

Обобщенная модель когнитивной деятельности с учетом неопределенности в информационно насыщенной среде

А. С. Писарев¹, Е. Е. Котова², И. А. Писарев³

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

¹a_pisarev@mail.ru, ²eekotova@gmail.com, ³pisarevivan@yandex.ru

Аннотация. Предложена обобщенная модель ключевых показателей когнитивной деятельности в условиях высокой когнитивной нагрузки информационной среды с наличием визуальной и лингвистической неопределенности. В модели учитываются индивидуальные параметры пользователя среды, относящиеся к восприятию информации и принятию решений. Реализация предполагает применение предиктивных моделей, интеллектуальных агентов и методов анализа данных с целью прогнозирования показателей деятельности.

Ключевые слова: информационные ресурсы, ключевые показатели, когнитивная деятельность, визуальная неопределенность, лингвистическая неопределенность, принятие решений

I. ВВЕДЕНИЕ

Исследование когнитивных процессов с использованием вычислительных моделей является актуальным направлением, поскольку позволяет моделировать сложные когнитивные процессы, формулировать новые теоретические гипотезы и проверять их соответствие полученным экспериментальным данным [1, 2].

В данной работе мы представляем обобщенную версию модели когнитивной деятельности на основе ключевых показателей. Модель представляет единую основу для исследования, прогнозирования и оценки когнитивной нагрузки человека в информационно насыщенной среде.

В то время, как в существующих публикациях рассматриваются отдельные аспекты моделирования когнитивной деятельности [3–6], целью настоящей работы является разработка обобщенной модели.

Некоторые предварительные результаты показали, что необходимо интегрировать в единую модель различные аспекты когнитивной деятельности, связанной с процессами восприятия и обработки информации в информационно насыщенной среде [7–12].

II. СТРУКТУРА ОБОБЩЕННОЙ МОДЕЛИ

В предлагаемой модели учитываются основные виды активных процессов, влияющих на продуктивность когнитивной деятельности в условиях высокой когнитивной нагрузки, таких как:

- обработка визуальных сигналов, информации различной модальности с наличием визуальной неопределенности;

- активность моторных (координационных) процессов;
- понятийная организация опыта (имплицитная обучаемость, процессы понимания, распознавания, активации концептуальной информации, определения релевантной информации, категоризации, аргументации, принятия решений и др.) в условиях лингвистической неопределенности;
- когнитивный контроль процессов выбора при наличии интерференции и дистракторов (distractor) – факторов, мешающих верному решению поставленной задачи.

Каждый вид деятельности характеризуется ключевыми показателями – KPI (Key Performance Indicator) и мерами для их измерения.

Структурная схема обобщенной модели изображена на рис. 1.

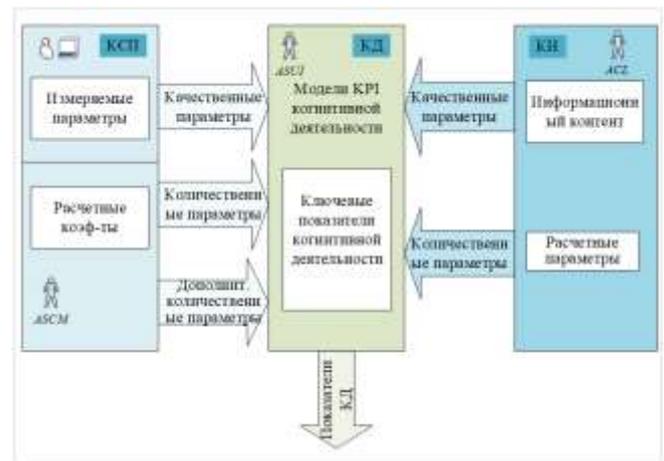


Рис. 1. Структурная схема обобщенной модели

Используются следующие обозначения:

КСП – модель когнитивно-стилевого потенциала (КСП) человека, в которой используются ранговые показатели (такие как, «импульсивность–рефлексивность», «полнезависимость–полезависимость», «гибкость–ригидность»), характеризующие когнитивные стили человека и численные показатели (скорость обработки информации) [13–15];

КН – модель когнитивной нагрузки (КН), оцениваемая на основе мер неопределенности (информационной и алгоритмической энтропии) [16, 17];

КД – модель когнитивной деятельности (КД), связывающая ключевые показатели деятельности КРП и значения параметров модели КСП и модели КН.

Реализация предполагает включение следующих интеллектуальных агентов:

ASUI – Agent Subject User Interface, агент интерфейса пользователя;

ASCM – Agent Subject Cognitive Model, агент когнитивной модели пользователя;

ACL – Agent Cognitive Load, агент когнитивной нагрузки.

Применение разработанной модели КСП для адаптивного предсказания результатов когнитивной деятельности на основе моделей и методов интеллектуального анализа данных (классификации и регрессии) было продемонстрировано в ряде исследований успешности обучения студентов [14, 15].

Обобщенная модель когнитивной деятельности разработана для более полного учета факторов, влияющих на продуктивность когнитивной деятельности, таких, как специфика когнитивных задач, различающихся когнитивной нагрузкой, полнотой изображений стимулов, числом вариантов выбора и верных мультиномиальных решений, моторными способами реакции и др.

Обобщенная модель когнитивной деятельности (ОМКД) предназначена для решения следующих задач:

- объяснения показателей продуктивности (точности и времени) решения когнитивных задач на основе моделей КСП и КН;
- предсказания продуктивности решения когнитивных задач человеком с определенным КСП в условиях изменяющейся КН;
- планирования когнитивной нагрузки на основе объема и времени когнитивной обработки информации с учетом групповых и индивидуальных особенностей КСП.

III. ПРИМЕРЫ МОДЕЛЕЙ

ОМКД базируется на динамических моделях процессов восприятия, когнитивного выбора и моторных реакций, представленных в виде линейных и нелинейных неоднородных дифференциальных уравнений (1) [7]:

$$\frac{dy}{dt} = \Phi(u, y, f, \mathbf{q}), y_0, \quad (1)$$

где $y(t)$ – количество обработанной информации; $u(t)$ – когнитивная нагрузка; f – неконтролируемые случайные воздействия (возмущения); \mathbf{q} – вектор параметров КСП; y_0 – начальный уровень информации по отношению к когнитивной нагрузке (понятийной организации).

Общее количество информации, полученное за время T в процессе когнитивной обработки представлено интегральным уравнением (2) [7]:

$$y(t) = \int_0^T \Phi(u, y, f, \mathbf{q}) dt + y_0 \quad (2)$$

В качестве примера рассмотрим модели процесса когнитивной обработки информации с аддитивным (3) и мультипликативным (5) Гауссовым шумом [18]

$$T_1(\text{csp}, u) \frac{dy}{dt} + y = k(\text{csp}, u) u \quad (3)$$

$$z = y + \sigma \xi, \quad (4)$$

где y – количество обработанной информации; z – измеряемое значение количества обработанной информации (4), искаженное аддитивным Гауссовым шумом ξ со стандартным отклонением σ в канале измерения; $k(\text{csp}, u)$ – коэффициент эффективности обработки когнитивной нагрузки, значение которого зависит от КСП (csp) и уровня когнитивной нагрузки (u); $T_1(\text{csp}, u)$ – постоянная времени, за которое количество обработанной информации (y) достигает приблизительно 63 % от установившегося значения. Для решения когнитивной задачи на уровне с 95% точностью потребуется приблизительно время $T = 3T_1(\text{csp}, u)$ в соответствии с моделью (3).

Эффективность полной обработки информации, содержащейся в когнитивной нагрузке, характеризуется значением коэффициента $k = 1$. Восприятие информации не в полном объеме, то есть значение $k < 1$, может приводить к возрастанию вероятности ошибок при усвоения материала. Объяснение вероятности ошибок в модели (3) количеством обработанной информации подтверждается исследованиями, где отмечается, что когда участник выполняет задачу без ошибок, то он извлекает всю ожидаемую информацию из стимулов (когнитивной нагрузки) [19]. Также отмечается, что при возрастании когнитивной нагрузки возрастает и частота ошибок [20].

Снижение эффективности обработки информации, выражающееся в модели (3) значениями $k < 1$, может быть вызвано особенностями когнитивного стиля человека, принимается решение на основе неполной информации, т. е. не дождавшись завершения переходного процесса в соответствии с моделью (3). Такое объяснение согласуется с выводами, сделанными на основе анализа экспериментальных данных [21, 22]: время реакции (Reaction Time, RT) больше в случае правильного решения когнитивной задачи, чем в случае возникновения ошибок.

Наблюдаемая на практике вариативность результатов (времени и числа ошибок) при выполнении однотипных когнитивных задач может быть объяснена волатильностью параметра k .

Стабильность или изменчивость значения параметра k могут быть вызваны большей или меньшей устойчивостью к влиянию на когнитивные процессы случайного шума (диффузии), например, отвлечения на другие задачи, и т. п.

Стохастический вариант (5) модели (3) дополнительно учитывает воздействие случайных факторов ξ на параметр k при стандартном отклонении σ :

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{1}{T_1} y + \frac{(k + \sigma \xi)}{T_1} u \quad (5)$$

Уравнению (5) соответствует стохастическое дифференциальное уравнение (6) в форме модифицированных случайных процессов Орнштейна–Уленбека или Васичека [8, 23, 24]:

$$dy_t = a(b - y_t)dt + cdW_t, \quad (6)$$

где $a(b - y_t)$ – дрейф (drift), направленная составляющая y – количества обработанной информации; c – диффузия (diffusion); $dW_t = \xi(t)dt$ – Винеровский процесс при решении задачи; $a = \frac{1}{T_1}$, $b = k$, $c = \frac{\sigma}{T_1}$.

Чем больше человек подвержен влиянию шумов, тем больше коэффициент σ , который выражает случайные факторы когнитивного стиля.

Целесообразность использования параметра σ в модели КСП в дополнение к параметрам T_1 и k находит подтверждение в ряде исследований. Отмечается, что процессы когнитивного контроля относятся к способности выполнять обработку информации в условиях наличия отвлекающих факторов (дистракторов) [2]. Различают процессы тормозного контроля и интерференционного контроля, который обеспечивает селективное внимание при восприятии, фокусирование на чем-то одном за счет подавления внимания к другим стимулам. Процессы когнитивного самоконтроля важны, чтобы не делать поспешные выводы, например, не давать первый попавшийся ответ [25].

Уменьшение значения параметра k из-за подверженности к случайным воздействиям характеризуется возрастанием числа ошибок, вызываемых повышенной импульсивностью тех, кто не способен дождаться окончания переходного процесса полной обработки когнитивной нагрузки. В модели КСП также для объяснения этого ненаблюдаемого внешне эффекта используется показатель импульсивности по шкале «импульсивность–рефлексивность» и показатель «сильной полезависимости» по шкале «полезависимость–полenezависимость».

В проведении исследований когнитивных процессов возможна регистрация и оценка количества обработанной информации (y) во время переходного процесса, либо только регистрация точности и времени по окончании переходного процесса решения когнитивных задач.

Частным случаем динамической модели (3) является модель (7) зависимости установившегося значения количества обработанной информации y_c от когнитивной нагрузки u после завершения переходного процесса:

$$y_c = k u \quad (7)$$

и измеряемое значение z_c (8):

$$z_c = y_c + \sigma \xi \quad (8)$$

Уравнение (7) соответствует уравнению (3), в котором расположенная в левой части производная по времени приравняется нулю ($\frac{dy}{dt} = 0$) для случая окончания изменений y и завершения процесса обработки информации.

В модели (9) время завершения когнитивного процесса зависит от когнитивной нагрузки u и параметра КСП – среднего темпа обработки информации m :

$$T = m u \quad (9)$$

На основе моделей когнитивных процессов разработана обобщенная модель когнитивной деятельности (ОМКД) (10). В модель включены следующие ключевые показатели когнитивной нагрузки в зависимости от когнитивных процессов: H_K – перцептивно-когнитивных процессов обработки визуальной информации; ID – активных (моторных) процессов и H_S – процессов обработки информации (например, текстовой).

Метод исследования времени реакции при решении когнитивных задач выбора состоит в определении значений факторов и идентификации коэффициентов множественной регрессионной модели когнитивной деятельности (10):

$$T = mH_K + b ID + zH_S, \quad (10)$$

$$ID = \log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right) \quad (11)$$

где H_K – алгоритмическая энтропия когнитивной нагрузки; ID – фактор сложности моторной деятельности; D – расстояние до «цели», например, до элементов выбора на экране компьютера; W – ширина «цели», например, элементов выбора; H_S – фактор энтропии понятийной организации предметной области; m, b, z – параметры модели; m – средний темп обработки

визуальной информации $m = m_0 H_I I^{-\alpha}$, m_0 – темп обработки информации в элементарных задачах

бинарного выбора; $I = \frac{Q_\zeta}{Q_0}$ – фактор полноты

изображения, оцениваемый отношением количества полезной информации (Q_ζ) в неполном изображении к количеству информации в исходном изображении (Q_0), меняется от 0 до 1 (максимальная полнота изображения); α – константа, характеризующая крутизну гиперболического затухания (среднее число попыток при решении задачи); H_I – информационная энтропия когнитивной нагрузки

$(H_{I,H}, H_{I,S})$; $H_{I,H} = \log_2(N)$ – H_I в случае равновероятных ответов (формула Р. Хартли); N – число

вариантов ответов; $H_{I,S} = -\sum_{i=1}^N p_i \log_2 p_i$ – H_I в случае

различных вероятностей для i -х альтернатив выбора

(формула К. Шеннона); p_i – вероятность i -й альтернативы выбора.

В методе анализа точности применяется регрессионная модель среднего числа ошибок в серии когнитивных задач выбора $N_e = e N_K$, где e – среднее число ошибок в серии когнитивных задач выбора; $e = H_I \alpha e_0$, где e_0 – дополнительный количественный показатель КСП (когнитивного стиля) – среднее число ошибок в элементарных задачах бинарного выбора.

Время первого ответа (T_f) связано с временем решения задачи $T_f = \beta H_I H_K m_0$, где β – параметр, определяемый по экспериментальным данным.

Подтверждение описательных и прогностических свойств обобщенной модели когнитивной деятельности получено ранее в рамках исследования отдельных серий когнитивных задач Дж. Кагана, Л. Терстоуна и Дж.Р. Струпа [26–28] в условиях повышенной нагрузки.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате выполнения группой испытуемых двух различных типов когнитивных задач, получены результаты сравнения рассчитанных значений одного из определяющих ключевых показателей КСП – m_0 , среднего темпа обработки информации в элементарных задачах бинарного выбора.

В эксперименте принимали участие 163 человека в возрасте от 18 до 20 лет. Испытуемым было предложено выполнить две серии перцептивно-когнитивных задач Дж. Кагана и Л. Терстоуна. В методике «Сравнение сходных фигур» Дж. Кагана (MFFT) [26] необходимо принять решение по выбору изображения, которое полностью соответствует изображению фигуры-эталона. В методике «Скрытые фигуры» (Hidden Figures Test, HFT) Л. Терстоуна [27] необходимо провести сравнительный анализ в задачах мультиномиального выбора. Методики реализованы в авторском программном комплексе интеллектуального анализа продуктивности решения когнитивных задач в электронной среде (Эксперт-Аналитик ART) и решения перцептивно-когнитивных задач выбора в условиях визуальной неопределенности (Перцептивно-когнитивный агент САРТНА-Е) [12]. Несмотря на существенные различия в когнитивной нагрузке по числу вариантов выбора и показателю среднего времени решения задач (m), получены одинаковые значения параметра среднего темпа обработки информации в элементарных задачах бинарного выбора. Результаты расчетов приведены в таблице.

ТАБЛИЦА I СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

| Методика | Характеристики | | | Средний темп решения задачи (м), сек/кб | Темп решения когнитивных задач (m_0), сек/кб |
|----------|----------------|----------------------------|---------------------------------------|---|--|
| | Число задач | Число вариантов выбора (N) | Среднее число верных ответов в задаче | | |
| MFFT | 12 | 8 | 1 | 1.8 | 0.6 |
| HFT | 49 | 4 | 2 | 2.6 | 0.6 |

Таким образом, подтверждена возможность предсказания среднего времени решения задач теста HFT на основе обобщенной модели когнитивной

деятельности и измеренного по результатам выполнения теста MFFT значения m_0 параметра КСП.

Полученный результат позволяет сформулировать гипотезу об универсальности такого показателя КСП, как средний темп обработки информации (m_0) в элементарных задачах бинарного выбора.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прогнозирование среднего времени выполнения тестовых задач имеет практическую значимость при разработке и планировании когнитивной нагрузки с учетом когнитивно-стилевого потенциала человека. Особенно при интеграции сенсорных и когнитивных возможностей человека в киберфизических системах для развития технологий Industry 4.0.

Разработана обобщенная модель когнитивной деятельности, учитывающая факторы когнитивно-стилевого потенциала и когнитивной нагрузки при прогнозировании значений ключевых показателей в условиях неопределенности.

Сравнительный анализ значений среднего темпа обработки информации в элементарных задачах бинарного выбора, полученных на различных методиках MFFT и HFT, продемонстрировал возможность прогнозирования результатов на основе обобщенной модели когнитивной деятельности.

В дальнейшем планируется продолжить исследование разработанной обобщенной модели когнитивной деятельности на других когнитивных задачах повышенной сложности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Alexander W.H., Brown J.W. Computational models of performance monitoring and cognitive control. Topics in cognitive science. 2010. Vol. 2. No. 4. Pp. 658-677.
- [2] O'Reilly R.C., Herd S.A., Pauli W.M. Computational models of cognitive control. Current opinion in neurobiology. 2010. Vol. 20. No. 2. Pp. 257-261. doi:10.1016/j.conb.2010.01.008
- [3] Lieder F., Griffiths T. L. Resource-rational analysis: Understanding human cognition as the optimal use of limited computational resources. Behavioral and Brain Sciences. 2020. Vol. 43. 60 P.
- [4] Medina J.M., Díaz J.A. A random multiplicative model of Piéron's law and choice reaction times. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2021. Vol. 564. p. 125500.
- [5] Urai A.E., De Gee J.W., Tsetsos K., Donner T.H. Choice history biases subsequent evidence accumulation. Elife. 2019. Vol. 8. Pp. e46331.
- [6] Sayood K. Information theory and cognition: a review. Entropy. 2018. vol. 20. no. 9. Pp. 706-725.
- [7] Имаев Д.Х., Котова Е.Е. Компьютерная имитация процесса обучения в условиях периодического контроля успеваемости. Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2014. № 1. С. 74-79.
- [8] Kotova E.E., Pisarev A.S. Adaptive prediction of student learning outcomes in online mode, 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS). IEEE. 2017. Pp. 138-141.
- [9] Kotova E.E., Pisarev I.A. Researching Cognitive Tasks Solving Taking into Account Visual Uncertainty. 2021 XXIV International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). IEEE. 2021. Pp. 127-130.
- [10] Kotova E.E. Management of cognitive load in integrated educational environment taking into account the factor of visual uncertainty. Proceedings of 2021 IV International Conference on Control in Technical Systems (CTS). IEEE. 2021. Pp. 162-166.
- [11] Котова Е.Е., Писарев А.С. Анализ производительности решения когнитивных задач студентами в электронной среде обучения. В сборнике: Информатизация образования и методика

- электронного обучения: цифровые технологии в образовании. Материалы V Международной научной конференции. В 2-х частях. Под общей редакцией М.В. Носкова. Красноярск, 2021. С. 250-256.
- [12] Котова Е.Е., Писарев И.А. Автоматизированная система анализа когнитивной нагрузки в среде обучения blended learning. Проектирование и обеспечение качества информационных процессов и систем. Сборник докладов Международной конференции. Санкт-Петербург. 2022. С. 145-148.
- [13] Котова Е.Е., Падерно П.И. Экспресс-диагностика когнитивно-стилевого потенциала обучающихся в интегрированной образовательной среде. Образовательные технологии и общество. 2015. Т. 18. № 1. С. 561-576.
- [14] Котова Е.Е., Писарев А.С. Задача классификации учащихся с использованием методов интеллектуального анализа данных. //Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2019. № 4. С. 32-42.
- [15] Котова Е.Е., Писарев А.С. Автоматизация прогнозирования результатов обучения студентов. //Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2019. № 5. С. 31-39.
- [16] 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.
- [17] Frank S.L. Uncertainty reduction as a measure of cognitive load in sentence comprehension. Topics in cognitive science. 2013. V. 5. No. 3. Pp. 475-494.
- [18] Kotova E.E., Pisarev A.S. Adaptive prediction of student learning outcomes in online mode. 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS). IEEE. 2017. Pp. 138-141.
- [19] Seow S.C. Information theoretic models of HCI: A comparison of the Hick-Hyman law and Fitts' law. Human-computer interaction. 2005. Vol. 20. No. 3. Pp. 315-352.
- [20] Medina J.M., Wong W., Díaz J.A., Colonius H. Advances in modern mental chronometry. Frontiers in human neuroscience. 2015. Vol. 9. P. 256.
- [21] Ludwig J., Ahrens F. K., Achtziger A. Errors, fast and slow: an analysis of response times in probability judgments. Thinking & Reasoning. 2020. Vol. 26. No. 4. Pp. 627-639.
- [22] Goldfarb S., Wong-Lin K., Schwemmer M., Leonard N. E., Holmes P. Can post-error dynamics explain sequential reaction time patterns? Frontiers in Psychology. 2012. Vol. 3. Pp. 213.
- [23] Оксендаль Б. Стохастические дифференциальные уравнения. Введение в теорию и приложения: Пер. с англ. М.: Мир, ООО «Издательство АСТ», 2003. 408 с.
- [24] Iacus S.M. Simulation and inference for stochastic differential equations: with R examples. Springer Science & Business Media, 2009. 300 с.
- [25] Николаева Е.И., Вергунов Е.Г. Что такое "executive functions" и их развитие в онтогенезе. //Теоретическая и экспериментальная психология. 2017. Т. 10. № 2. С. 62-81.
- [26] Kagan J. Reflection-impulsivity: The generality and dynamics of conceptual tempo. Journal of abnormal psychology. 1966. Vol. 71. No. 1. Pp. 17-24.
- [27] Thurstone L.L. A factorial study of perception. University of Chicago Press. 1944.
- [28] Stroop J.R. Studies of interference in serial verbal reactions. J. of Exper. Psychology. 1935. Vol. 18. Pp. 643-662.