

О ПРИМЕНЕНИИ «НЕЧЕТКОЙ» МАТЕМАТИКИ В ИНЖЕНЕРНОЙ ПСИХОЛОГИИ

Тарасов В. Б., Чернышев А. П.

Современное развитие психологии характеризуется возрастанием роли междисциплинарных связей, среди которых особое место занимает взаимодействие психологии и математики. Назревшую необходимость в новом формальном подходе к изучению сложных явлений в системах с участием человека отметил в своем докладе на советско-американском семинаре «Нормативные и дескриптивные модели принятия решения» (Тбилиси, 1979) Б. Ф. Ломов, сказав, что в настоящее время психология стоит на пути нового этапа развития — этапа создания специализированного математического аппарата для описания психических явлений и связанного с ними поведения. Одно из возможных оснований для разработки ориентированного на инженерную психологию математического аппарата — теория нечетких множеств и тесно связанный с ней лингвистический подход.

В 1965 г. Л. А. Заде (L. A. Zadeh) опубликовал [57] первую статью, посвященную так называемым нечетким множествам (fuzzy sets), в которых переход от принадлежности элемента множеству к непринадлежности происходит не скачком, как в случае обычных канторовских множеств, а плавно, постепенно. Иными словами, может существовать бесчисленное множество степеней принадлежности, промежуточных между полной принадлежностью и непринадлежностью объекта классу. За прошедшие с тех пор 16 лет сформировалась весьма стройная теория нечетких множеств, на основе которой строится аппарат «нечеткой» математики: нечеткая логика, нечеткая топология, нечеткое математическое программирование, теория нечетких вероятностей, нечеткие игры, нечеткий кластерный анализ, теория нечетких систем и т. д. Можно говорить об общем «нечетком» подходе к описанию сложных процессов и систем там, где отсутствие строгих критериев принадлежности, неполнота и неадекватность располагаемой информации о системе приводят к нечеткости используемых понятий и представлений. Этот подход, выступающий в качестве своеобразного симбиоза количественных и качественных методов, представляется многообещающим при описании функционирования систем с человеком.

Рассмотрим особенности системы «человек — машина», вызванные присутствием в ней человека. С одной стороны, выполнение любой задачи, стоящей перед конкретной системой «человек — машина», возможно только через предметную деятельность субъекта, поэтому он является определяющим фактором достижения всей системой некоторого полезного результата. Этот момент достаточно ясен и вряд ли требует комментариев. В то же время, когда мы переходим с результативного на функциональный уровень анализа системы «человек — машина», человек-оператор играет прямо противоположную роль (с точки зрения функционирования всей системы в целом).¹ Как справедливо указывает

¹ Здесь мы используем методологический принцип разделения процесса и результата как разных сторон единой системы психических явлений (см., например, [10, с. 11]).

В. Д. Шадриков, «любая система деятельности обычно выступает как нормативно-одобренный способ деятельности, т. е. обобщенный и закреплённый инструкциями способ деятельности, рассчитанный на абстрактного субъекта и усредненные условия» [32, с. 11]. Этому нормативному способу деятельности человека-оператора соответствует нормативное функционирование системы «человек — машина». Любой же реальный человек всегда осуществляет индивидуальный способ деятельности, «обусловленный индивидуально-своеобразным характером учета объективных и субъективных условий деятельности» [с. 12].

Таким образом, с точки зрения нормативного функционирования системы «человек — машина» человек вносит неопределенность в поведение системы в целом. Эта неопределенность существует объективно и в значительно большей мере зависит от человека, чем от характеристик машинной части системы.

Квинтэссенцию «человеческого фактора» очень хорошо выразил В. И. Ленин в «Философских тетрадах»: «Деятельность человека, составившего себе объективную картину мира, изменяет внешнюю действительность, уничтожает ее определенность (выделено нами.— В. Т., А. Ч.) и таким образом отнимает у нее черты кажимости, внешности и ничтожности, делает ее объективной истиной» [1, с. 209].

Такой диалектический подход к определению роли человека в системе «человек — машина» полностью согласуется с основным принципом современной психологии — принципом детерминизма, согласно которому внешние воздействия всегда опосредуются внутренними условиями. При этом детерминация отнюдь не сводится к однозначной причинности, предопределенности, а включает все многообразие самых различных явлений, самых различных взаимосвязей между объектами материального мира.

Так, например, рассмотрим сенсомоторную регуляцию деятельности типа компенсаторного слежения. Эксперименты, проведенные в Институте психологии АН СССР, показали, что дельта-ремнанта [29] имеет двойственную природу: с одной стороны, это ошибка системы «человек — машина», вносящая неопределенность в функционирование (и описание) системы по сравнению с нормативным, т. е. сугубо отрицательный фактор; с другой — дельта-ремнанта связана с гностическими движениями, т. е. носит информационный характер, является продуктом специфической активности оператора и необходима для успешного выполнения деятельности.

Таким образом, постановка задачи детерминации всей системы «человек — машина» за счет минимизации рассогласования между входом и выходом оператора оказывается некорректной. В общем случае следует искать довольно «размытую» область допустимого рассогласования.

Итак, мы пришли к выводу, что первостепенное значение при описании операторской деятельности в системе «человек — машина» имеет учет неопределенности, вводимой человеком-оператором в модель нормативного функционирования.

Обычно для описания неточно известных величин применяется математический аппарат теории вероятностей, теории случайных процессов, теории информации и т. п. Априори принимается допущение, что неопределенность можно выразить в форме случайности. Это предположение справедливо далеко не всегда. В качестве простейшей иллюстрации приведем следующее предложение: «К концу месяца с вероятностью 0,9 ежедневный выпуск продукции возрастет приблизительно на 3%». Здесь вероятность 0,9 содержит информацию о мере неопределенности, связанной с многократными наблюдениями за случайными колебаниями выпуска, а слово — сочетание «приблизительно на 3%» отражает неточность или расплывчатость суждения (оценки). Иными словами, если

вероятность, понимаемая в классическом смысле, имеет объективную основу хотя бы в виде накопленных данных статистики, то у истоков неопределенности, которую условно назовем «расплывчатостью»², лежат субъективные особенности восприятия и интерпретации.

Неопределенность вида расплывчатости возникает на всех уровнях операторской деятельности.

На сенсорно-перцептивном уровне или при решении основной задачи человека-оператора в сфере восприятия «спектр» значимой для него информации не имеет четких границ. Расплывчатость появляется как в силу объективных психофизиологических характеристик человека-оператора, например объем памяти и скорость обработки информации, способность к адаптации, подверженность усталости и стресс-факторам, так и (прежде всего) потому, что отношение «мотив — цель», являющееся «стержнем» любой деятельности, определяет субъективные критерии отбора и обработки информации о состоянии объекта управления и параметрах окружающей среды. Исследования Ю. М. Забродина и сотр. [10] выявили ряд эффектов, связанных с особыми изменениями метрики и топологии сенсорного пространства по сравнению с пространством внешних сигналов: размытость, склеенность соседних точек сенсорного пространства, деформация расстояния между ними, инверсия порядка и т. д. Возможная формальная интерпретация этих явлений — нечеткое соответствие между пространством сигналов и сенсорным пространством: $\psi: U \rightarrow \mathcal{F}(V)$, где U — пространство сигналов, а $\mathcal{F}(V) = \{\mu | \mu: V \rightarrow [0, 1]\}$ — класс нечетких подмножеств сенсорного пространства V . Иначе говоря, любому четкому сигналу $u \in U$ соответствует размытый образ (нечеткое подмножество) в V . В общем случае следует рассматривать отображение вида $\psi^*: \mathcal{P}(U) \rightarrow \mathcal{F}(\mathcal{P}(V))$, где $\mathcal{P}(U)$ — класс всех неразмытых подмножеств (последовательностей сигналов) множества U , а $\mathcal{F}(\mathcal{P}(V)) = \{\mu^* | \mu^*: \mathcal{P}(V) \rightarrow [0, 1]\}$ — семейство нечетких множеств уровня [52] сенсорного пространства. Введение $\mathcal{F}(\mathcal{P}(V))$ позволяет отразить динамику сенсорного пространства, в частности изменение его размерности при смене мотивов, адаптации и т. п. Расстояние между размытыми образами можно определять с помощью нечеткого отношения различия (нечеткой метрики) $d: V \times V \rightarrow [0, \infty]$, где $[0, \infty]$ — числовая ось.

Естественно, размытость образов в сенсорном пространстве только усугубится, если сам внешний сигнал противоречив, неоднозначен, полимодален. Такая ситуация типична для общения людей; поэтому при психологических исследованиях процессов коммуникации подобные формализованные представления могут быть особенно полезными.

Подобная картина наблюдается на сенсомоторном уровне, где, как уже отмечалось, отклонения от нормативных исполнительских действий, провоцирующие некоторую неопределенность поведения системы «человек — машина», обосновываются потребностями информационного обеспечения деятельности.

Наконец, на уровне представлений и речемыслительном, эта неопределенность особенно велика, так как здесь человек оперирует вторичными образами объектов, например образом-целью, который предвещает результат деятельности и тесно связан с прогнозированием. В. И. Ленин писал, что «мы не можем представить, выразить, изобразить

² Общим понятием «расплывчатость» авторы выражают те виды неопределенности, которые принципиально несводимы к случайности, не могут быть описанными на основе традиционного вероятностного подхода и моделируются с помощью fuzzy sets. Последний термин, введенный в научный обиход Заде, можно перевести на русский язык по-разному: как нечеткие, расплывчатые, размытые, нежесткие, небулярные множества и т. п. Не исключено, что по отношению к операторской деятельности более удачным окажется иной термин, нежели «нечеткость» или «расплывчатость» (ввиду негативного оттенка их обиходного употребления). Но существо дела при этом не изменится.

движения, не прервав непрерывного, не упростив, огрубив, не разделив, не омертвив живого. Изображение движения мыслью есть всегда огрубление, омертвление, — и не только мыслью, но и ощущением, и не только движения, но и всякого понятия» [2, с. 60]. В этих словах ярко выражены неполнота и приближенность отражения реальности, свойственные человеку.

В самом деле, в процессе формирования представлений происходит селекция признаков объекта: многие случайные признаки, зависящие от конкретных условий, отсеиваются, и в представлении фиксируются лишь те, которые являются наиболее устойчивыми и общими. Представлению как образу присуща обобщенность. Вместе с тем в нем выделяются те элементы объекта или ситуации, которые выступают как «опорные», благодаря чему происходит схематизация образа [6].

«Внутренние мыслительные процессы есть результат интериоризации и специфического преобразования внешней практической деятельности» [13, с. 95]. При таком переходе от «сенсомоторного плана к мысли» внешние по своей форме процессы обобщаются, вербализуются, сокращаются, трансформируются и, главное, становятся способными к дальнейшему развитию. Из этой цепочки особо выделим вербализацию, «проклятие отягощения «духа» материей в виде языка» [3, с. 29]. Любому естественному языку присущи «избыточность» и неоднозначность его элементов. Все это предопределяет размытость выходных характеристик любой реальной системы с участием человека.

Таким образом, расплывчатость в процессе восприятия информации и расплывчатость значения³, пронизывающая представленческий и речемыслительный уровни деятельности, в наиболее общем виде характеризуют неопределенность поведения человека-оператора в системе «человек—машина». Один из типичных примеров проявления сенсорной расплывчатости — ситуация принятия решения при дефиците времени в системе «летчик—самолет», когда пилот должен основываться на показаниях сразу нескольких устройств отображения информации и собственных ощущениях; при этом он видит не отдельные деления шкалы, а размытые интервалы и следит главным образом за тем, чтобы стрелка двигалась внутри допустимой зоны. Тем более принципиальные ограничения по точности характеризуют восприятие неинструментальных сигналов типа угловых ускорений, шумов, вибраций и т. д. [6]. Степень же нечеткости интерпретации сигнала обычно больше сенсорной расплывчатости и прямо зависит от характера концептуальной модели полета.

Неопределенность вида расплывчатости тесно связана с активностью человека-оператора в системе «человек—машина» [11]. Управляющий субъект, как правило, имеет свое отношение к цели функционирования системы «человек—машина». Его действия в системе всегда отличаются от действий гипотетического идеального оператора. Уровень активности оператора в системе «человек—машина» в разных ситуациях различный. В частности, активность человека-оператора на стенде-тренажере и в других случаях, когда реальный объект управления подменяется моделью, изменяется. Трансформация настоящей, жизненной цели действий в частную «игровую» цель (вместо объекта управления оператор имеет дело с указателями панели индикации) нередко приводит к снижению или даже исчезновению личной заинтересованности в качестве действий и «сознательному» введению неопределенности в поведение всей системы.

³ В формальной логике различаются «значение» — класс предметов, описываемых с помощью языка, и «смысл» — понятие для обозначения мысленного содержания знаков. В данном контексте термин «значение» употребляется широко — и как значение, и как смысл.

Уровень активности субъекта зависит, с одной стороны, от индивидуальных психических и психофизиологических свойств, степени подготовленности к работе в данной системе, а с другой — от уровня автоматизации системы. Эта зависимость очень сложна и неоднозначна. Бесспорно, однако, что специфика конкретной системы «человек—машина» определяет некоторую область оптимальной активности, и эта область имеет размытые границы.

Можно заключить, что такие основные психологические составляющие деятельности, как отношение «мотив—цель», образ-цель, оперативный образ, восприятие текущей информации, прогнозирование, принятие решения, программа действий и восприятие результата (обратная связь) по сути являются нечеткими категориями. Поэтому формализация операторской деятельности, необходимая для унифицированного описания компонентов системы «человек—машина», вряд ли возможна на основе лишь строгого языка классической математики, поскольку язык описания должен соответствовать уровню неопределенности описываемого объекта.

Сам факт существования неопределенности поведения системы «человек—машина» по отношению к ее нормативному функционированию, обусловленной главным образом индивидуальными психофизиологическими свойствами человека, введение понятия расплывчатости, характеризующего эту неопределенность, и анализ ее источников на различных уровнях регуляции деятельности позволяют предложить в качестве основы для общего подхода к формализации операторской деятельности теорию нечетких множеств.

Именно такие нечеткие классы играют ведущую роль в процессе мышления человека и лежат в основе коренного различия между человеческим разумом и так называемым машинным интеллектом. В самом деле, исследования Б. М. Теплова [28] и С. Л. Рубинштейна [24] показали, что основным звеном мышления является анализ через синтез, который заключается в том, что в процессе мышления объект «включается во все новые связи и в силу этого выступает во все новых качествах, фиксируемых в новых понятиях: из объекта, таким образом, как бы вычерпывается все новое содержание; он как бы поворачивается каждый раз другой своей стороной, в нем выявляются все новые свойства» [14, с. 249].

В качестве примера возьмем предписание водителю автомобиля проехать несколько километров, резко повернуть направо и затормозить около большого розового здания. Общая задача (достичь некоторого пункта) разбивается на подзадачи и формулируется весьма нечеткий алгоритм действий. Этот алгоритм оценивается и реализуется в контексте реальной обстановки управления (слежение за пешеходами и встречными автомобилями, учет возможных «пробок», запрещающих знаков, объездов и т. д.). Налицо анализ через синтез, хотя и в довольно упрощенном варианте. Поэтому моделирование действий водителя нечеткими программами [53] представляет собой важный шаг на пути создания устройств, способных эффективно выполнять не только исполнительские, но и отдельные «интеллектуальные» функции человека в системе «человек—машина», например роботов и манипуляторов, которые должны работать в агрессивных средах.⁴

Нечеткий подход в большей мере, чем традиционные методы точного количественного анализа, соответствует системной антропоцентрической концепции в инженерной психологии [16]. Важнейшей частью любой концепции инженерно-психологического проектирования является рассмотрение конкретных методов проектирования деятельности. Для системной антропоцентрической концепции характерно широкое привле-

⁴ Пример программы нечеткого планирования передвижения робота см. в [55].

чение к исследованию систем «человек—машина» методов моделирования, в особенности математического, и связанных с ними понятий [23]. При этом необходима разработка единого подхода и единого языка описания всей системы. Нечеткий же подход с характерным для него применением лингвистических переменных, в качестве значений которых наряду с числами допускаются слова и предложения естественного или искусственного языка, выступает именно как подход «сверху», от человека, учитывающий его неотъемлемые свойства: оперирование развитой понятийной структурой, активность, целенаправленность, адаптивность и т. д. Нечеткая математика дает возможность моделировать характеристики человека как действительного субъекта труда в их многообразии и взаимосвязанности; используя ее методы, мы проиграем в точности (чаще всего мнимой, как в случае идентификации функциональных характеристик человека с помощью обычной передаточной функции), но зато неизмеримо дальше продвинемся в понимании реального поведения систем «человек—машина».

Как указывает Б. Ф. Ломов, «сейчас наступает то время, когда в психологии созревают условия для действительной и последовательной реализации системного подхода» [17, с. 4]. При этом важная роль принадлежит систематизации и интеграции данных, накопленных в различных областях психологии, выявлению связей между ними и пограничными науками, в первую очередь физиологией и кибернетикой. Хорошим примером здесь может служить проблема принятия решения, которая «развивается как междисциплинарная, и создаваемые в рамках этой проблемы модельные представления могут со временем стать основой для построения модели принятия решения человеком» [с. 7].

Принятие решения пронизывает всю деятельность человека, присутствуя на всех уровнях отражения и регуляции; поэтому моделирование процесса принятия решения является стержневым аспектом моделирования операторской деятельности.

Решение, как правило, принимается в условиях, когда цели не являются четко сформулированными, а полное число альтернатив, факторы окружающей ситуации, исходы и тем более законы их формирования точно неизвестны. Во всех случаях источник неопределенности состоит главным образом в отсутствии строго определенных критериев принадлежности объекта классу. Поэтому применение «нечеткого» подхода более оправдано, нежели методы статистического описания (типа байесовского) или слишком «переформализованный», по меткому замечанию Н. Н. Моисеева, аппарат классической теории игр и теории автоматов.

Процесс принятия решения многоэтапен. В настоящее время выделяют два основных этапа [21]: информационную подготовку решения (стадию предрешения, по П. К. Анохину [5]) и собственно процедуру принятия решения. В свою очередь каждый из этих этапов можно разбить на подэтапы и т. д. К примеру, на стадии предрешения происходит: а) целеобразование, б) формирование альтернатив, в) предварительная оценка альтернатив и пр.

Существенным свойством процесса принятия решения является то, что он предшествует действию и вообще разворачивается ради действия, ради практического результата. Принятие решения не существует как «вещь в себе», оно постоянно связывается с выполнением решения, с получением, по выражению П. К. Анохина, «континуума результатов». Именно соотнесение конкретного результата с образом-целью во многом определяет устойчивость системы принятия решения.

Таким образом, принятие решения можно классифицировать как важнейшую подзадачу более широкой задачи выполнения исходной цели, которой соответствует общая организация психологической системы деятельности [15, 32]. Здесь предлагается выделить следующие подсистемы (или блоки задачи) выполнения исходной цели, причем модели-

рование каждой из них подразумевает особый, свой формализм из области нечеткой математики:

1. Целеобразование. В основе целеобразования лежит установление цели как уровня возможных достижений, что всегда связано с предыдущим опытом. Уровень возможных достижений прямо зависит от уровня притязаний и во многом определяется групповыми факторами. В процессе целеобразования формируется образ-цель как идеальный или мысленно представляемый результат, на достижение которого направлена вся деятельность. Целеобразование является наиболее трудно формализуемым (если вообще формализуемым) процессом из всех, относящихся к принятию решения. В этом плане принятие решения всегда представляет собой открытую систему, моделирование которой никогда не может завершиться созданием окончательной формализованной модели. Кроме того, уже на этапе целеобразования возникает иерархичность, характерная для процесса принятия решения в целом (ранжирование целей по значимости, наличие господствующей цели).

2. Формирование альтернатив. Оно предполагает сведение информации о целях и условиях их выполнения к виду, пригодному для принятия решения. Этот процесс можно описать с использованием лингвистических переменных и нечетких графов [12, 18, 26, 56].

3. Принятие решения как выбор из множества допустимых альтернатив. Психологические исследования показывают, что человек, как правило, выбирает не наилучшую из всех возможных альтернатив, а просто достаточно хорошую альтернативу, удовлетворяющую уровню его притязаний. При этом чаще всего предпочтения лица, принимающего решение (ЛПР), являются нечеткими и непостоянными, нередко нарушается их транзитивность (что не учитывается в классической теории полезности). Поэтому любая модель выбора дескриптивного характера должна основываться прежде всего на принципе отказа от понятия «абсолютный оптимум», т. е. следует оптимум рассматривать не как точку, а как подмножество некоторого множества. Здесь перспективными представляются методы нечеткого математического программирования и теории нечетких игр [19, 26, 27, 35—37, 49, 60].

Отметим, что множество допустимых альтернатив обычно является нечетким, поскольку граница между приемлемыми и неприемлемыми для ЛПР альтернативами в любой реальной задаче оказывается размытой. Более того, нередко даже отдельная альтернатива имеет столь сложный и расплывчатый вид, что ее также удобно моделировать с помощью нечеткого множества. При многокритериальном выборе из нечеткого множества допустимых альтернатив центральное место занимает понятие множества недоминируемых альтернатив, устойчивого к изменению ситуации принятия решения.

От процедуры принятия решения неотделимо построение программы действий, необходимых для его выполнения. Возможным средством формализации подобной программы является теория нечетких алгоритмов [40, 48].

4. Выполнение решения и получение результата. Процессы, выделенные в блоках 1—3, составляют основное содержание стадии принятия решения как внутреннего плана деятельности, связанной с выполнением исходной цели. Действия, развертывающиеся вслед за принятием решения и приводящие к получению конкретного результата, выступают как экстериоризованная часть этой деятельности. Соотношение между результатом выполнения решения и самим решением (выбранной альтернативой) можно моделировать посредством нечеткого отображения из множества альтернатив во множество исходов. Иными словами, любой выбор подразумевает подчинение условий окружающей обстановки интересам и целям субъекта, тогда как реализация даже единственной альтернативы в сложной, почти всегда нечетко определенной реальной среде

может приводить к нечеткому множеству результатов [12]. Этой идее созвучно высказывание Ю. М. Забродина о том, что нечеткость идеального объекта влечет за собой нечеткость психологического эксперимента в самом широком смысле.

5. Оценка «качества» всей системы процессов выполнения исходной цели за счет соотнесения полученного результата с образом-целью. Именно эта оценка (внешняя обратная связь) стимулирует поиск наилучшего решения, смену стратегии или даже полную реорганизацию процесса принятия решения, начиная с переформулирования цели. Здесь на первый план выдвигаются проблемы шкалирования [10, 21].

Итак, для моделирования задачи выполнения исходной цели в целом и стадии принятия решения в частности необходима детальная разработка нечеткого аппарата описания процессов, выделенных в блоках 1—5. К настоящему времени опубликовано несколько типов соответствующих моделей, относящихся главным образом к блоку 3. В частности, модель Беллмана — Заде (Bellman — Zadeh), в которой используется так называемый принцип слияния целевых функций и ограничений [35], основана на предположении, что ситуация выбора характеризуется множеством альтернатив X с определенным на нем набором n нечетких подмножеств $A_i = \{(x, \mu_{A_i}(x))\}$, $x \in X$; причем нечеткое множество полностью описывается функцией $\mu_{A_i}: X \rightarrow L$, где L — структура⁵, к примеру $L = [0, 1]$. Нечеткие подмножества μ_{A_i} трактуются как нечетко сформулированные критерии, с помощью которых происходит выбор конкретной альтернативы x . Решение определяется как слияние нечетких критериев и представляет собой нечеткое подмножество D множества альтернатив X , которое можно сформулировать как результат:

1) операции пересечения критериев во множестве альтернатив $D = A_1 \cap \dots \cap A_n$, что означает, $\forall x \in X, \mu_D(x) = \mu_{A_1}(x) \wedge \dots \wedge \mu_{A_n}(x)$;

2) операции перемножения критериев $D = A_1 \cdot \dots \cdot A_n$, т. е. $\forall x \in X, \mu_D(x) = \mu_{A_1}(x) \cdot \dots \cdot \mu_{A_n}(x)$;

3) линейной комбинации критериев $D = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot A_i$ или $\forall x \in X, \mu_D(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \mu_{A_i}(x)$, где $\alpha_i, i = 1, \dots, n$ — веса критериев и т. п. (см. [35, 54]).

Такие различные варианты определения решения можно связать с психологическими типами принятия решения [6].

Пример. Пусть требуется осуществить выбор из нескольких проектных вариантов конструкции самолета по обобщенному критерию, учитывающему ряд частных критериев как количественной, так и качественной природы: массу, стоимость, технологичность, ремонтпригодность, удобство в эксплуатации и т. п. Тогда применение операции пересечения $\wedge$ означает, что при построении решения отдельные критерии совершенно не компенсируют друг друга, т. е. необходимо жестко удовлетворить условиям минимизации и массы, и стоимости, а также прочим требованиям. Использование же таких операторов, для которых соответствующее нечеткое решение находится в интервале $(\min \mu_{A_i}(x), \max \mu_{A_i}(x))$, $i = 1, \dots, n$; $\forall x \in X$, например, линейной комбинации, позволяет выразить взаимную компенсацию рассматриваемых свойств: в частности, небольшая масса (и вытекающие отсюда другие достоинства изделия) может компенсировать относительно высокую стоимость. Нечеткие компенсационные стратегии, основанные на оценке взвешенной суммы достоинств и недостатков альтернатив, весьма типичны для задач выбора. Степень компенсации свойств альтернатив при формулировании решения может служить основным количественным показателем при определении типологии решений. Для ее вычисления мы используем понятие расстояния между нечеткими множествами [40]. Чем больше расстояние между «опорным» нечетким решением, полученным на основе операции пересечения $\wedge$, соответствующей нулевой компенсации различных свойств, и реальным нечетким решением, тем больше степень компенсации, тем более «рискованно» решение.

⁵ Структура — это частично упорядоченное множество, в котором любая пара элементов a, b имеет точную верхнюю грань $a \vee b$ и точную нижнюю грань $a \wedge b$.

Описание изменчивых, подчас противоречивых предпочтений человека в реальном процессе принятия решения представляет особый интерес [25]; для этого вполне естественно строить нечеткие отношения предпочтения [9, 19], например, нечеткое отношение строгого предпочтения на множестве альтернатив X вида [50]

$$\mu_R^S(z, y) = \begin{cases} \mu_R(z, y) - \mu_R(y, z), & \text{если } \mu_R(z, y) \geq \mu_R(y, z), \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases}$$

На базе этого отношения определяется нечеткое множество недоминируемых альтернатив формулой: $\mu_R^{ND}(y) = \inf_{z \in X} [1 - \mu_R^S(z, y)] = 1 - \sup_{z \in X} \mu_R^S(z, y)$.

Эффективным считается такой выбор, который делает величину $\mu_R(y)$ достаточно близкой к $\sup_{y \in X} \mu_R^{ND}(y) = 1 - \inf_{y \in X} \sup_{z \in X} [\mu_R(z, y) - \mu_R(y, z)]$.

Конечно, представленные здесь модели далеко не исчерпывают довольно обширный список (см. обзор [41], библиографию в работе [48]) нечетких моделей выбора, но и они в известной мере отражают основные направления исследований в этой области. К сожалению, абсолютное большинство создаваемых ныне нечетких моделей систем с человеком не опирается на систематический учет психологических факторов, что вполне еще объясняется, но теперь уже не оправдывается неким идеологическим и языковым, а скорее психологическим барьером между математикой и психологией. Поэтому такие модели пока являются как бы вехами на пути построения развитой системы адекватного описания всех процессов, связанных с принятием решения.

Как уже отмечалось, большинство ныне существующих нечетких моделей посвящены анализу предпочтений и выбору. Здесь предлагается одно из возможных обобщений понятия лингвистической переменной [12], которое может оказаться полезным при моделировании процесса информационной подготовки решения. Информационная подготовка решения заключается в переходе от общей, обычно сугубо качественной, трудно формализуемой цели к множеству альтернатив, из которых можно совершить выбор. Исходная цель порождает иерархию подцелей, каждой из которых соответствует нечеткое множество допустимых альтернатив. Сами же альтернативы уже являются достаточно четкими для выбора и последующих действий. Таким образом, мы предлагаем трактовать информационную подготовку решения как процесс постепенного уменьшения неопределенности, необходимого для осуществления исходной цели в реальной обстановке, что можно представить в виде иерархии (дерева) лингвистических переменных.

Определение. Лингвистической переменной j -го порядка называется набор $\mathcal{L}^j = (L^j, T^{*j}, U^j, M^j)$, где $\mathcal{L}^j$ — общий символ четвертки; L^j — название лингвистической переменной j -го порядка; T^{*j} — расширенное терм-множество L^j , которое получается из множества атомарных термов T^j с помощью синтаксической процедуры G ; U^j — базовое множество, роль которого для лингвистических переменных более высокого порядка играет семейство лингвистических переменных более низкого порядка; M^j или $M^j(T^j)$ — семантическое правило, которое каждому лингвистическому значению T_i^j лингвистической переменной j -го уровня ставит в соответствие его смысл $M^j(T_i^j)$, являющийся нечетким подмножеством универсального множества 2^{U^j} .

Базовое множество для лингвистической переменной j -го порядка можно определить в виде декартова произведения лингвистических переменных, среди которых имеется хотя бы одна переменная $(j-1)$ -го порядка. В наиболее общем виде $U^j = \mathcal{L}_1^{j-1} \times \dots \times \mathcal{L}_n^{j-1} \times \mathcal{L}_1^{j-2} \times \dots \times \mathcal{L}_m^{j-2} \times \dots \times \mathcal{L}_1^1 \times \dots \times \mathcal{L}_p^1 \times \mathcal{L}_1^0 \times \dots \times \mathcal{L}_r^0$. Тогда M^j оказывается нечетким отношением на 2^{U^j} , а M_i^j — отображением T_i^j на подобное про-

странство нечетких отношений. Иными словами, смысл конкретного термина лингвистической переменной j -го порядка представляет собой гетерогенное нечеткое множество [40].

Таким образом, информационная подготовка процесса принятия решения связывается с последовательным понижением порядка лингвистической переменной общей исходной цели, причем формирование альтернатив можно трактовать как результат преодоления некоторого «порога нечеткости» в ходе этого процесса.

Подобное представление процесса принятия решения «сверху» на основе психологического анализа реальной ситуации, выделения и гибкого формального описания образа-цели и его превалирующего влияния на ход и составляющие процесса дает возможность глубже раскрыть содержание, полнее и четче проследить динамику принятия решения и поэтому может оказаться плодотворнее, как точных количественных методов, исходящих в конечном счете «снизу, от числа», так и сугубо качественных методов описания.

Иерархия лингвистических переменных и нечетких множеств может явиться «мостом», с помощью которого будет преодолен разрыв между дизъюнктивным и недизъюнктивным методами исследования. Как отмечает А. В. Брушлинский, «математизация психологии мышления перспективна прежде всего в той мере, в какой осуществима недизъюнктивная математика» [7, с. 222]. С точки зрения инженерно-психологических применений это означает прежде всего корректный переход с недизъюнктивного на дизъюнктивный уровень, а именно «рабочее» представление недизъюнктивности в виде семейства дизъюнктивностей.

Итак, в целом мы оптимистически оцениваем возможности формализации операторской деятельности и создания единого языка инженерно-психологического описания систем «человек—машина» на основе понятий нечеткого множества и лингвистической переменной. Более того, мы считаем, что идеи нечеткого подхода могут послужить отправным пунктом на пути разработки специализированной математики для психологии; при этом мы солидарны с мнением Б. Г. Ананьева, что математизация (но не полная, не математизация вообще, а дифференцированная математизация) современной психологии «распространяется на все ее разделы и дисциплины без какого-либо исключения. В этом смысле психология в ближайшем будущем может стать математической в той же мере, в какой она уже является экспериментальной» [4, с. 69].

В то же время степень развития теории нечетких множеств (и нечеткой математики вообще) пока не позволяет утверждать об адекватности ее аппарата содержанию многих психологических проблем. Сейчас сравнительно развитой является лишь одноуровневая, «четкая» теория нечетких множеств класса $\mathcal{F}(X) = \{\mu | \mu: X \rightarrow [0, 1]\}$. Между тем малоисследованными остаются важные в плане практического применения случаи нечетких множеств порядка (типа) два и выше, функции принадлежности которых—также нечеткие множества. Такие объекты определяются рекурсивно как элементы классов $\{\mathcal{F}_L^p(X)\}_{p=0}^{p=\infty}$, где

$$\mathcal{F}_L^0(X) = X$$

$$\mathcal{F}_L^1(X) = \mathcal{F}_L(X) = \mathcal{F}_L(\mathcal{F}_L^0(X)) = \{\mu | \mu: X \rightarrow L\}$$

$$\mathcal{F}_L^p X = \mathcal{F}_L(\mathcal{F}_L^{p-1}(X)), \quad p = 1, 2, \dots,$$

$$\text{причем } \mathcal{F}_L^\infty(X) = \lim_{p \rightarrow \infty} \mathcal{F}_L^p(X) \quad [48]$$

До сих пор нет достаточно хорошей меры информации, связанной с изменением нечеткости и аналогичной энтропии в статистической теории информации. Кроме того, сама одноуровневая теория нечетких множеств

строится на базе «жестких» операций взятия максимума и минимума [34]; реже рассматриваются «мягкие» операции дизъюнктивной (вероятностной) суммы и произведения нечетких множеств. Однако кроме этих, в определенном смысле «полярных» вариантов, в принципе возможно построение множества других операций, более приемлемых с точки зрения психологии. Первый шаг в этом направлении — определение Заде операций концентрирования, растяжения, контрастной интенсификации, выпуклой комбинации, ограниченной суммы и др. [40], позволяющих формально выразить лингвистические модификаторы типа «очень», «более или менее», «в самом деле», играющие существенную роль в размытой логике мыслительных процессов.

Как свидетельствует ряд зарубежных и отечественных работ [26, 33, 41, 42, 47, 51], нечеткий подход может уже теперь эффективно применяться при моделировании различных режимов функционирования человека-оператора в системах «человек—машина». На некоторых промышленных предприятиях Великобритании, Голландии, Дании и других стран внедрены нечеткие алгоритмы управления (к примеру, алгоритм управления паровой установкой [47] и алгоритм управления теплообменником [51]). Их создали, опираясь на многочисленные естественные эксперименты и исследования, которые показали, что лингвистический набор эвристических решающих правил позволяет выразить логику стратегий управления человека. Эти правила можно представить в виде условных нечетких предложений и промоделировать с использованием композиционного правила вывода [57]. При сопоставлении нечетких моделей управления с вероятностными и «точными» моделями выяснилось, что первые обладают лучшим качеством переходного процесса (более быстрой сходимостью к оптимальному режиму) и более высокой устойчивостью функционирования в оптимальном режиме. Следует указать, что все эти исследования проводились с чисто инженерных позиций специалистами в области систем управления (как оговорено в обзоре [47]).

В известной библиографии по нечетким системам и связанным с ними вопросам, составленной Гэйнсом и Кохоутом (Gaines, Kohout) [38], охвачено 763 работы, из которых к психологической тематике условно отнесено 27. К настоящему времени общее число публикаций по нечеткой математике выросло примерно на порядок. При этом можно выделить следующие направления развития взаимосвязей нечеткой математики и психологии:

1. Попытки зарубежных математиков, работающих в области теории нечетких систем, например Заде [58] и А. Кофмана (A. Kaufmann) [40], заложить основы нечеткой теории человека-оператора в плане, близком к традициям бихевиоризма.

2. Появление «психологической» нечеткой математики, делающей упор на дескриптивных моделях; организация психологических экспериментов для определения и анализа функций принадлежности, операторов теории нечетких множеств, термов лингвистических переменных и т. д. Число работ этого класса непрерывно растет: типичными представителями его являются статьи Х. Циммермана (Zimmermann) и сотр. [54] об экспериментальном определении пересечения субъективных категорий и его соотношении с различными операциями теории нечетких множеств; И. В. Ежковой и Д. А. Поспелова [8] об определении лингвистической переменной «частота» и др.

3. Создание нечетко-математической психологии, т. е. такого комплексного направления психологических, математических и инженерных работ, где применялись бы нечеткие методы моделирования и анализа результатов психологических экспериментов, а прежде всего была бы построена адекватная система гибких формализованных психологических категорий в духе концепций о нечетких классах. Предвестниками

этого направления можно считать работы [39, 43—46]; большинство из них относится к области психолингвистики. Приемы нечеткого подхода к анализу результатов нейро- и психофизиологических экспериментов описаны и в отечественной литературе [31]. Тем не менее пока нечетко-математическая психология находится в стадии формирования. В связи с этим хотелось бы выразить надежду, что нечеткий подход займет надлежащее место в структуре психологических исследований в СССР.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ленин В. И. Философские тетради.— Полн. собр. соч., т. 29, с. 60.
2. Ленин В. И. Материализм и эмпириокритицизм.— Полн. собр. соч., т. 18, с. 194.
3. Маркс К., Энгельс Ф. О Л. Фейербахе.— Соч., 2-е изд., т. 3, с. 118.
4. Ананьев Б. Г. О проблемах современного человекознания. М., 1977.
5. Анохин П. К. Философские аспекты теории функциональной системы. Избр. тр. М., 1977.
6. Береговой Г. Т. и др. Экспериментально-психологические исследования в авиации и космонавтике. М., 1978.
7. Брушлинский А. В. Мышление и прогнозирование. М., 1979.
8. Ежкова И. В., Поспелов Д. А. Принятие решений при нечетких основаниях.— Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1977, № 6, с. 3—11.
9. Жуковин В. Е. Модели и процедуры принятия решения. Тбилиси, 1981.
10. Забродин Ю. М., Лебедев А. Н. Психофизиология и психофизика. М., 1977.
11. Завалова Н. Д., Пономаренко В. А. Принцип активного оператора в инженерной психологии.— В кн.: Инженерная психология: теория, методология, практическое применение. М., 1977, с. 119—133.
12. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М., 1976.
13. Леонтьев А. Н. Деятельность. Сознание. Личность. М., 1975.
14. Ломов Б. Ф. Человек и техника. М., 1966.
15. Ломов Б. Ф. О системном подходе к психологии.— Вопр. психологии, 1975, № 2, с. 31—45.
16. Ломов Б. Ф. О путях построения теории инженерной психологии на основе системного подхода.— В кн.: Инженерная психология, теория, методология, практическое применение. М., 1977, с. 31—55.
17. Математическое моделирование в психологии.— Вопр. кибернетики, вып. 50, М., 1979, с. 3—18.
18. Методы принятия решений в условиях неопределенности. Межвузовский сборник./Под ред. А. Н. Борисова. Рига, 1980.
19. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. М., 1980.
20. Проблемы инженерной психологии. Матер. V Всесоюз. конф. по инженерной психологии (Ленинград, октябрь, 1979 г.). Теория и проектирование операторской деятельности, вып. 1. М., 1979.
21. Проблемы принятия решений./Под ред. П. К. Анохина, В. Ф. Рубахина. М., 1976.
22. Психология и математика./Под ред. В. Ф. Рубахина и др. М., 1976.
23. Психология труда и инженерная психология./Под общ. ред. А. А. Крылова. Л., 1979.
24. Рубинштейн С. Л. О мышлении и путях его исследования. М., 1958.
25. Статистические модели и многокритериальные задачи принятия решений./Под ред. И. Ф. Шахнова. М., 1976.
26. Тез. III науч. семинара «Управление при наличии расплывчатых категорий»./Под ред. Д. А. Поспелова и др. Пермь, 1980.
27. Тез. докл. Всесоюз. науч. семинара «Модели выбора альтернатив в нечеткой среде». Рига, 1980.
28. Теплов Б. М. Проблемы индивидуальных различий. М., 1961.
29. Чернышев А. П. К вопросу об инженерно-психологическом проектировании полуавтоматических систем управления.— Психологический ж., 1980, т. 1, № 5, с. 105—116.
30. Чернышев А. П., Зазыкин В. Г. О характеристиках точности восприятия при слежении за непрерывными сигналами.— В кн.: Психофизика сенсорных систем. М., 1979, с. 189—198.
31. Чораян О. Г. Размытые алгоритмы мыслительных процессов. Ростов-на-Дону, 1979.
32. Шадриков В. Д. Психологический анализ деятельности. Ярославль, 1979.
33. Asai K., Kitajima S. A method for optimizing control of multimodal systems using fuzzy automata — Information Sci., 1971, v. 3, No. 4, p. 257—267.
34. Bellman R., Gierzt M. On the analytical formalism of the theory of fuzzy sets.— Information Sci., 1973, v. 5, N 2, p. 149—156.
35. Bellman R., Zadeh L. A. Decision-making in a fuzzy environment.— Management Sci., 1970, N 4, p. 141—162.

36. Bezdek J. C., Spillman B., Spillman R. A fuzzy relation space for group decision theory.—Fuzzy Sets and Systems, 1978, v. 1, N 4, p. 255—268.
37. Butnariu D. Fuzzy games. A description of the concept.—Fuzzy Sets and Systems, 1978, v. 1, N 3, p. 181—192.
38. Gaines B. R., Kohout L. J. The fuzzy decade: a bibliography of fuzzy systems and closely related topics.—Int. J. of Man-Machine Studies, 1977, v. 9, N 1, p. 1—68.
39. Hersh H. M., Caramazza A. A fuzzy set approach to modifiers and vagueness in natural language.—J. Experim. Psychol., 1976, v. 105, N 3, p. 254—276.
40. Kaufmann A. Introduction à la théorie des sous-ensembles flous. T. 1—4. Paris, 1972—1978.
41. Kickert W. J. Fuzzy theories on decision-making. Leiden, 1978.
42. King P. J., Mamdani E. H. The application of fuzzy control systems.—In: Fuzzy automata and decision processes./Ed. by M. M. Gupta, G. Saridis, B. R. Gaines. The Hague, 1977, p. 321—330.
43. Kochen M. Enhancement of coping through blurring.—Fuzzy Sets and Systems, 1979, v. 2, N 1, p. 37—52.
44. Kochen M. Applications of fuzzy sets in psychology.—In: Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes./Ed. by L. A., Zadeh, K. S. Fu, H. Tanaka, T. Shimura. N. Y., 1975, p. 395—408.
45. Kochen M., Badre A. N. On the precision of adjectives which denote fuzzy sets.—J. Cybernetics, 1979, v. 4, N 1, p. 49—59.
46. Kokawa M., Nakamura K., Oda M. Fuzzy-theoretic and concept-formational approaches to hint-effect experiments in human decision processes.—Fuzzy Sets and Systems, 1979, v. 2, N 1, p. 25—36.
47. Mamdani E. H. Applications of fuzzy sets theory to control systems: a survey.—In: Fuzzy automata and decision processes./Ed. by M. M. Gupta, G. Saridis, B. R. Gaines. The Hague, 1977, p. 77—88.
48. Negoita C. V., Ralescu D. A. Applications of fuzzy sets to systems analysis (Bucuresti, 1974). Basel, 1975.
49. Orlovsky S. A. On programming with fuzzy constraint sets.—Kybernetes, 1977, v. 6, N 3, p. 197—201.
50. Orlovsky S. A. Decision-making with a fuzzy preference relation.—Fuzzy Sets and Systems, 1978, v. 1, N 3, p. 155—167.
51. Ostergaard J.-J. Fuzzy logic control of a heat exchanger process.—In: Fuzzy automata and decision processes./Ed. by M. M. Gupta, G. Saridis, B. R. Gaines. The Hague, 1977, p. 285—320.
52. Radecki T. Level fuzzy sets.—J. Cybernetics., 1977, v. 7, N 3, p. 189—198.
53. Tanaka H., Mizumoto M. Fuzzy programs and their execution.—In: Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes./Ed. by Zadeh, N. Y., 1975.
54. Thole U., Zimmermann H.-J., Zysno P. On the suitability of minimum and product operators for the intersection of fuzzy sets.—Fuzzy Sets and Systems, 1979, v. 2, N 2, p. 167—180.
55. Urugami M., Mizumoto M., Tanaka K. Fuzzy robot control.—J. Cybernetics, 1976, v. 6, N 1, p. 39—64.
56. Yager R. R. Fuzzy subsets of Type 2 in decisions.—J. Cybernetics, 1980, v. 10, N 2, p. 137—159.
57. Zadeh L. A. Fuzzy sets.—Information and Control, 1965, v. 8, N 4, p. 338—353.
58. Zadeh L. A. A system-theoretic view of behavior modification.—Mem. № ERL-M 320. University of California, Berkeley, 1972.
59. Zadeh L. A. The linguistic approach and its application to decision analysis.—Mem. № ERL-M 576. University of California, Berkeley, 1976.
60. Zimmermann H.-J. Fuzzy programming and linear programming with several objective functions.—Fuzzy Sets and Systems, 1978, v. 1, N 1, p. 46—55.

Поступила в редакцию
3.IV.1980

ЗА РУБЕЖОМ

СООТНОШЕНИЕ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
И РЕЧИ¹

Гринфилд П. М.

Экспериментальное изучение соотношения речи и деятельности при помощи манипулятивных действий в ситуации общения имеет важное значение как в теоретическом плане для изучения процесса регулирования языка соответствующим контекстом, так и в практическом отношении — для применения его результатов в трудовых ситуациях, включающих процесс тренировки. В ходе экспериментального изучения проблемы испытуемым объясняли, какие действия они должны выполнять. Экспериментальная задача представляла уровень деятельности, описываемый А. Н. Леонтьевым [3], и включала последовательное манипулирование с объектами с ясно определенной целью.

Как известно, Выготский рассматривал речь как регулятор деятельности и поведения. Рубинштейн, напротив, считал, что деятельность влияет на речь. Наши экспериментальные данные подтверждают скорее точку зрения Рубинштейна, хотя они и не опровергают позицию Выготского. Эксперимент был поставлен таким образом, чтобы выявить влияние структуры деятельности на речевой продукт, но не наоборот. Результаты показали, что особенности отдельного действия влияют на содержание и форму лингвистических описаний, которые приобретают общую функциональную черту — сокращение неопределенности. Принцип сокращения неопределенности тесно связан с представлением Выготского о предикативности внутренней речи и речи для себя.

Рассматривая вопрос о предикативности, необходимо определить два термина, употребляемых Выготским [4], — «психологический субъект» и «психологический предикат». Психологический субъект — это то, что имеется в сознании говорящего до обдумывания или произнесения высказывания. Психологический предикат — это то новое, что говорится о психологическом субъекте, что добавляется к нему высказыванием. По мнению Выготского, особенность предикативности состоит в том, что она является формой сокращения или укорочения речи, при котором психологический субъект опускается, тогда как психологический предикат выражается.

Рассматривая предикативность как черту внутренней речи или речи для себя, Выготский понимал, что при определенных обстоятельствах предикативной может быть и речь в процессе общения. Он приводит следующий пример [4]. Группа людей ждет автобуса. Автобус появляется. Ни один человек не скажет: «Автобус, который мы ждем, идет». Будет сказано что-нибудь вроде «идет», «он идет». В этом примере «автобус, который мы ждем» и есть психологический субъект, принимаемый за данное и не выражаемый лингвистически. Напротив, «идет» является психологическим предикатом и получает лингвистическое выражение.

Проведенный анализ нужно связать с концепцией неопределенности и с представлением о том, что имеется в сознании говорящего и слушающего перед высказыванием. В рассмотренном случае в сознании ожидающих до высказывания содержится мысль, что они ждут автобуса. Это обстоятельство принимается за данное и остается невыраженным. Это — часть сообщения, но часть имплицитная. Неопределенность или вопрос состоит в том, каково местоположение автобуса, куда он движется. Это и есть психологический предикат, получающий речевое выражение. Следовательно, психологически реально предикат сокращает неопределенность, отвечая на вопрос, что психологически реально в данной ситуации.

Данная концепция развивается в нашей работе. Основной путь ее развития — выделение точных характеристик ситуации, определяющих, будет ли выражен в речи тот или иной ее аспект. На этом пути идентифицируются объективные характеристики ситуации, соотносимые с субъективной неопределенностью.

Существует два вида таких характеристик. Первая из них — изменение. Черты изменения или новизны имеют тенденцию вербализоваться. Напротив, постоянные характе-

¹ Доклад, прочитанный Р. М. Greenfield на симпозиуме по проблеме деятельности (Москва, Институт психологии АН СССР, март 1980 г.).