

Управление когнитивной нагрузкой в интегрированной образовательной среде с учетом фактора визуальной неопределенности

Е. Е. Котова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
eekotova@gmail.com

Аннотация. Регулирование и управления когнитивной нагрузкой в учебном процессе становится одной из центральных проблем в информационно насыщенной среде обучения. Чтобы эффективно анализировать процессы обучения человека, необходимо учитывать множество различных факторов. В докладе исследуются различия в решении когнитивных задач с наличием визуальной неопределенности в интегрированной образовательной среде. Анализ индивидуальных различий позволяет прогнозировать распределение когнитивной нагрузки в учебном процессе и управлять индивидуальным процессом обучения. Применяется метод на основе теоретико-информационного подхода и теории вычислительной сложности А.Н. Колмогорова.

Ключевые слова: интегрированная образовательная среда; управление когнитивной нагрузкой; визуальная неопределенность; учебные задачи

I. ВВЕДЕНИЕ

Информационные ресурсы зачастую представляют собой сложные визуализации (схемы, графики, фотографии, рентгеновские снимки и др.). Исследования в области понимания информации в графическом формате представления значительно расширились в последние несколько лет. В работе со сложными данными решаются такие задачи, как принятие решений или объяснение данных, в отличие, например, от поиска фактов в простых, или элементарных, задачах.

Исследователями подтверждается более точное восприятие и понимание графической информации, если человек обладает высокими графическими навыками, или данные ему были знакомы, и таким образом, полученная информация была ожидаемой [1]. Чтобы лучше понять расхождения результатов в решении когнитивных задач, необходимо изучить индивидуальные факторы различий, которые могут повлиять на результаты. В то время как академическая успеваемость привлекает наибольшее внимание, все больше исследований когнитивной сферы включают в свой анализ и другие факторы индивидуальных различий, проявляющихся в работе с информацией. Индивидуальные различия, проявляющиеся в познавательных действиях, определяют динамическую реакцию, устойчивость, стабильность или нестабильность когнитивных навыков.

Продуктивность человеко-машинного взаимодействия в информационных системах помимо зависимости от индивидуальных способностей человека, зависит и от внешней когнитивной нагрузки, особенно в условиях визуальной неопределенности. В результате сложностей восприятия предсказуемо возникают последствия, препятствующие достижению целей производительности (требуется больше времени для решения, возникают ошибки, неточности, и др.). В учебной деятельности, необходимо решать задачи распознавания и принятия решений, в которых присутствует информационный контент, характеризующийся визуальной неопределенностью. Ситуация решения нескольких задач с ограничением по времени увеличивает когнитивную нагрузку и может привести к риску невыполнения всей серии задач вследствие увеличения времени, требуемого для решения.

Таким образом, два параметра являются определяющими и характеризующими продуктивность (результативность) интеллектуальной деятельности: время реакции и точность принятия решений.

В докладе предложен метод автоматизированного анализа точности и времени решения когнитивных задач в условиях визуальной неопределенности представления информации. Метод основан на применении вычислительной теории сложности, в частности на оценке количества алгоритмической энтропии А.Н. Колмогорова в представлении визуальной информации.

II. ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ РЕШЕНИЯ КОГНИТИВНЫХ ЗАДАЧ

Моделирование процесса решения когнитивных задач рассмотрим на серии тестовых задач. Метод предполагает подтверждение существования количественной зависимости времени и точности выполнения последовательностей когнитивных задач (Serial Reaction Task, SRT) от фактора когнитивных стилей – «полезависимость-полenezависимость» (ПЗ-ПНЗ) и когнитивной нагрузки, вычисляемой на основе теоретико-информационного подхода и меры алгоритмической энтропии А.Н. Колмогорова. В основе нашего подхода к исследованиям индивидуальных факторов человека лежит понятие когнитивных стилей и категория когнитивно-

стилевого потенциала, ранее введенная в наших исследованиях.

В последние годы феномен когнитивных стилей изучается в междисциплинарном аспекте в связи с развитием цифровых технологий и их влияния на все сферы деятельности человека.

Когнитивные стили отвечают за организацию процесса переработки информации, характеризуют особенности организации ментального пространства, являются устойчивой индивидуальной характеристикой. Когнитивные стили – это индивидуально-своеобразные способы переработки информации человеком в виде индивидуальных различий в восприятии, анализе, структурировании, категоризации, оценивании происходящего (определение [2]). Один из наиболее изученных и доминирующих стилей, характеризующий индивидуальные особенности обнаружения деталей в сложном объекте – полезависимость-полнезависимость (ПЗ-ПНЗ). Люди, различающиеся по показателям ПЗ-ПНЗ, различаются по критериям принятия решений. Более мягкие критерии в процессе принятия решений и допуск некоторой неопределенности в оценках используют люди, относящиеся к ПЗ полюсу, в то время как ПНЗ люди характеризуются более определенной субъективной оценкой [3]. Субъекты, относящиеся к ПНЗ стилю, эффективнее применяют стратегии, позволяющие активнее переструктурировать ситуацию [4]. Значимость данной тематики все больше и больше подтверждается новейшими практически ориентированными исследованиями [5].

Настоящая работа продолжает исследование метода оценки влияния когнитивной нагрузки на время решения перцептивно-когнитивных задач в условиях визуальной неопределенности, некоторые результаты которого были представлены ранее [6]. В данной постановке задачи предполагается подтверждение существования количественной зависимости времени и точности выполнения последовательности когнитивных задач от факторов когнитивных стилей ПЗ-ПНЗ и когнитивной нагрузки, вычисляемой на основе теоретико-информационного подхода и алгоритмической меры энтропии А.Н. Колмогорова.

III. МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РЕШЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЗАДАЧ

Построение обобщенной модели процесса решения интеллектуальных задач основано на схеме человеко-машинного взаимодействия (среду электронного обучения также отнесем к среде человеко-машинного взаимодействия). Рассматривается три уровня обработки информации человеком (рис. 1): восприятие сигналов; принятие решения о реакции на наблюдения; реакция/действие на основании этого решения.

Предложена модель времени решения интеллектуальных задач с учетом фактора неопределенности [6]:

$$T = mH_K + bID + zH_S, \quad (1)$$

$$ID = \log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right), \quad (2)$$

где H_K – фактор неопределенности условий выбора (энтропия);

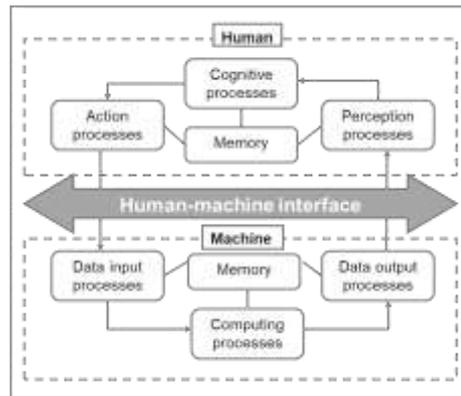


Рис. 1. Обобщенная модель процесса решения интеллектуальных задач в электронной среде

ID – индекс сложности движения, определяемый в форме логарифма отношения видимого на экране расстояния до цели D к ее ширине W , на основе предиктивной модели взаимодействия человека и машины П. Фиттса (P.M. Fitts) [7] и ее применения [8];

H_S – фактор количества энтропии модели понятийной организации предметной области (освоенных знаний) человеком;

m, b, z – коэффициенты регрессии.

Отличием модели является введенное автором понятие понятийной организации области знаний (conceptual organization) [6], которое характеризует достигнутый уровень знаний обучающегося и включено в виде фактора неопределенности в модель (1). Время реакции при визуальном восприятии различного количества альтернатив стимула-реакции (или степени неопределенности) при решении задачи выбора линейно зависит от количества информационной энтропии (H_I), что было показано британским психологом У. Хиком (W.E. Hick) в законе Хика, [9]). В работе [6] была предложена расширенная модель времени реакции, применимая не только к элементарным когнитивным задачам выбора (Elementary cognitive task, ECT), но и к задачам, в которых стимулы представлены в виде изображений с визуальной неопределенностью:

$$T = mH_A, \quad (3)$$

где H_A – алгоритмическая энтропия А.Н. Колмогорова [10]. В качестве алгоритмической меры энтропии изображения используется длина описания этого изображения на языке масштабируемой векторной графики (Scalable Vector Graphics, SVG) [11], сжатого при помощи универсального алгоритма сжатия данных Лемпеля-Зива-Уэлча (Lempel-Ziv-Welch, LZW);

m – средний темп обработки информации в серии задач с числом выбора N (с/Кб);

$$m = m_0 H_I \quad (4)$$

где m_0 – темп элементарной обработки информации в серии задач выбора из двух вариантов ответов;

H_I – информационная энтропия, которая в случае равновероятных вариантов ответов вычисляется по формуле:

$$H = \log_2(N).$$

В случае различных вероятностей для i -х альтернатив выбора применяется формула К. Шеннона:

$$H = -\sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i, \quad (5)$$

где N – число вариантов ответов.

Темп обработки информации является обратной величиной скорости обработки информации V (Кб/с);

Средний темп обработки информации определяется по экспериментальным данным как коэффициент линейной регрессионной зависимости времени решения серии перцептивно-когнитивных задач от алгоритмической энтропии стимулов, представленных изображениями с визуальной неопределенностью.

Индивидуальный темп обработки информации может меняться в процессе выполнения серии задач, в том числе вследствие имплицитной обучаемости распознавания паттернов стимулов и воздействия других факторов.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе применение модели времени решения перцептивно-когнитивных задач выбора и метода оценки когнитивной нагрузки рассмотрено на примерах решения серии задач теста Л. Терстоуна и Дж. Кагана.

А. Серия задач теста «Скрытые фигуры» Л. Терстоуна

Методика представляет собой модифицированный компьютерный вариант теста «Скрытые фигуры» Л. Терстоуна (Thurstone L.L., 1944). При помощи методики диагностируются индивидуальные различия в познавательной-ориентировочной деятельности по параметру когнитивного стиля ПЗ-ПНЗ. Показатель характеризует структурирующую способность в восприятии. Быстрое и правильное обнаружение детали в изображениях характеризуется полнезависимостью, медленное и ошибочное – полезависимостью.

В заданиях методики неопределенность входной информации стимульного материала задач вызвана как недостаточностью входной информации, так и ее избыточностью, что ведет к увеличению когнитивной нагрузки.

Тестовая сессия включает 49 заданий. На выполнение отводится 10 минут. Каждое задание представляет собой одно изображение в левой части и четыре изображения в правой части. Необходимо определить, в какие из четырех правых рисунков входит самый левый рисунок, то есть искомая фигура? Искомая фигура не должна быть повернута или масштабирована, но может располагаться на другом уровне. Искомую фигуру могут включать как одна, так и все четыре фигуры в правой части рисунка. Пример задания изображен на рис. 2.

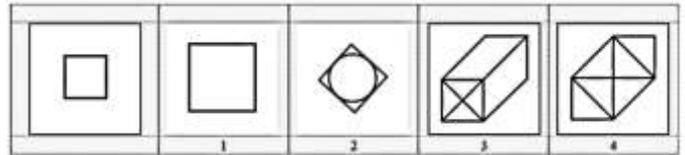


Рис. 2. Пример задания методики Л. Терстоуна

В результате методики диагностируются 6 групп параметров (уровней ПЗ-ПНЗ): очень высокий уровень ПНЗ; высокий уровень ПНЗ; средний уровень ПНЗ; средний уровень ПЗ; высокий уровень ПЗ; очень высокий уровень ПЗ.

В тестировании по методике Дж. Терстоуна приняли участие более 200 студентов 1-го курса бакалавриата технического и гуманитарного профилей обучения. За отведенные на выполнение заданий 10 минут все 196 заданий выполнили менее 40 % студентов, соответственно около 60 % участников не успели решить все задачи. Для прогнозирования времени тестирования, которое потребовалось бы большинству студентов, чтобы успеть решить все задачи, потребовалось идентифицировать значения параметра m для каждого студента в модели времени решения серии когнитивных задач выбора (3).

В качестве значений независимого фактора H_A алгоритмической энтропии использованы размеры файлов изображений стимулов, преобразованных в формат SVG и сжатых при помощи алгоритма LZW. По экспериментальным данным сформированы кумулятивные зависимости времени решения серии задач от энтропии.

В соответствии с (3) оценивается средний темп обработки информации m каждым студентом.

На рис. 3. изображены значения фактического времени, затраченного некоторыми студентами (Nst) на решение задач.

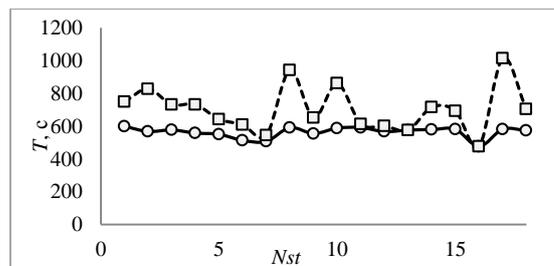


Рис. 3. Оценка времени (T), требуемого студентам (Nst) для решения всех 49 задач теста (квадратные точки, пунктирная линия)

На основе данных о фактически затраченном времени на решение задач, определен m – коэффициент линейной регрессии, характеризующий темп обработки информации, представленной в паттерне эталонного изображения и изображениях вариантов ответов. Среднее по группе значение коэффициента детерминации при определении m коэффициентов регрессионных зависимостей, составило $R^2 = 0.99$.

На основе данных о среднем темпе решения задач рассчитано время (пунктирная линия), которое потребовалось бы студентам для выполнения всех 49 задач.

На рис. 4. изображена гистограмма времени решения серии задач теста Л. Терстоуна. Штрихпунктирной линией показана аппроксимация экспериментальных данных функцией плотности нормального распределения со средним значением $\mu = 697.2$ (с) и стандартным отклонением $\sigma = 219.8$ (с). Далее произведена оценка количества студентов, которые могут за 10 минут решить все 49 задач. С применением функции интегрального нормального распределения со средним значением $\mu = 697.2$ (с) и стандартным отклонением $\sigma = 219.8$ (с) доля студентов, которым достаточно 10 минут составила приблизительно 31 % при доле остальных студентов 69 %.

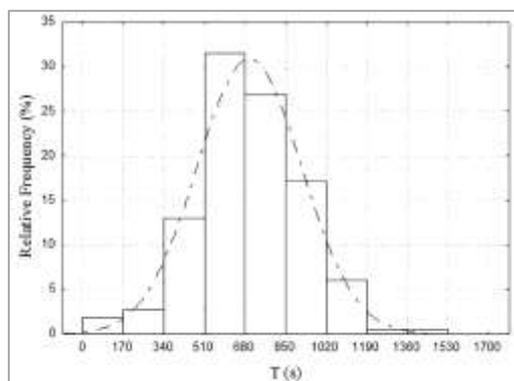


Рис. 4. Гистограмма времени (Т) решения серии задач теста Дж. Терстоуна. $\mu = 697.2$ s, $\sigma = 219.8$ s.

В соответствии с правилом трех сигм, для 99.7 % студентов на выполнение всех 49 задач определено необходимое время тестирования.

С учетом значений доверительных интервалов m коэффициентов регрессии оценивается максимальное время выполнения студентами всех 49 задач. Среднее значение времени по выборке составило $\mu = 710.5$ (с), стандартное отклонение $\sigma = 227$ (с). В соответствии с формулой $T = \mu + 3\sigma$, для выполнения всех задач теста 99.7 % студентам будет достаточно также приблизительно 23 минуты, что значительно превышает установленное время 10 мин. Таким образом можно оценить необходимое время решения задач для подгрупп студентов, имеющих различные индивидуальные показатели когнитивного стиля ПЗ-ПНЗ, а также решить задачу оценивания

допустимой когнитивной нагрузки, с которой студенты успешно справятся за отведенное для решения время.

По результатам выполнения методики Л. Терстоуна студенты классифицированы на 6 подклассов по шкале ПЗ-ПНЗ. Количество студентов в каждом подклассе в процентах составило: 1) 5 %, 2) 20 %, 3) 17 %, 4) 17 %, 5) 22 %, 6) 19 %. На основе данных о числе допущенных ошибок построена зависимость (рис. 5): ось абсцисс – номер подкласса, ось ординат – среднее значение отношения числа ошибок Ne к количеству обработанной информации H_K в каждом подклассе. Экспериментальные данные аппроксимированы логарифмической кривой со значением коэффициента детерминации $R^2 = 0.99$:

$$\frac{Ne}{H_K} = a \ln(Nc) + b.$$

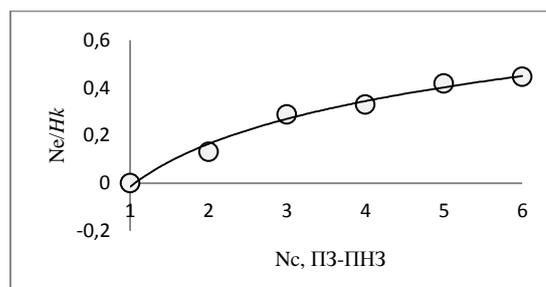


Рис. 5. Логарифмическая зависимость отношения числа ошибок и количества алгоритмической энтропии от номера класса по шкале полезности/полезности

Полученные результаты подтверждают гипотезу существования количественной зависимости времени и точности выполнения SRT от фактора когнитивных стилей ПЗ-ПНЗ и когнитивной нагрузки, вычисляемой на основе теоретико-информационного подхода и меры алгоритмической энтропии А.Н. Колмогорова.

В. Серия задач теста «Сравнение сходных фигур» Дж. Кагана

Аналогичное исследование проведено на стимульном материале теста «Сравнение сходных фигур» Дж. Кагана (MFFT) [6].

В соответствии с разработанным методом были получены оценки алгоритмической энтропии для изображений эталонных паттернов и вариантов ответов из 12 задач методики MFFT. По экспериментальным данным сформированы кумулятивные зависимости времени решения серии задач от энтропии.

В соответствии с (1) была произведена оценка среднего темпа обработки информации m каждым студентом и осуществлен прогноз времени, которое потребуется студентам, чтобы обработать когнитивную нагрузку всех 12 задач теста. На основе полученных оценок времени построена гистограмма распределения времени решения 12 задач теста.

Произведена оценка количества студентов, которым достаточно 10 минут для решения всех 12 задач. С

применением функции интегрального нормального распределения со средним значением $\mu = 405$ (с) и стандартным отклонением $\sigma = 216.9$ (с) доля студентов, которые на решение 12 задач затратили менее 10 минут, составила приблизительно 82 % при доле остальных студентов приблизительно 18 %.

Далее был проведен сравнительный анализ средних значений показателей темпа решения задач в двух сериях задач (Л. Терстоуна и Дж. Кагана). Экспериментальную выборку составили студенты (200 человек). По результатам тестов Л. Терстоуна и Дж. Кагана с применением формулы (3) определены значения m_0 – темпа элементарной обработки информации при выборе из двух вариантов ответов. В обоих тестах значения совпали: $m_0 = 0.6$.

Полученный результат можно объяснить тем, что средний темп обработки информации сохраняется постоянным при последовательном выполнении двух различных когнитивных тестов. На основе полученного результата возможно применить оценки производительности решения когнитивных задач, полученных в тесте Д. Кагана для предсказания производительности выполнения теста Л. Терстоуна.

Этот результат служит основанием для формулирования гипотезы: средний темп и скорость обработки информации являются устойчивыми характеристиками и могут служить основой для предсказания производительности решения других серий задач, отличающихся как числом вариантов ответов, так и уровнем когнитивной нагрузки, оцениваемой на основе алгоритмической энтропии А.Н. Колмогорова.

По результатам выполнения методики в результате применения модели классификатора Дж. Кагана студенты классифицированы на 4 подкласса [6]. Для класса импульсивных («быстрых и точных») студентов был рассчитан средний темп элементарной обработки информации $m_0 = 0.5$, которому соответствует скорость обработки информации $V = 2$ (Кб/с).

В дальнейшем планируется продолжить исследование в направлении экспериментального подтверждения сформулированной гипотезы в сериях тестовых задач с визуальной неопределенностью, используемых в учебном процессе. Также планируется исследовать точность предсказания производительности в группах студентов с учетом когнитивно-стилевых различий по шкале «Импульсивность-рефлексивность» Дж. Кагана и других методик.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе введено понятие среднего темпа обработки информации в серии задач с числом выбора N (сек/Кб), а также понятие темпа элементарной обработки информации в серии задач бинарного выбора. В двух экспериментах подтверждена целесообразность применения модели времени реакции на основе алгоритмической энтропии, предложенной автором в статье [6].

Модель отличается использованием алгоритмической энтропии вместо информационной энтропии, что позволяет применять модель не только к элементарным когнитивным задачам выбора, но и к сложным задачам с наличием визуальной неопределенности. Предложен новый метод оценки алгоритмической энтропии при помощи измерения длины файла изображения стимула, преобразованного в формат масштабируемой векторной графики и сжатого при помощи алгоритма LZW, что позволяет регулировать когнитивную нагрузку учебных задач.

Получено уточненное выражение для среднего темпа обработки информации при решении задач выбора из N вариантов. Установлено, что среднее значение темпа решения задач бинарного выбора является постоянным в группе студентов при решении задач, характеризующихся различным объемом алгоритмической энтропии стимулов, различным числом вариантов ответов ($N=8$ в методике Дж. Кагана и $N=4$ в методике Л. Терстоуна) и числом правильных ответов (1 в методике Дж. Кагана и в среднем 2 в методике Л. Терстоуна). Средний темп решения задач выбора, оцениваемый по результатам когнитивных тестов может быть использован для предсказания среднего времени решения серии других задач, например, в контрольном тестировании в учебном процессе.

Областью применения данного метода помимо управления процессом обучения, могут быть различные виды управленческой деятельности со сложной динамикой, в которых мыслительные процессы доминируют над исполнительными, такие как операторская, диспетчерская, менеджерская деятельность в технически и информационно насыщенной цифровой среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Shah P, Freedman EG. Bar and line graph comprehension: An interaction of top down and bottom up processes // *Topics in cognitive science*. 2011. Vol. 3. No. 3. Pp. 560-578.
- [2] Холодная М.А. Когнитивные стили. О природе индивидуального ума. СПб.: Питер, 2004. 384 с.
- [3] Либин А.В. Дифференциальная психология: на пересечении европейских, российских и американских традиций. М.: Смысл. 1999. 532 с.
- [4] Кочетков В.В., Скотникова И.Г. Индивидуально-психологические проблемы принятия решения. М.: Наука, 1993. 139 с.
- [5] Горизонты когнитивной психологии: хрестоматия / Под ред. В.Ф. Спиридонова, М.В. Фаликман. М.: Языки славянских культур. М.: РГГУ. 2012. 320 с.
- [6] Котова Е.Е., Писарев И.А. Исследование решения когнитивных задач с учетом визуальной неопределенности // XXIV Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2021). Сборник докладов. Санкт-Петербург. 26–28 мая 2021 г. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 351 с.
- [7] Fitts P.M. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement // *Journal of experimental psychology*. 1954. V. 47. No. 6. Pp. 381-391. doi:10.1037/h0055392
- [8] Soukoreff R.W., Zhao J., Ren X. The entropy of a rapid aimed movement: Fitts' index of difficulty versus Shannon's entropy // *IFIP Conference on Human-Computer Interaction*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2011. Pp. 222-239.
- [9] Hick W.E. On the rate of gain of information // *Quarterly Journal of experimental psychology*. 1952. vol. 4. no. 1. Pp. 11-26.
- [10] Kolmogorov A.N. Three approaches to the quantitative definition of information // *International journal of computer mathematics*. 1968. V. 2. No. 1-4. Pp. 157-168.
- [11] Larsen R. Mastering SVG. Packt Publishing. 2018. 312 p.