возможные состояния ТС, варианты воздействий и наблюдаемые симптомы. Положительный перенос навыка определяется адекватностью КМ, сходством методов диагностики в обучении и в реальной работе. При этом на стадии предтренажерного обучения наиболее важным представляется научение подходу к решению (научение научению). Другими словами, оператор научается не столько правильным воздействиям на КМ в конкретных ситуациях, сколько эффективной процедуре генерации и модификации гипотез по наблюдаемым симптомам.



S - предъявляемые симптомы; S_2 - реакции КМ; d_2 - порог адекватности гипотезы.

Рис.2. Формирование навыка диагностики причин отклонений

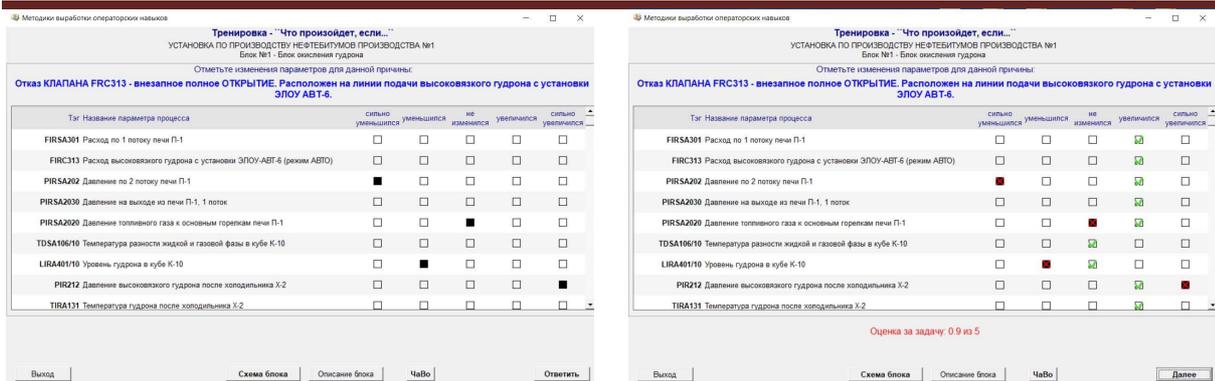
В первой фазе формирования навыка складывается словарь перешифровок откликов КМ (состояний) в адекватные гипотетические воздействия (причины). Затем

обе составляющие навыка (прогнозирование последствий и генерация гипотез) интегрируются в единый механизм диагностики. Наконец, диагностический УН шаблонизируется, и обучаемый приобретает высокую готовность решать широкий спектр конкретных диагностических задач в большом диапазоне варьирования условий.

Автоматизированные системы обучения умственным навыкам

Описанные выше УН могут отрабатываться в реальной работе или в компьютерном тренинге. В первом случае это сопряжено с серьезным риском для производственных активов и безопасности персонала; во втором — отработка проходит в безопасной обстановке, но в фоновом режиме, поскольку назначение КТ — выработка сложных специализированных навыков, опирающихся на уже сложившиеся базовые УН. В обоих случаях продуктивность научения умственным навыкам сильно снижается. Эффективным представляется априорное формирование и укрепление УН с помощью специализированных Автоматизированных систем обучения (АСО), нацеленных на выработку УН с учетом индивидуальных результатов обучаемых. Такие системы разработаны для всех трех стадий предтренажерного обучения (обнаружение, диагностика причин и планирование процедур). Ниже описываются АСО прогнозирования и диагностики (Дозорцев, 2009).

В АСО прогнозированию обучаемому предъявляются варианты воздействий на ТС (изменение внешних условий, поломки технологического оборудования, пр.) и предлагается спрогнозировать соответствующие изменения заданных параметров системы в качественной шкале (например: «Сильно уменьшился», «Уменьшился», «Не изменился», «Увеличился», «Сильно увеличился»), рис. 3а. Для прогнозирования обучаемый использует КМ в части знаний о причинно-следственных связях в ТС. Полученный прогноз фиксируется и сличается с эталонными изменениями параметров; результат сличения показан на рис. 3б. Общая оценка обучения рассчитывается с учетом величины отклонения прогноза от эталона по каждому заданию.



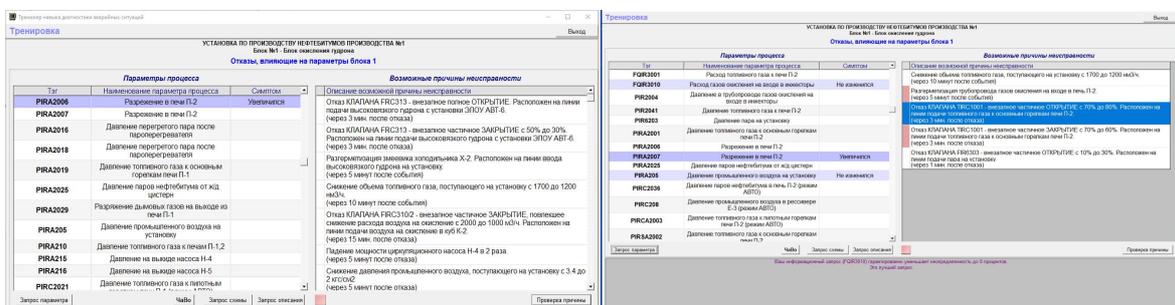
а)

б)

а) прогноз, выполненный обучаемым; б) оценка результатов (эталон помечен зеленым; ошибки обучаемого — красным).

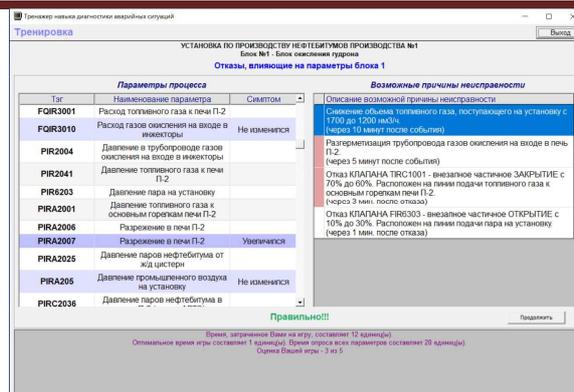
Рис. 3. Автоматизированная система обучения прогнозированию последствий воздействий.

Обучение ведется в форме «игры» с обучаемым, построенной на задаваемом множестве возможных нарушений в ТС (причин) и доступных для наблюдения параметров системы (симптомов), рис. 4. В начале игры система “загадывает” одну из возможных причин и осуществляет т.н. «первоначальный вброс», т.е. сообщает об изменении одного из параметров, наступившем из-за наступления загаданной причины (выделен на рис. 4а). Задача оператора на каждом шаге игры — отобрать причины, непротиворечащие уже имеющейся симптоматике, сформулировать текущую гипотезу об искомой причине и сформулировать следующий информационный запрос к системе, эффективно подтверждающий или опровергающий эту гипотезу (рис. 4б).



а)

б)



с)

- а) симптомы, причины, «первоначальный вброс» (подкрашен);
- б) выбор гипотезы, оценка текущего запроса (подкрашен ярче);
- с) все сделанные запросы и проверенные гипотезы (подкрашены), оценка игры

Рис. 4. Автоматизированная система диагностики причин отклонений (АСО ДИАГНОСТ)

На любом шаге оператор может дать ответ, если посчитает, что правильно определил загаданную причину. Если ответ верный, игра завершается; при неверном ответе оператор получает уведомление об ошибке и может продолжить игру. Ответ оказывается ошибочным в двух случаях: 1) либо уже проверенных симптомов недостаточно для однозначного определения отказа («мало информации»), 2) либо какой-нибудь из уже запрошенных параметров ведет себя иначе, чем в выбранной оператором причине («ошибка оператора»).

Оператор может воспользоваться технологической схемой и описанием процесса. Для последующего анализа результатов обучения в системе ведется детальный протокол, включая учет затраченного времени. Оператору предоставляются оценка текущего информационного запроса и общая оценка игры (суммарная стоимость всех запросов и проверок гипотез в сравнении со стоимостью «оптимального» поиска), рис. 4с.

Мотивационная основа ДИАГНОСТА не исчерпывается игровым характером обучения. В реальной работе оператор испытывает стресс ограниченного времени на решение задачи, мотивирующий совершенствование способа диагностики. В

мотивационное подобие в системе достигается подменой дефицита времени на принятие решения дефицитом необходимой для этого информации. Такие правила «игры» направляют оператора на поиск наиболее короткого пути решения.

Принципиально важна возможность пополнять информационную базу АСО (симптомы и причины) с учетом измеренного уровня сформированности СЗ конкретных операторов. При наличии дефицитов СЗ в игру добавляются выявленные проблемные причинно-следственные связи и внимание обучаемых концентрируется именно на них.

ДИАГНОСТ опробован в лабораторных условиях и в предтренажерном обучении операторов на крупных российских нефтеперерабатывающих заводах. Опрос обучаемых и анализ автоматических протоколов, позволяет утверждать, что с увеличением числа проведенных игр: 1) уменьшается число обращений к схемам и текстовым описаниям (ТС становится все более «изученной»); 2) снижается физическое время игры, поскольку оператор научается эффективной диагностике; 3) и, главное, изменяется стратегия решения — сводится практически «на нет» число проверок ошибочных причин и снижается число необходимых для решения информационных запросов (Дозорцев, 2009).

Оценка уровня сформированности структурного знания операторов

Оценка СЗ, являющегося основой концептуальной модели сложной ТС, необходима для:

- формальной аттестации обучаемых,
- формирования обратной связи оператору по ходу и по результатам тренинга,
- индивидуализации тренинга путем корректировки программ обучения по выявленным дефицитам СЗ.

выявленным дефицитам СЗ.

Для оценки понимания причинно-следственных связей, важнейшего компонента структурных знаний обучаемого оператора, может быть применена известная с 50-х годов прошлого века техника субъективного сетевого шкалирования, реконструирующая семантическое пространство испытуемого путем перевода оценок сходства признаков

объекта на более высокий уровень абстракции. В результате получается наглядный срез представлений испытуемого об объекте в форме связного графа, в узлах которого признаки, а ребра показывают значимые связи. Выделяемые графы неодинаковы у испытуемых разного опыта и квалификации, и потому результаты реконструкции можно использовать при контроле, тестировании и оценке прогресса обучаемых.

Среди известных методов сетевого шкалирования хорошо зарекомендовал себя метод PathFinder (PF-метод), делающий акцент на связи между компонентами объекта, т.е. именно на структурное знание (Schvaneveldt et al., 1989). В качестве исходных данных метод использует матрицу связанности (схожести, взаимовлияния), содержащую субъективные оценки попарной близости признаков в числовой шкале. Метод применим к анализу полноты имеющегося у испытуемого СЗ; обнаружению переоцененных или недооцененных связей, склонности к простым (древовидным) или циклическим (коалиционным) структурам; к сравнению СЗ разных носителей знаний (обучаемые / опытные работники / предметные эксперты / преподаватели / инструкторы, пр.); к анализу влияния обучения на уровень сформированности СЗ; к выявлению возможного сближения СЗ обучаемых и инструкторов по результатам обучения; к оценке влияния на СЗ факторов обучения (условия эксперимента, полнота инструктажа, др.).

Во многих исследованиях раннего периода PF-метод продемонстрировал возможность глубокого анализа особенностей СЗ испытуемых при невысоких затратах на извлечение данных и интерпретацию результатов тестирования. Метод применим в весьма разных предметных областях (от элементарной математики до теории эволюции и принятия решений на флоте). В ряде исследований сходство СЗ учащихся и экспертов возрастало по результатам обучения, что положительно коррелировало с традиционными показателями успеваемости. Так, указанное сближение зафиксировано в эксперименте по 30 понятиям статистики и дизайна (40 обучаемых) (Goldsmith et al., 1991). Известны схожие результаты, полученные в экспериментах с участием студентов-медиков и врачей-экспертов, учителей-новичков и опытных учителей, и др.

Упомянем применение RF-метода в изучении процедурного знания. В такой постановке собственно вершинами графа служат действия, а ребрами — переходы от одного действия к другому, взвешенные вероятностями перехода. В работе (Gillan, Cooke, 2001) метод применялся к двум задачам — к оценке изменения структуры действий по ходу оперантного научения и к оценке переноса процедурных знаний при переходе испытуемого на новые текстовые редакторы. Успех исследования связывался с возможностью изучать с помощью RF-метода поведение испытуемого в ситуации, точно моделирующей реальную задачу, в то время как в традиционных экспериментах регистрируются только общие показатели производительности обучаемых (ошибки, время отклика, пр.).

После периода определенного охлаждения интерес к RF-методу возрос в последние годы. Важное новое направление — составление и исследование когнитивных (метальных) карт на основе попарных оценок расстояний между ментальными ориентирами объекта (Furlough, Gillan, 2020). Такие карты дают представления о поведении испытуемых, их рассуждениях и принятии решений, позволяя оценивать их опыт и прогнозировать эффективность будущей деятельности. В работе (Politowicz et al., 2022) сравниваются две группы испытуемых (всего 48 человек), владеющие разными инструкциями по автопилотированию (базовой и продвинутой). В обеих группах при достаточно высоком уровне когерентности (согласованности оценок) зафиксирована статистически значимая разница выделяемых структур и их явное изменение по ходу дальнейшего обучения. Наконец, отметим современную работу (Sanchez, 2021), исследующую на большом массиве онлайн-игроков сетевое представление двадцати концептов, определённых экспертами или на основе автоматического обработки интернет-ресурсов. Выделенные в исследовании структуры позволили надёжно оценить опыт игроков и их результативность в будущих играх.

В целом, чаще всего RF-метод использовался для оценки взаимосвязей однозначно определяемых признаков изучаемого объекта — от анализа концептуальных

понятий некоторой предметной области до оценки разницы в восприятии вакцинации профессионалами и пользователями (Amith et al., 2017). В то же время существует важный класс задач обучения и тренинга, для которых рассматриваемый метод применялся крайне редко. Изучаемые в этих задачах объекты принципиально отличаются от описанных выше и характеризуются следующим:

- взаимосвязь признаков по-разному проявляется в многообразных ситуациях и меняется на протяжении «жизненного цикла» объекта; истины в последней инстанции для таких объектов не существует;
- оценка взаимосвязи признаков столь сложных и изменчивых объектов основана не только на глубоком понимании их технических характеристик, но и на более широком опыте, приобретенном носителями знаний, причем такой опыт необязательно касается конкретного изучаемого объекта⁴;
- в таких условиях как никогда важна индивидуальность преподавателя, обладающего собственным пониманием объекта; он учит именно своему пониманию, а не неким «бесспорным» постулатам.

Пример такого объекта — сложные человеко-машинные системы, содержащие разнородные подсистемы с многочисленными взаимозависимостями, маловероятными или вовсе непредсказуемыми свойствами. В ряде работ (например, Обознов и др., 2013) исследуется динамика изменений СЗ по ходу профессионализации операторов реакторного энергоблока атомной станции. Поскольку подобные исследования «в поле» чрезвычайно длительны и организационно сложны, в другой работе (Дозорцев и др., 2014) использовано «быстрое» обучение на компьютерных тренажерах. Экспериментально зафиксирован статистически значимый сдвиг СЗ испытуемых (17

⁴ Ср. с положением В.П. Зинченко о том, что в КМ наряду с профессиональными знаниями и сведениями, получаемыми при специальном обучении и в процессе управления, включается жизненный опыт человека-оператора (Зинченко, 1970).

магистрантов-технологов) в сторону СЗ эксперта-преподавателя вуза. Также удалось соотнести понимание взаимосвязей компонентов технической системы с личностными особенностями испытуемых (зависимость от групповых суждений, уверенность в себе, готовность к сотрудничеству, стремление к перфекционизму, пр.).

Другой пример — исследование СЗ сложных литературных нарративов. Пилотные эксперименты показали, что анализ такого знания методом сетевого шкалирования позволяет выявлять тонкую нюансировку структур в зависимости от читательского и жизненного опыта испытуемых. Опробованная в этих экспериментах методика оценивания структурного знания используется в представленных выше автоматизированных системах предтренажерного обучения, предназначенных для устранения дефицитов СЗ путем генерации упражнений на проблемные компоненты выделяемых графов, такие как когерентность и плотность, переоценённые и недооценённые связи, избыточность структуры, сила и распространённость связей и др. (Дозорцев, Миронова, 2020).

ВЫВОДЫ И ЗАДАЧИ БУДУЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Несовершенство концептуальных моделей снижает эффективность управления реальным объектом и мешает полноценному компьютерному тренингу операторов сложных ТС. Это проявляется в недостаточном развитии умственных навыков обнаружения, диагностики причин и планирования процедур компенсации негативных последствий отклонений. Указанный разрыв можно преодолеть с помощью специальных средств автоматизированного обучения, устраняющих дефициты структурного знания, отражающего содержание и глубину регулятивной компоненты операторских КМ.

Экспериментально опробованные качественные и количественные методы оценивания уровня сформированности структурного знания предоставляют обратную связь обучаемым и, что наиболее существенно, позволяют индивидуализировать тренинг, направленно преодолевая обнаруженные дефициты СЗ у конкретных обучаемых.

Описанные системы обучения умственным навыкам экономичны в реализации, поскольку строятся на экспертных оценках причинно-следственных связей (в противовес высокозатратному точному моделированию системы в компьютерных тренажерах), они легко поддерживаются, модифицируются и пополняются пользователями, что необходимо на регулярной основе как при изменениях в технологии и в процедурах управления ТС, так и при расширении методической базы обучения. Так же невысоки затраты на извлечение знаний и интерпретацию презентующих их сетевых структур.

Особый интерес предложенный подход представляет для такой сложной и потенциально опасной отрасли как атомная энергетика, поскольку цена ошибки оператора слишком велика. Ряд исследований, например, (Обознов и др., 2013; Чернецкая, 2016) позволяет сделать вывод, что не у всех операторов по результатам подготовки и поддержания квалификации формируется КМ, позволяющая эффективно справляться в штатных и нештатных ситуациях. Была выявлена связь уровня сформированности КМ операторов с объективными показателями их безопасной и эффективной работы, а также их индивидуально-личностными качествами. Показано, что у операторов, обладающих личностными качествами субъектов профессиональной деятельности и способных принимать самостоятельные и ответственные решения в различных, в т.ч. нештатных ситуациях, формируются наиболее целостные и структурированные КМ энергоблока атомной станции. Вопрос о связи уровня сформированности КМ у операторов с их индивидуально-личностными особенностями требует дальнейшего изучения.

Для повышения профессиональной готовности персонала к действиям в нештатных ситуациях и при запроектных авариях, необходимо внедрять новые методы оценки результатов обучения оперативного персонала атомных станций в ходе противоаварийных тренировок на полномасштабном тренажере. Это позволит определить категории оперативного персонала, которым нужна дополнительная подготовка по формированию концептуальной модели управления энергоблоком АЭС. Кроме того, такая подготовка

будет способствовать развитию личностных качеств, способствующих становлению у операторов субъектной позиции, что необходимо для принятия самостоятельных решений в сложных и непредвиденных ситуациях.

Подход может быть проверен в полномасштабном проекте обучения оперативного персонала сложных ТС, включающего (1) конфигурацию АСО по базовым умственным навыкам операторских действий; (2) проведение предтренажерного обучения операторов на представительном массиве причинно-следственных связей технической системы по индивидуальным траекториям, корректируемым по дефицитам измеряемого СЗ; (3) анализ эффекта обучения по автоматическим оценкам выполнения заданий в АСО и по уровню сформированности СЗ до и после обучения. При наличии на технологической площадке развитых инструментов компьютерного тренинга проект может быть подкреплен обучением и экзаменом на полномасштабных тренажерах, причем принцип определения уровня сформированности КМ аналогичен обучению на АСО.

ЛИТЕРАТУРА

- Анохин, А.Н., Острейковский В.А.* Вопросы эргономики в ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 2001. 344 с.
- Венда В.Ф.* Системы гибридного интеллекта: Эволюция, психология, информатика. М.: Машиностроение, 1990. 448 с.
- Дозорцев В.М.* Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов. М.: Синтег, 2009. 372 с.
- Дозорцев В.М., Обознов А.А., Назин В.А., Гуцыкова С.В., Миронова А.С.* Формирование у операторов концептуального понимания технологического объекта: актуальная задача и объективный результат компьютерного тренинга // Автоматизация в промышленности. 2014. № 12. С. 8-14.
- Дозорцев В.М., Миронова А.С.* К использованию характеристик структурного знания для оценки переноса в тренинге операторов технологического процесса // Актуальные проблемы психологии труда, инженерной психологии и эргономики. Вып. 9. / Под ред. А.А. Обознова, А.Л. Журавлева. М.: ИПРАН, 2020. С.117–162. DOI: 10.38098/ergo.2020.009
- Дозорцев В.М., Обознов А.А.* Развитие концептуальной модели технической системы – предпосылка профессиональной готовности операторов // Психофизиологическое обеспечение профессиональной надежности персонала организаций атомной отрасли / Сборник материалов VII отраслевой научно-практической конференции, г. Сочи, 23-24 октября 2024 г. М.: Когито-Центр, 2024. С.26-35.
- Галактионов А.И.* Системные исследования психических образов, формируемых оператором-технологом / Системный подход в инженерной психологии и психологии труда. М.: Наука, 1992. С.92-104.
- Зинченко В.П. (Ред.)* Эргономика. Принципы и рекомендации. Вып. 1. М.: ВНИИТЭ, 1970.
- Ломов Б.Ф.* Вопросы общей, педагогической и инженерной психологии. М.: Педагогика, 1991. 296 с.
- Обознов А.А.* Структура концептуальной модели у человека-оператора // Актуальные проблемы психологии труда, инженерной психологии и эргономики. Вып. 1 / Под ред. В. А. Бодрова, А. Л. Журавлёва. М.: ИПРАН, 2009. С. 403–413.
- Обознов А.А., Чернецкая Е.Д., Бессонова Ю.В.* Концептуальные модели атомной станции у операторов с разным профессиональным стажем // Психологический журнал. 2013. Т. 34. № 4. С. 47–57.

- Ошанин Д.А.* Предметное действие и оперативный образ: избранные психологические труды. М.: МПСИ; Воронеж: МОДЭК, 1999. 512 с.
- Ришар Ж.Ф.* Ментальная активность. Понимание, рассуждение, нахождение решений / Сокр. пер. с франц. Т.А. Ребеко. М.: ИПРАН, 1998.
- Чернецкая Е.Д.* Структурная организация концептуальных моделей у операторов атомных станций : автореферат дис. ... кандидата психологических наук : 19.00.03. Москва, 2016. 28 с.
- Alamo J., Ross M.* Solve operator training in a challenging refining industry // Hydrocarbon Processing. 2017. V.96. P.67-69.
- Amith M., Cunningham R., Savas L.S. et al.* Using Pathfinder networks to discover alignment between expert and consumer conceptual knowledge from online vaccine content // Journal of Biomedical Informatics. 2017. V.74. P.33-45. DOI: 10.1016/j.jbi.2017.08.007
- Asbjörnsson G., Hulthén E., Evertsson C.M.* An On-Line Training Simulator Built on Dynamic Simulations of Crushing Plants // 16th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing August 25-28, 2013. San Diego, California, USA. Proceedings Volumes. 2013. V.46(16). P.218-223. DOI: 10.3182/20130825-4-US-2038.00105
- Bakhtadze N., Cheresenko A., Elpashev D. et al.* Predictive associative models of processes and situations // IFAC-PapersOnLine, 2022. V. 55. No. 2, Pp. 19-24. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.04.163
- Bakhtadze N., Cheresenko A., Elpashev D. et al.* Control Systems Based on Real-time Digital Predictive Models // IFAC PapersOnLine. 2024. V. 58-19. P.1120–1125. DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.09.117
- Bell B.S., Kanar A.M., Kozlowski S.W.J.* Current issues and future directions in simulation-based training in North America // The International Journal of Human Resource Management. 2008. V.19. P.1416-1434. DOI: 10.1080/09585190802200173
- Furlough C., Gillan D. J.* Assessing the Ability of Multidimensional Scaling and Pathfinder Networks to Measure Spatial Knowledge // Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. 2020. V. 64(1). P. 303-307. DOI: 10.1177/1071181320641070
- Gillan D.J., Cooke N.J.* Using PathFinder networks to analyze procedural knowledge in interactions with advanced technology // Advances in Human Performance and Cognitive Engineering Research / E. Salas (Ed.). Elsevier Science/JAI Press. 2001. V.1. P.125–161. DOI: 10.1016/S1479-3601(01)01005-0

- Goldsmith T. E., Johnson P.J., Acton W.H. Assessing structural knowledge // Journal of Educational Psychology. 1991. V.83. P.88–96. DOI: 10.1037/0022-0663.83.1.88
- Håvold J. I., Nistad S., Skiri A. et al. The human factor and simulator training for offshore anchor handling operators // Safety Science. 2015. V.75. P.136-145. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.02.001
- Jonassen D.H., Beissner K., Yacci M. Structural Knowledge. Techniques for Representing, Conveying, and Acquiring Structural Knowledge. N.J.: Lawrence Erlbaum Ass. Publ., 1993.
- Komulainen, T.M., Sannerud, R. Survey on simulator training in Norwegian oil & gas industry / Oslo and Akershus University College, Oslo. 2014. V.4. URL: <https://skriftserien.hioa.no/index.php/skriftserien/article/view/19/18> (дата обращения 06.02.2025)
- 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 P.414-424. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.02.019
- Nazir S., Manca D. How a plant simulator can improve industrial safety // Process Safety Progress. 2015. V.34. P.237-243. DOI: 10.1002/prs.11714
- Norman D.A. Some observations on mental models // Mental Models / Eds.: D. Gentner, A. Stevens. Hillsdale, 1983.
- Park C.J., Hyun J.S. A peer-assessment system connecting on-line and a face-to-face smart classroom // Life Science Journal. 2014. V.11. P.700-705.
- Politowicz M.S., Sato T., Chancey E.T., & Yamani Y. Pathfinder Networks for Measuring Operator Mental Model Structure with a Simple Autopilot System // Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2022. 66(1), 883-887. DOI: 10.1177/1071181322661510
- Salas E., Tannenbaum S. I., Kraiger K., Smith-Jentsch K.A. The Science of Training and Development in Organizations: What Matters in Practice // Psychological Science in the Public Interest. 2012. V.13(2). P.74-101. DOI: 10.1177/1529100612436661
- Sanchez S.M. Concept Sourcing for Mental Models: A Study of Mental Models & Expertise Using a Video Game Context. North Carolina State University, 2021.
- Schvaneveldt R.W., Durso F., Dearhold D.W. Network structures in proximity data // The psychology of learning and motivation. 1989. V. 24. P. 249–284. DOI: 10.1016/S0079-7421(08)60539-3

Vellaithurai C., Srivastava A., Zonouz S. SECPSIM: A Training Simulator for cyber-power infrastructure security // IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Vancouver, BC, Canada, 2013, pp. 61-66, DOI: 10.1109/SmartGridComm.2013.6687934

Welford A.T. On the human demands of automation: Mental work conceptual model, satisfaction and training // Industrial and business psychology. 1961. V. 5. P.182–193.

Статья поступила в редакцию: 11.02.2025. Статья опубликована: 31.03.2025.

PRE-TRAINING FOR OPERATORS OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS: ENGINEERING AND PSYCHOLOGICAL JUSTIFICATION, METHODS, MODELS, DIGITAL SOLUTIONS

© 2025 Natalia N. Bakhtadze *, Victor M. Dozortsev, Alexander A. Oboznov***, Elena D. Chernetskaya******

** Sc.D. in Engineering, Head of the Laboratory, Chief Scientific Researcher, Institute of Control Sciences RAS, Moscow, Russia
e-mail: sung7@yandex.ru*

*** Sc.D. in Engineering, Business Development Director, Center of Digital Technology (Rubytech Group), Moscow, Russia
e-mail: vdozortsev@mail.ru*

**** Sc.D. in Psychology, Chief Scientific Researcher, Institute of Psychology RAS, Moscow, Russia
e-mail: aao46@mail.ru*

***** Ph.D. in Psychology, Director of Center for Competences on Safety Culture and Reliability of the Human Factor, Rosatom Technical Academy, Rosatom Technical Academy, Obninsk, Russia
e-mail: EIDChernetskaya@rosatom.ru*

The content and role of the conceptual model and mental skills in ensuring the productivity of computer training for complex technical systems' operators are investigated. The connection of the conceptual model with the structural knowledge of the system is substantiated. A methodology for the directed formation of mental skills in pre-training is proposed, based on the actualization of a conceptual model using information about a technical system (in the form of expert knowledge, simulated object behavior, or real data on its functioning). A methodology for assessing structural knowledge is presented, based on the method of subjective network scaling, providing feedback in the learning process and individualizing the operator training program. Automated learning systems that implement the proposed methodology are described.

Key words: technical system, computer simulators, pre-training, conceptual model, structural knowledge, mental skills, network scaling PF-method.

REFERENCES

- Anohin, A.N., & Ostrejkovskij, V.A. (2001). *Voprosy jergonomiki v jadernoj jenergetike [Ergonomics issues in nuclear power engineering]*. Moscow: Jenergoatomizdat Publ. (In Russian).
- Venda, V.F. (1990). *Sistemy gibridnogo intellekta: Jevoljucija, psihologija, informatika [Hybrid Intelligence Systems: Evolution, Psychology, Computer Science]*. Moscow: Mashinostroenie Publ. (In Russian).
- Dozorcev, V.M. (2009). *Komp'juternye trenazhery dlja obuchenija operatorov tehnologicheskix pocessov [Computer simulators for training process operators]*. Moscow: Sinteg Publ. (In Russian).
- Dozorcev, V.M., Oboznov, A.A., Nazin, V.A., Gucykova, S.V., & Mironova, A.S. (2014). Formirovanie u operatorov konceptual'nogo ponimanija tehnologicheskogo objekta: aktual'naja zadacha i objektivnyj rezul'tat komp'juternogo treninga [Formation of conceptual understanding of a technological object in operators: a current task and objective result of computer training]. *Avtomatizacija v promyshlennosti [Automation in industry]*. 12. 8-14. (In Russian).
- Dozorcev, V.M., & Mironova A.S. (2020). K ispol'zovaniju harakteristik strukturnogo znanija dlja ocenki perenosa v treninge operatorov tehnologicheskogo processa [Towards the use of structural knowledge characteristics to assess transfer in the training of process operators]. *Aktual'nye problemy psihologii truda, inzhenernoj psihologii i jergonomiki [Current issues in labor psychology, engineering psychology and ergonomics]*. A.A. Oboznov, A.L. Zhuravlev (Eds.). V. 9. (pp. 117–162). Moscow: IPRAN. (In Russian). DOI: 10.38098/ergo.2020.009
- Dozorcev, V.M., & Oboznov, A.A. (2024). Razvitie konceptual'noj modeli tehnicheckoj sistemy – predposylka professional'noj gotovnosti operatorov [Development of a

- conceptual model of a technical system is a prerequisite for the professional readiness of operators]. Proceedings from Psychophysiological support of professional reliability of personnel of nuclear industry organizations: *VII otraslevaja nauchno-prakticheskaja konferencija, g. Sochi, 23-24 oktjabrja 2024 g. [VII industry scientific and practical conference, Sochi, October 23-24, 2024]*. (pp. 26-35). Moscow: Kogito-Centr. (In Russian).
- Galaktionov, A.I. (1992). Sistemnye issledovanija psichicheskikh obrazov, formiruemyh operatorom-tehnologom [Systematic studies of mental images formed by the operator-technologist]. *Sistemnyj podhod v inzhenernoj psichologii i psichologii truda [Systems approach in engineering psychology and labor psychology]*. (pp. 92-104). Moscow: Nauka Publ. (In Russian).
- Zinchenko, V.P. (Ed.). (1970). *Jergonomika. Principy i rekomendacii [Ergonomics. Principles and recommendations]*. V. 1. Moscow: VNIITJe Publ. (In Russian).
- Lomov, B.F. (1991). *Voprosy obshhej, pedagogicheskoj i inzhenernoj psichologii [Questions of general, educational and engineering psychology]*. Moscow: Pedagogika Publ. (In Russian).
- Oboznov, A.A. (2009). Struktura konceptual'noj modeli u cheloveka-operatora [The structure of the conceptual model of a human operator]. *Aktual'nye problemy psichologii truda, inzhenernoj psichologii i jergonomiki [Current issues in labor psychology, engineering psychology and ergonomics]*. V.A. Bodrov, A.L. Zhuravljov (Eds.). V. 1. (pp. 403—413). Moscow: IPRAN. (In Russian).
- Oboznov, A.A., Cherceckaja, E.D., & Bessonova, Ju.V. (2013). Konceptual'nye modeli atomnoj stancii u operatorov s raznym professional'nym stazhem [Conceptual models of a nuclear power plant by operators with different professional experience]. *Psichologicheskij zhurnal [Psychological journal]*. 34(4). 47—57. (In Russian).
- Oshanin, D.A. (1999). *Predmetnoe dejstvie i operativnyj obraz: izbrannye psichologicheskie trudy [Object action and operative image: selected psychological works]*. Moscow: MPSI; Voronezh: MODJeK Publ. (In Russian).
- Rishar Zh.F. (1998). *Mental'naja aktivnost'. Ponimanie, rassuzhdenie, nahozhdenie reshenij [Mental activity. Understanding, reasoning, finding solutions]*. T.A. Rebeko (Trans.). Moscow: IPRAN. (In Russian).
- Cherceckaja, E.D. (2016). Strukturnaja organizacija konceptual'nyh modelej u operatorov atomnyh stancij [Structural organization of conceptual models for nuclear power plant operators]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Moscow (In Russian).
- Alamo, J., & Ross, M. (2017). Solve operator training in a challenging refining industry. *Hydrocarbon Processing*. 96. 67-69.

- Amith, M., Cunningham, R., Savas, L. S., Boom, J., Schvaneveldt, R., Tao, C., & Cohen, T. (2017). Using Pathfinder networks to discover alignment between expert and consumer conceptual knowledge from online vaccine content. *Journal of biomedical informatics*, 74, 33–45. DOI: 10.1016/j.jbi.2017.08.007
- Asbjörnsson G., Hulthén E., & Evertsson C.M. (2013). An On-Line Training Simulator Built on Dynamic Simulations of Crushing Plants. *16th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing August 25-28, 2013. San Diego, California, USA*. Proceedings. 46(16). 218-223. DOI: 10.3182/20130825-4-US-2038.00105
- Bakhtadze N., Cheresenko A., Elpashev D. & et al. (2022). Predictive associative models of processes and situations. *IFAC-PapersOnLine*. 55(2). 19-24. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.04.163
- Bakhtadze N., Cheresenko A., Elpashev D. & at al. (2024). Control Systems Based on Real-time Digital Predictive Models. *IFAC PapersOnLine*. 58-19. 1120–1125. DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.09.117
- Bell, B.S., Kanar, A.M., & Kozlowski, S.W.J. (2008). Current issues and future directions in simulation-based training in North America. *The International Journal of Human Resource Management*, 19(8), 1416–1434. DOI: 10.1080/09585190802200173
- Furlough, C., & Gillan, D.J. (2021). Assessing the Ability of Multidimensional Scaling and Pathfinder Networks to Measure Spatial Knowledge. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 64(1), 303-307. DOI: 10.1177/1071181320641070
- Gillan, D.J., & Cooke, N.J. (2001). Using pathfinder networks to analyze procedural knowledge in interactions with advanced technology. In E. Salas (Ed.), *Advances in human performance and cognitive engineering research* (pp. 125–161). Elsevier Science/JAI Press. DOI: 10.1016/S1479-3601(01)01005-0
- Goldsmith, T.E., Johnson, P.J., & Acton, W.H. (1991). Assessing structural knowledge. *Journal of Educational Psychology*, 83(1), 88–96. DOI: 10.1037/0022-0663.83.1.88
- Håvold, J.I., Nistad, S., Skiri, A. & et al. (2015). The human factor and simulator training for offshore anchor handling operators. *Safety Science*. 75. 136-145. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.02.001
- Jonassen, D.H., Beissner K., & Yacci M. (1993). *Structural Knowledge. Techniques for Representing, Conveying, and Acquiring Structural Knowledge*. N.J.: Lawrence Erlbaum Ass. Publ.

- Komulainen, T.M., Sannerud, R. (2014). *Survey on simulator training in Norwegian oil & gas industry*. Oslo and Akershus University College, Oslo. 4. URL: <https://skriftserien.hioa.no/index.php/skriftserien/article/view/19/18> (data obrashhenija 06.02.2025).
- Marcano, L., Haugen, F.A., Sannerud, R., & Komulainen, T. (2019). Review of simulator training practices for industrial operators: How can individual simulator training be enabled? *Safety Science*. 115. 414-424. DOI: 10.1016/j.ssci.2019.02.019
- Nazir, S. and Manca, D. (2015). How a plant simulator can improve industrial safety. *Proc. Safety Prog.*, 34: 237-243. DOI: 10.1002/prs.11714
- Norman, D.A. (1983). Some observations on mental models. *Mental Models*. D. Gentner, A. Stevens (Eds). Hillsdale.
- Park, C.J., & Hyun, J.S. (2014). A peer-assessment system connecting on-line and a face-to-face smart classroom. *Life Science Journal*. 11. 700-705.
- Politowicz, M. S., Sato, T., Chancey, E. T., & Yamani, Y. (2022). Pathfinder Networks for Measuring Operator Mental Model Structure with a Simple Autopilot System. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 66(1), 883-887. DOI: 10.1177/1071181322661510
- Salas, E., Tannenbaum, S. I., Kraiger, K., & Smith-Jentsch, K. A. (2012). The Science of Training and Development in Organizations: What Matters in Practice. *Psychological Science in the Public Interest*, 13(2), 74-101. DOI: 10.1177/1529100612436661
- Sanchez, S.M. (2021). *Concept Sourcing for Mental Models: A Study of Mental Models & Expertise Using a Video Game Context*. North Carolina State University.
- Schvaneveldt, R.W., Durso, F., & Dearhold, D.W. (1989). Network structures in proximity data. *The psychology of learning and motivation*. 24. 249–284. DOI: 10.1016/S0079-7421(08)60539-3
- Vellaithurai, C., Srivastava, A., & Zonouz, S. (2013). "SECPSIM: A Training Simulator for cyber-power infrastructure security," *2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Vancouver, BC, Canada*. 61-66. DOI: 10.1109/SmartGridComm.2013.6687934
- Welford, A.T. (1961). On the human demands of automation: Mental work conceptual model, satisfaction and training. *Industrial and business psychology*. 5. 182–193.

Библиографическая ссылка на статью:

Бахтадзе Н.Н., Дозорцев В.М., Обознов А.А., Чернецкая Е.Д. Предтренажерное обучение операторов сложных технических систем: инженерно-психологическое обоснование, методики, модели, цифровые решения // Институт психологии Российской академии наук. Организационная психология и психология труда, 2025. Т. 10. № 1. С. 173–201. DOI: 10.38098/ipran.opwp_2025_34_1_007

Bakhtadze, N.N., Dozortsev, V.M., Oboznov, A.A., Chernetskaya, E.D. (2025). Predtrenazhernoie obuchenie operatorov slozhnyh tehnicheskih sistem: inzhenerno-psihologicheskoe obosnovanie, metodiki, modeli, cifrovye reshenija [Pre-training for operators of complex technical systems: engineering and psychological justification, methods, models, digital solutions]. Institut Psikhologii Rossiyskoy Akademii Nauk. Organizatsionnaya Psikhologiya i Psikhologiya truda [Institute of Psychology of the Russian Academy of Sciences. Organizational Psychology and Psychology of Labor]. 10(1). 173–201. DOI: 10.38098/ipran.opwp_2025_34_1_007

Адрес статьи: http://work-org-psychology.ru/engine/documents/document_1095.pdf