

Методы оценивания структурного знания и их применение к обучению операторов технологических процессов

А.С. Миронова (ООО «Яндекс»)

Описаны существующие методы оценивания и использования структурных знаний (СЗ) для тренинга. Рассмотрены этапы работы со СЗ и подходы, применяемые на этих этапах: извлечение первичных данных о знании, обработка и оценка полученных данных, формирование основанной на СЗ обратной связи по ходу тренинга. Приводится характеристика специфики работы операторов ТП и то, как каждый из рассматриваемых подходов работает в контексте этой специфики. Изложен новый подход к оцениванию СЗ, учитывающий особенности операторской деятельности.

Ключевые слова: структурное знание, оператор, компьютерный тренинг

Введение. Актуальность исследования.

Число аварий, происходящих на технологических предприятиях, в последние годы остается стабильно высоким по всему миру. При этом существенная доля (до половины) происшествий происходит по вине человека-оператора. Разработка эффективных методов тренинга операторов направлена, в том числе на снижение столь критичной статистики.

На сегодняшний день ключевым инструментом обучения операторов технологических процессов (ТП) являются системы компьютерного тренинга. Они обеспечивают углубленную тренировку в разнообразных технологических ситуациях, включая нормальные технологические условия, плановые и аварийные остановы, сбои в работе оборудования и переходы на новые технологические режимы [1]. В современном химико-технологическом производстве, где активы стоимостью в миллиарды долларов контролируются все меньшим по численности персоналом, компьютерные тренажеры (КТ) остаются наиболее востребованным способом подготовки операторов ТП. Реже используют «пассивные» тренировки на работающей установке, тренинг в процессе работы, обучение в классе с инструктором и другие виды тренинга [2].

Несмотря на признанную эффективность, все эти способы не обеспечивают в необходимой мере обратную связь в процессе обучения: специалистам, отвечающим за подготовку персонала, важно видеть изменения, происходящие с обучаемыми по ходу тренинга. На сегодня только опытный инструктор, чаще интуитивным образом, может попытаться оценить, насколько в результате тренинга углубилось понимание оператором ТП или укрепились его навыки работы в нештатных ситуациях. Автоматизированных средств управления тренингом, основанных на объективной оценке прогресса обучаемых, пока не создано. Это обстоятельство существенно сужает возможности компьютерного тренинга, поскольку субъективная инструкторская оценка не позволяет обоснованно определить изменения в структуре операторских навыков и предсказать положительный перенос¹ выра-

ботанных в тренинге навыков на реальную практику.

Обеспечение объективной обратной связи в процессе обучения может быть основано на представлении знаний оператора об управляемом объекте в виде системы отношений между характеристиками объекта в памяти человека, которую (систему) принято называть структурным знанием (СЗ). С ростом профессионализма эволюционирует и СЗ оператора, служащее индикатором уровня его компетентности.

В задаче оценивания успешности обучения операторов проделана серьезная работа, однако вектор исследований смещен в сторону фактической (апостериорной) оценки результатов работы оператора и его личностно-психологических характеристик, влияющих на выполнение работы, но не на оценку СЗ как параметра, ответственного за успешность решения производственных задач. Если СЗ сформировано хорошо (хотя необходимо определить, что представляет собой хорошо сформированное СЗ), это может стать критерием готовности оператора к безопасному и эффективному управлению ТП.

В работе предпринимается попытка разработать и обосновать новый метод оценивания уровня подготовки оператора через измерения характеристик его СЗ.

Существующие подходы

Начнем с краткого обзора существующих методов формализации и оценивания СЗ и анализа возможности их применения к тренингу операторов ТП.

СЗ — особый тип знания, представляющий собой когнитивную² структуру, систему отношений между понятиями в памяти человека. СЗ является связующим звеном между декларативным (знание о том, *что*) и процедуральным (знание о том, *как*) типами знания. Во многих работах на исследуемую тему используется схожий термин «концептуальная модель» (КМ) объекта управления, который, в свою очередь, означает совокупность представлений об изучаемом или управляемом объекте. СЗ включает понимание принципов организации объекта, от чего напрямую зависит то, как человек справится с поставленной за-

¹ Перенос — влияние навыков, усвоенных при выполнении действий одного вида, на овладение другим действием. Если уже имеющиеся навыки помогают приобретению новых, перенос называют положительным. В данном случае рассматривается перенос навыков, приобретенных в компьютерном тренинге, на реальную практику операторов технологических процессов.

² Когнитивный — относящийся к познанию. Когнитивные процессы человеческой психики включают память, внимание, представление информации, логическое мышление, воображение и пр.

Извлечение	Обработка и оценка	Обратная связь
– Словесные ассоциации (СА)	Пространственные	– Система Process Simulator
– (СА) с измерением времени	– Многомерное шкалирование	– Сравнение с экспертом
– Парные сравнения	– Факторный анализ	
– Целевой метод	Дискретные	
	– Иерархическая кластеризация	
	– Аддитивная кластеризация	
	Сетевые	
	– Метод Порядкового Шкалирования	
	– Метод PathFinder	

Рис. 1. Методы оценивания структурного знания

дачей. В то же время КМ является «прикладным» инструментом операторской деятельности, сочетая как знания о самом объекте и понимание его внутренних связей, так и «рецепты» поведения, необходимые для решения текущей задачи (так называемые оперативные КМ [3]). С учетом сказанного в дальнейшем будем оперировать понятием СЗ.

Для оценивания СЗ его нужно предварительно извлечь из памяти оператора. Сегодня способов извлечения СЗ напрямую не существует; можно получить только косвенные данные о нем, которые необходимо обработать и представить в виде, удобном для дальнейшей интерпретации и оценки. Наконец, на основе полученной оценки можно корректировать процесс тренинга, повышая его эффективность. Таким образом, процесс оценивания и использования СЗ может быть разбит на следующие этапы.

1. Извлечение «сырых» данных об организации СЗ.
2. Обработка и оценка извлеченных данных.
3. Получение обратной связи в процессе тренинга на основе оценки СЗ.

Остановимся подробнее на каждом из этих этапов, проанотируем существующие подходы к их реализации. Общая карта методов оценивания СЗ представлена на рис. 1.

Этап 1. Извлечение данных

Одним из популярных методов извлечения данных о СЗ является метод словесных ассоциаций, предложенный еще К. Юнгом и используемый в различных вариациях по сей день. Испытуемый должен генерировать слова-ассоциации к слову-стимулу. Ассоциации нужно называть мгновенно, не задумываясь. В итоге образуется цепочка слов определенного объема. Чем больше ассоциаций производит испытуемый, тем больше он знает об объекте, то есть тем богаче и полнее его СЗ о нем.

В. Meyer в своей работе «The Effects of Computer-elicited Structural and Group Knowledge on Complex Problem Solving» предложил вариацию метода словесных ассоциаций, в которой механизм извлечения информации об органи-

зации СЗ из полученных ассоциаций дополняется измерением временных промежутков между называемыми словами-ассоциациями. В этом методе слова-ассоциации располагают на временной оси в том порядке, в котором их озвучил испытуемый. Предполагается, что чем меньше испытуемый задумывается над следующей ассоциацией (а, значит, чем ближе они расположены на оси), тем ближе друг к другу они в его СЗ. В результате образуется некая последовательность групп близких друг другу слов-ассоциаций, представляющая собой упрощенную одномерную визуализацию СЗ.

Другой известный метод извлечения данных о знании — сортировка карточек [4]. Испытуемым раздают несколько карточек с указанными на них понятиями и иногда их краткими определениями. Карточки нужно распределить по группам похожести и дать им названия. Получающиеся группы образуют некоторую кластерную структуру, отражающую организацию СЗ.

Три описанных метода (словесных ассоциаций, словесных ассоциаций с измерением времени и сортировка карточек) полезны для определения самостоятельных структурных единиц (последовательные кластеры-цепочки в методе словесных ассоциаций или кластеры в методе сортировки карточек). Однако они не работают в задаче определения силы и направления отношений между полученными структурными единицами³.

Метод парных сравнений (субъективного шкалирования) является, вероятно, самым широко применяемым методом извлечения данных о СЗ. Перед испытуемым ставится задача парно оценить связность предложенных значений по некоторой градуальной шкале. Например, R. Schvaneveldt использует десятибалльную шкалу [6], А.А. Обознов — шестибалльную [7], а В.Ф. Петренко [8] — четырехбалльную шкалу. Вместо связности может использоваться несвязность, похожесть, непохожесть, близость или влияние, словом, любая характеристика отношений двух понятий. В дальнейшем для удобства будем везде говорить о связности. На выходе процедуры парного сравнения получается матрица, несимметричная в случае направленных отношений между понятиями (например, влияния) и симметричная в противном случае (связность, похожесть). Каждая ячейка матрицы — оценка силы связи между соответствующими терминами (понятиями) в столбце и в строке. Как правило, субъективное шкалирование сопровождается последующей математической обработкой данных инструментами многомерного шкалирования или факторного анализа. В терминологии В.Ф. Петренко [8], все понятия, которые имеют значение для испытуемого, существуют только в некоторой системе зна-

³ Отметим, что метод словесных ассоциаций (наравне с методом репертуарных решеток [5]) может быть использован для генерации списка понятий, который впоследствии формирует матрицу субъективного сходства в Методе парных сравнений.

чений и раскрываются только через эту систему. Следовательно, метод оценивания СЗ должен позволять находить понятия, семантически связанные с заданным. Именно поэтому метод субъективного шкалирования фиксирует указанные связи в виде матрицы семантических расстояний.

Следует отметить удачное преодоление проблемы заполнения матрицы большой размерности, которое может требовать несоизмерных времени и усилий. В работе С. Tossell “The Influence of Rating Method on Knowledge Structures” вместо попарного сравнения параметров предлагается использовать альтернативный — целевой подход. На каждом следующем шаге один термин (целевой) помещается в центр концентрических кругов. Все остальные термины располагаются с левой стороны на экране компьютера. В зависимости от того, насколько оцениваемый термин связан с целевым, испытуемый должен поместить его в соответствующий концентрический круг (рис. 2), при высокой степени связности — в центральный, при низкой — во внешний. Всего таких кругов четыре: для случая, когда сравниваемые понятия синонимичны, очень сильно связаны, просто сильно связаны или средне связаны. При этом низкие степени связности (ниже среднего) не учитываются. Это позволяет сосредоточиться на действительно важных в понимании испытуемого связях между понятиями.

Изложенные методы с успехом решают задачу извлечения сырых данных о СЗ, и все они могли бы быть использованы в применении к операторам ТП. Однако наиболее распространенным способом сбора данных о СЗ является метод попарных сравнений (метод субъективного шкалирования). Именно он был использован для извлечения данных о СЗ операторов ТП.

Обратимся теперь к способам обработки и оценки данных о связности, полученных на первом этапе.

Этап 2. Обработка и оценка извлеченных данных

Задача второго этапа оценивания СЗ состоит в обработке и оценке исходных данных с целью эксплицировать существующую в них организацию. Первая группа методов, используемых для этой цели, — пространственные. Главным образом, это метод многомерного шкалирования (МШ) и его вариации. Исходя из матрицы попарных сравнений, реконструируется такое геометрическое пространство, размерность которого равна размерности матрицы попарных сравнений, а точкам-понятиям соответствуют вектор-строки матрицы. Затем размерность исходного пространства понижается (при сохранении отношения расстояний между точками-понятиями) до тех пор, пока система организации СЗ буквально не визуализируется, как правило, до двух или трех измерений. Полученную визуализацию можно оценить «глазами», определить, выделяются ли в ней осмысленные оси координат, описывающие закономерности в расположении точек в пространстве. Математически процедура МШ заключается в определении проекций точек на коор-



Рис. 2. Процесс оценки понятий в целевом подходе (на примере эксперимента со студентами Академии ВВС США в работе С. Tossell “The Influence of Rating Method on Knowledge Structures”)

динатные оси и минимизацию разницы в положениях точек относительно друг друга в результате каждого понижения размерности.

Оценка полученных на выходе метода МШ визуальных представлений СЗ происходит путем выделения значимых координатных осей в конечном пространстве и их интерпретации. Как только оси найдены и интерпретированы, можно сравнивать их смысл и расположение на них элементов у различных участников эксперимента [7, 8].

МШ пользуется популярностью в различных областях исследований от лингвистики до программирования. Однако наибольшее признание метод заслужил у психологов, поскольку хорошо подходит для визуализации СЗ. Например, В. Ф. Петренко в своих работах [8] с успехом применяет МШ для построения семантических пространств сознания, а А. А. Обознов [7] — для исследования организации концептуальных моделей операторов человеко-машинных комплексов.

Однако в ряде случаев предположение о непрерывности характеристик, лежащее в основе суждений о близости, может оказаться неадекватным. Кроме того, присутствует определенная некорректность в задаче понижения размерности пространства, возможны искажения во взаимном расположении точек пониженного пространства по сравнению с первоначальным, многомерным. В таком случае естественно использовать дискретные или теоретико-множественные способы выявления организации знания. Эта группа способов включает методы иерархической [9] или аддитивной [10] кластеризации.

Иерархический кластерный анализ позволяет представить СЗ в виде набора иерархически вложенных групп, которые относятся к некоторым значимым категориям. Наиболее распространен агломеративный

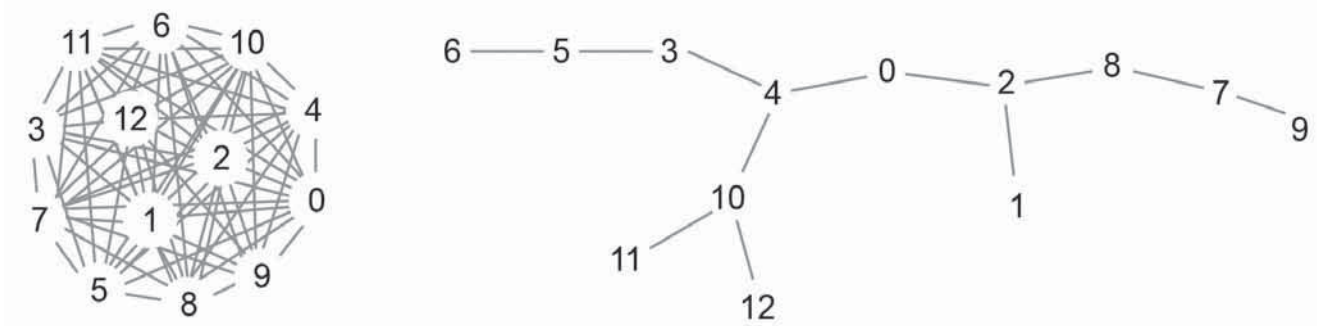


Рис. 3. Графы различных плотностей — результат обработки алгоритмом PathFinder

алгоритм иерархической кластеризации. На первом шаге каждый объект рассматривается как тривиальный кластер. Затем находится пара наиболее близких объектов, эти объекты объединяются и рассматриваются в дальнейшем как новый объект. Вычисляются расстояния между новым объектом и всеми остальными объектами. Процедура повторяется до тех пор, пока все объекты не будут объединены в один кластер.

Необходимо учитывать, что разные алгоритмы иерархической кластеризации используют разные функции расстояния между кластером и объектом. Использование разных функций расстояния приводит к разным результатам кластеризации, что является ключевой проблемой использования метода.

R. Shepard, P. Arabie [10] предложили алгоритм аддитивной кластеризации, где сходство между двумя объектами определяется как сумма весов их общих признаков. Идея этого алгоритма заключается в поиске всех возможных подмножеств объектов с последующей оценкой их весов и отбрасыванием тех подмножеств, веса которых ниже некоторого порогового значения. Однако аддитивная кластеризация не накладывает ограничений на моделируемое представление, что приводит к тому, что из одной и той же матрицы близости может быть получено несколько эквивалентных решений.

Полученные в результате применения дискретных методов кластерные представления оценивают как сами по себе, исследуя вложенность групп, так и в сравнении с другими кластерами.

Сетевые методы позволяют моделировать данные о близости с помощью графов. Как известно, любая матрица близости может быть описана с помощью полного графа (то есть такого, в котором каждая пара вершин соединена ребром). Узлы такого графа представляют собой понятия, а ребра — связи между ними. Главная задача сетевых методов — построение наиболее простого графа, наилучшим образом описывающего исходные данные.

В исследованиях M. Friendly “In Search of the M-Gram: The Structure of Organization in Free Recall” используется метод сравнения силы связи между понятиями с некоторым пороговым значением. При таком подходе в получившемся упрощенном графе связанными оказываются только наиболее близкие

понятия. Такой метод является по сути грубой «настройкой» точности проявления организации знаний.

Следует упомянуть работы Н. Feger “Network unfolding”, предложившего метод Порядкового сетевого шкалирования (Ordinal Network Scaling). Цель метода — понизить число ребер в графе. Для этого две или более смежных связей в графе заменяются на одну по правилу $AC = AB + BC$ (где A, B и C — суть вершины некоторого графа).

Однако основной корпус исследований, посвященных сетевым методам представления СЗ, принадлежит группе R. Schvaneveldt и относится к предложенному им методу PathFinder [6]. Входными данными для этого метода служит матрица попарных сравнений. Тип связей в конечном графе зависит от характера взаимоотношений между сравниваемыми понятиями: для данных о сходстве граф получается ненаправленным, а для данных о влиянии — направленным.

Принцип работы алгоритма PathFinder заключается в том, что для построения графа метод выбирает только те связи между узлами-понятиями, которые являются кратчайшими путями в графе. В теории графов путь — это последовательность смежных вершин (то есть последовательность вершин, имеющая для каждой вершины связь, соединяющую ее со следующей вершиной). Алгоритм ищет в графе-сети пути минимальной длины, то есть кратчайший транзитивный переход от одного понятия к другому.

Для регулирования плотности графа, а также состава связей в нем алгоритм PathFinder использует два параметра, r и q . Параметр r определяет, каким образом вес пути вычисляется из весов ребер в этом пути. Он может быть интерпретирован как параметр покомпонентного веса. При $r=1$ все компоненты (ребра в сети) вносят одинаковый вклад в определение суммарного веса пути. С возрастанием r компоненты с большей величиной начинают вносить больший вклад так, что при $r \rightarrow \infty$ самая «тяжелая» компонента пути определяет его суммарный вес. Параметр q определяет плотность конечного графа. Если плотность связей слишком высока, то такой граф непригоден для интерпретации, неинформативен. Например, на рис. 3 показаны графы одинаковых исходных данных, слева — с максимальной возможной плотностью (каждая вершина соединена

с каждой), справа — разреженный. При $q = 1$ конечный граф в точности соответствует исходной сети, которая получается при соединении друг с другом всех хоть как-то связанных понятий. С возрастанием значения q , плотность сети уменьшается.

Оценку полученных представлений СЗ можно проводить, исследуя различные параметры графа, например, число вершин, диаметр или взвешенную плотность. Согласно работе D. Burkolter “Training in process control: Supporting performance in consideration of operator characteristics”, каждая из этих характеристик косвенно свидетельствует о СЗ: так, высокая взвешенная плотность графа наблюдается у больших профессионалов, а большое число вершин может свидетельствовать о более полном составе знаний. Кроме того, графы можно сравнивать по «похожести», например, с экспертным, вычисляя число одинаковых для обоих графов вершин [6].

Подводя итог, отметим, что область исследования различных способов обработки и представления данных с целью визуализировать СЗ является достаточно разработанной. Существуют отдельные школы и группы сторонников того или иного метода обработки. Однако крайне мало трудов посвящено исследованию СЗ собственно операторов ТП. Можно упомянуть работу [7], которая направлена на исследование СЗ операторов атомных станций в «статике» и не рассматривают ее изменения во времени под воздействием тренинга.

Этап 3. Формирование обратной связи в процессе тренинга

На сегодняшний день наиболее распространен традиционный подход к оцениванию операторов, основанный на непосредственном суждении инструктора обучения. Однако, как всякие суждения, они субъективны, а для оценки операторов необходимый надежный, объективный инструмент, измерения которого можно повторить, а сама процедура оценивания может быть автоматизирована. Кроме того, для достижения качественных результатов обучения необходимо уметь оценивать происходящие в процессе тренинга изменения и, исходя из их динамики, соответствующим образом корректировать программу обучения.

Примером такого подхода может служить автоматизированный метод оценки, разработанной группой S. Nazir “Minimizing the Risk in the Process Industry by Using a Plant Simulator: a Novel Approach”. Алгоритм, названный Process Simulator, интегрирован в компьютерный тренажер и способен оценивать успешность операторской деятельности в режиме реального времени. Привычный КТ дополнен виртуальной средой погружения, что позволяет воспроизвести работу оператора в реалистичных заводских условиях, включая изменения в технологических узлах и оборудовании, которые приводят к возникновению аварийных ситуаций (например, утечка газа может вызвать по-

жар на установке). Указанные изменения имитируются в КТ и отражаются в операторском интерфейсе, выполненном в технологии виртуальной реальности.

Авторы упомянутой работы разработали специальные упражнения на устранение аварийных ситуаций. Для каждого сценария определяются ключевые показатели эффективности. На каждом шаге выполнения упражнения алгоритм автоматически оценивает действия обучаемого исходя из того, каких показателей он достиг в устранении аварийной ситуации. Например, если при стремительном росте давления в трубопроводе обучаемый не открыл клапан сброса давления, системой начисляются штрафные очки и т.п. Таким образом, по ходу упражнения можно оценить, насколько эффективно обучаемый справляется с задачей.

Очевидным плюсом описанного способа является то, что оценивание происходит в режиме реального времени по ходу выполнения упражнения, что помогает инструктору корректировать тренинг на основе «проблемных мест», выявленных системой в режиме on-line, а не только в конце обрабатываемого сценария. Кроме того, процедура оценивания позволяет регистрировать, хранить и анализировать действия обучаемых в любой момент в течение тренинга.

Более простое в реализации решение предлагается в работе [11], где предусмотрено вовлечение самих обучаемых в процесс формирования обратной связи по итогам тренинга. В своих экспериментах авторы предлагают студентам дополнительные упражнения и примеры, направленные на изучение именно тех сегментов изучаемой системы, оценки которых отличаются от экспертных. Кроме того, существует вариация данного подхода, в которой обучаемых просят самостоятельно придумать ситуации и примеры использования элементов системы, понимаемых ими отлично от эксперта. Такой подход подразумевает большую степень мотивированности обучаемых, позволяет им глубже анализировать совершенные по ходу тренинга ошибки.

Без сомнения, исследователям удалось достичь определенных успехов в построении автоматизированных систем оценивания тренинга операторов. Появилась автоматизация процесса оценивания и возможность корректировать тренинг по ходу обучения. Однако успешность тренинга по-прежнему оценивается по косвенным признакам, а именно, по результатам выполнения упражнений. В подходе, предлагаемом в данной работе, для оценивания тренинга используется СЗ, выявленное с помощью специально разработанных методов.

Специфика работы операторов ТП

Описанные выше методы предназначены для вовлечения, представления (визуализации) и отчасти оценивания СЗ. Известны попытки их применения к различным предметным областям: лингвистике, программированию, биологии, авиации (подроб-

нее в работе R. Schvaneveldt “Pathfinder Associative Networks: Studies in Knowledge Organization”) и атомной энергетике [7]. Однако специфика работы операторов производств химико-технологического типа требует отдельного подхода к оцениванию их СЗ, которое становится нетривиальной задачей.

Химико-технологические процессы крайне сложно устроены и содержат множество динамически меняющихся параметров. Такие ТП управляются посредством сложных человеко-машинных интерфейсов, связывающих оператора с системами автоматизации. При этом ему приходится полагаться на значения огромного числа взаимосвязанных переменных, на которые он не может повлиять по отдельности, не затронув при этом другие переменные. Разветвленные цепочки причинно-следственных связей вызывают неочевидные и трудно прогнозируемые последствия вмешательств оператора, проявляющиеся не сразу.

Другая особенность операторской деятельности — необходимость работать не только в нормальных, но и в аварийных режимах; причем эти режимы требуют от оператора задействования различных когнитивных механизмов. Например, в нормальном режиме операторам ТП требуются навыки, связанные с развертыванием сосредоточенного, разделенного, пространственного и выборочного внимания. В идеале оператор должен одинаково внимательно следить за всеми элементами системы в каждый момент времени, что, разумеется, недостижимо. Следовательно, оператор должен уметь определять приоритеты и стратегии распределения внимания. В аварийных режимах оператор сталкивается с непрогнозируемыми событиями, незнакомыми условиями работы, потоком тревожных и аварийных сигнализаций, которые должны быть восприняты и обработаны в короткие сроки, в условиях стресса и повышенной психологической нагрузки. Как только аварийная ситуация возникла, и проблема, требующая решения, формализовалась, оператор должен быстро перепланировать свои действия. Очевидно, что для эффективного и своевременного решения проблем оператору необходимо универсальное представление о ТП, то есть — СЗ.

Еще одна сложность управления ТП — недоступность собственно объекта управления. По соображениям безопасности оператор ТП фактически удален от контролируемой им установки и вынужден полагаться исключительно на инструментальную информацию, то есть на показания многочисленных датчиков. Это принципиально отличает их, например, от пилотов воздушных судов, которые могут физически ощущать отклики объекта управления. При этом переменные контролируемого процесса могут реагировать на операторские воздействия с существенным запаздыванием. Эти особенности вынуждают оператора принимать решения исходя из своих представлений о том, как должен вести себя процесс в той или иной технологической ситуации, что превращает СЗ в ключевой фактор принятия решений.

Помимо прочего, управление ТП всегда является коллективным процессом, а значит, требует слаженной командной работы для достижения производственных целей. Отдельной интересной задачей является исследование взаимодействия членов команды и его влияния на СЗ отдельных операторов. Однако к этой задаче нельзя подойти без понимания того, как устроено и как формируется СЗ отдельного оператора.

Перечисленные особенности и тот факт, что изучение изменений, происходящих с оператором по мере его профессионализации, требуют масштабных, лонгитюдных исследований, иногда длящихся десятилетиями [12], приводят к необходимости разработки специальных методов оценки СЗ, учитывающих специфику операторской деятельности.

Кластерная мера сравнения СЗ

Разработанный подход [13] включает идеи методов иерархической кластеризации и частично многомерного шкалирования. Вычисляется особый параметр — кластерная мера, характеризующая СЗ обучаемого. Поскольку невозможно достоверно утверждать, какое СЗ «хорошее» и «правильное», а какое — нет, кластерная мера обучаемого затем сравнивается с некоторым референтным значением, мерой, например, инструктора обучения.

Предлагаемый подход принадлежит к классу пространственных методов извлечения СЗ, основанных на предположении, что матрица связности, которую получают из попарных оценок степени взаимосвязи параметров изучаемого объекта, может быть представлена в виде некоторой фигуры в многомерном пространстве. Вектор-строкам матрицы попарных сравнений (и столбцам, если матрица симметрична) соответствуют точки в n -мерном пространстве, где n равно числу оцениваемых параметров. Предлагается, что группы близких вершин (кластеры) могут характеризовать СЗ. Их плотность, число, пространственное расположение служат его характеристиками. Как было сказано ранее, для оценки СЗ обучаемого важно уметь сравнивать его кластерное представление с референтным, например, инструктора обучения. Для этого оценивается, насколько поэлементный состав таких кластеров похож на состав кластеров эксперта.

Обозначим A_1, A_2, \dots, A_{m_A} — кластеры матрицы обучаемого и B_1, B_2, \dots, B_{m_B} — эксперта, здесь m_A и m_B — число кластеров матриц. Тогда доля общих элементов

$$A_i \text{ и } B_j \text{ относительно множества } A_i \text{ равна } \frac{n(A_i \cap B_j)}{n(A_i)}.$$

Для количественного выражения степени распределенности элементов из A_i и B_j естественно использовать функцию энтропийного типа, поэтому на выходе получим меру сходства кластерных составов:

$$f_{B \subset A} = \sum_{i=1}^{m_A} \sum_{j=1}^{m_B} \frac{n(A_i \cap B_j)}{n(B_j)} \log_{10} \frac{n(A_i \cap B_j)}{n(B_j)}.$$

Эта функция равна нулю при полном совпадении кластерных составов и возрастает с нарастанием отличий. Полученная таким образом мера, характеризующая взаимное сходство кластерных составов обучаемого и эксперта (мера кластерного сходства), используется для исследования динамики представлений об изучаемом объекте.

Для проверки фиксирует ли новая мера изменения в СЗ, происходящие в процессе обучения, был проведен пилотный эксперимент, в котором приняла участие 17 студентов РГУНГ им. Губкина последнего года обучения. Эксперимент проводился в два этапа, по 4 академических часа каждый, с перерывом в 2 недели. На первом занятии студенты изучали устройство и функционирование типовой технологической установки атмосферной перегонки нефти и ее работу в нормальном режиме, на втором — отработывали процедуры пуска и останова системы. В конце каждого занятия испытуемые заполняли матрицу попарного влияния характеристик ТП атмосферной перегонки. Матрица содержала 13 основных параметров процесса (расход сырой нефти из парка, температура сырья и др.). Оценка проводилась по 7-балльной шкале от 0 (влияние отсутствует) до 6 (влияние очень сильное).

Анализ динамики организации СЗ по новой мере показал статистическую достоверность положительного среднего сдвига значений меры на уровне 0,05 (табл. 1).

Это значит, что по ходу тренинга СЗ обучаемых по своему кластерному составу приближались к экспертному, что позволяет говорить о принципиальной пригодности кластерного подхода к оцениванию изменений СЗ по ходу тренинга.

Фокусируясь на специфике операторской деятельности, предлагаемый способ оценивания СЗ оператора, тем не менее, работает в рамках существующих подходов к изучению СЗ: на этапе извлечения данных используется метод субъективного шкалирования, для обработки и представления данных разработан кластерный подход, который, в свою очередь, базируется на методе иерархической кластеризации.

Табл. 1. Значения меры кластерного сходства

Студент №	Ср. балл	Мера кластерного сходства, %	
		1 день	2 день
1	4,89	50	80
2	3,67	38	34
3	4,67	42	17
4	4,11	59	79
5	4,89	62	59
6	4,11	36	42
7	3,33	61	79
8	4,78	65	78
9	5	47	62
10	4,89	26	28
11	3,89	13	29
12	5	66	79
13	4,78	31	25
14	3,89	40	40
15	3,33	41	78
16	5	39	44
17	4,11	39	29
В среднем	4	44	52
СКО	1	15	23

Схема обучения операторов ТП с обратной связью

Одной из главных проблем организации тренинга операторов ТП является невозможность обеспечить объективную обратную связь по результатам обучения. Сегодня за оценку этих результатов несет ответственность инструктор, хотя имеющийся в его руках инструментальный оценивания прогресса обучаемого достаточно беден. Зачастую оно проводится интуитивно; автоматизированных и, что наиболее важно, надежных способов оценки крайне мало.

Исследования показывают [6, 7, 13], что СЗ может служить индикатором профессионализма обучаемого. Значит, чем «лучше» СЗ, тем качественнее подготовлен оператор. Следовательно, опираясь на объективно достигнутый уровень СЗ, можно модифицировать текущий процесс тренинга операторов ТП, согласно нижеприведенной схеме (рис. 4).

В модифицированной схеме обучения в качестве объекта управления выступает собственно тренинг, понимаемый как совокупность средств формирования базовых операторских навыков: навыка ориентирования и распознавания отклонений, навыка прогнозирования последствий воздействий, навыка поиска причин неисправностей и прочих [1]. В общем случае инструментом тренинга может выступать не только КТ, но и любые автоматизированные системы обучения операторов, включая электронные учебники.

По результатам тренинга у оператора складывается, модифицируется и укрепляется СЗ об объекте, которое подвергается извлечению и обработке с помощью подходов, описанных выше (МШ, различные методы кластеризации, PathFinder, др.). Полученная репрезентация СЗ (численная или графическая) сравнивается с экспертной. В качестве экспертного можно использовать как СЗ инструктора обучения, так и некоторое усредненное СЗ признанных профессионалов, хорошо знакомых с ТП, например, опытных операторов. Далее информация о различиях СЗ обучаемого и эксперта поступает в блок, который генерирует специальные упражнения, нацеленные на дополнительную проработку элементов СЗ обучаемого, наиболее сильно отличающихся от экспертных.

Очевидно, что предложенная схема представляет собой классический контур управления с обратной связью, в котором блок формирования упражнений служит регулятором, а тренинг (или СЗ оператора) — объектом управления.

В настоящей работе основное внимание в предлагаемой схеме уделяется блоку извлечения и обработки данных о СЗ, однако серьезной задачей будущих исследований является конструирование регулятора (блока специальных упражнений). Видятся два возможных подхода к решению задачи автоматизированной трансформации программы тренинга. Первый направлен на точечный поиск пропущенных или лишних (в сравнении с экспертом) связей в графах PathFinder, а также поэлементное сравнение составов кластеров обучаемого и эксперта в простран-

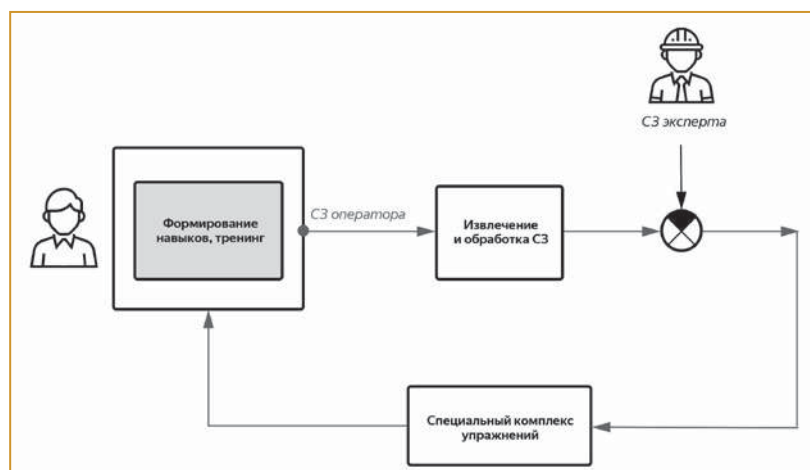


Рис. 4. Схема обучения операторов ТП с обратной связью по результатам тренинга

ственных представлениях СЗ. Последующий подбор тренировочных упражнений в этом подходе нацелен на укрепление верного понимания конкретных причинно-следственных зависимостей между элементами изучаемой системы. Другой подход может состоять в формировании программы тренинга исходя из типологических различий в репрезентациях СЗ обучаемого и эксперта. Сравнению при этом подлежат различные характеристики графов PathFinder (плотность связей, линейность, наличие циклов) и пространственных структур (число кластеров, плотность, диаметр), а упражнения нацелены на формирование у обучаемого «правильной» репрезентации.

Заключение

Компьютерный тренинг операторов прочно вошел в практику подготовки персонала предприятий химико-технологического типа. Увеличивающаяся сложность процессов ТП и систем управления ими повышают цену возможных негативных последствий некачественного управления и требуют совершенствования методов подготовки операторов. Системы КТ служат признанным эффективным инструментом подготовки операторов, но механизм объективного измерения влияния тренинга на работу операторов до сих пор не найден, хотя состоятельная обратная связь от КТ, позволяющая отслеживать изменения, претерпеваемые оператором по ходу обучения, крайне необходима как для понимания объективного уровня его компетенций, так и для корректировки содержания тренинга.

СЗ служит тем самым индикатором профессиональной компетентности оператора, обеспечивая поиск «слабых» элементов причинно-следственных связей (недостающих или неверно оцененных по силе связей), помогая оценить текущий уровень оператора.

Предложенная в работе кластерная мера оценки СЗ дает возможность сравнивать различные представления

СЗ по критерию схожести. Благодаря этому может быть прослежена эволюция операторского СЗ в процессе обучения путем сравнения его в различные моменты с экспертным «эталонным» СЗ.

Предложенный подход к оцениванию СЗ представляет собой первую попытку решения поставленной задачи. Среди задач будущего исследования — проверка применяемых инструментов кластеризации, верификация процедуры сравнения кластеров обучаемого с экспертными, валидация разработанного подхода в полномасштабных экспериментах с операторами ТП, и, главное, создание автоматизированных инструментов коррекции содержания будущего тренинга по обратной связи от его реальных результатов.

Список литературы

1. Дозорцев В.М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов. М.: Синтег. 2009.
2. Дозорцев В.М. Насколько полезны компьютерные тренажеры для обучения операторов? // Автоматизация в промышленности. 2016. №7. С. 7-13.
3. Ошанин Д.А. Предметное действие и оперативный образ. М.: МОДЭК. 1999.
4. Hirshman E., Wallendorf M. Free-response and card-sort techniques for assessing cognitive content: Two studies concerning their stability, validity and utility // Perceptual and Motor Skills. 1982. Vol. 54. Pp. 1095-1110.
5. Kelly G. Психология личности. Теория личных конструктов. СПб.: Речь. 2000.
6. Schvaneveldt R. PathFinder Associative Networks: Studies in Knowledge Organization. New-Jersey: ALEX Publishing Corporation. 1990.
7. Обознов А.А., Чернецкая Е.Д., Бессонова Ю.В. Концептуальные модели атомной станции у операторов с различным стажем // Психологический журнал. 2013. Т. 34. №4. С. 47-57.
8. Петренко В.Ф. Основы психосемантики, СПб.: Питер. 2005.
9. Johnson S. Hierarchical Clustering Schemes // Psychometrika. 1967. Vol. 32. Pp. 241-254.
10. R. Shepard, P. Arabie. Additive clustering: Representation of similarities as combinations of discrete overlapping properties // Psychological Review 1982. Vol.86. Pp. 87-123.
11. Goldsmith T., Trumpower D., Sharara H. Specificity of Structural Assessment Knowledge // The Journal of Technology, Learning and Assessment. 2010. Vol. 8. Pp. 1-31.
12. Волкова Е.В. Формирование когнитивных репрезентативных структур в процессе изучения химии в школе // Вопросы психологии. 2006. №2. С. 37-49.
13. 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.13-19.

Миронова Анастасия Сергеевна – дизайнер продукта ООО «Яндексе»
 Контактный телефон +7 (903) 967-76-47.
 E-mail: mironova@phystech.edu