

Операциональная модель и методика оценки функционального состояния инженера-конструктора в цифровой деятельности

Н.В. Копылова, П.В. Тюлин

ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», г. Тверь

В статье предложена структурно-операциональная модель встроенной диагностики функционального состояния специалиста цифрового конструкторского труда и методика его оценки с помощью сенсорной компьютерной мыши. Обоснован мультимодальный принцип диагностики, объединяющий самоотчёт, поведенческие показатели взаимодействия с интерфейсом, фотоплетизмограмму и электрокожную активность. Описан протокол регистрации «in situ» при выполнении типовых задач в САД-системе, набор индикаторов, правила их предварительной обработки и интеграции в композитный индекс функционального состояния. Показано, что методика может использоваться для эмпирической проверки динамики функционального состояния инженеров-конструкторов по критериям результативности и «цены деятельности».

***Ключевые слова:** функциональные состояния, инженер-конструктор, сенсорная компьютерная мышь, САД, фотоплетизмограмма, электрокожная активность, динамика мыши, встроенный мониторинг, мультимодальная диагностика.*

Изучение функционального состояния и работоспособности относится к ключевым направлениям психологии труда и инженерной психологии. В прикладном контексте функциональное состояние рассматривается как динамическая структура регуляции деятельности, связанная с эффективностью, безопасностью труда, сохранением здоровья и профилактикой утомления, монотонии и стрессовых реакций [3].

В цифровом труде возрастает доля интеллектуально-операторских задач: высокая информационная плотность, длительное поддержание внимания и частые переключения между микрозадачами создают условия для быстрых колебаний напряжения и утомления. Поэтому эпизодические опросы, медицинские осмотры и разовые тестирования недостаточно чувствительны к текущей динамике состояния и могут нарушать естественный ход работы.

Междисциплинарные обзоры подчёркивают мультисистемный характер стресс-реакций и необходимость учитывать контекстные факторы [8, с. 10]. В отечественной литературе функциональное

состояние трактуется как динамическая структура, обеспечивающая приспособление к требованиям деятельности и формирующаяся на психологическом уровне регуляции поведения [3].

Цель статьи – обосновать мультимодальную модель динамики работоспособности инженера-конструктора в условиях цифрового операторского труда и определить принципы её ненавязчивой реализации с использованием данных взаимодействия с компьютером и встроенных сенсоров, включая сенсорную компьютерную мышь, в логике мониторинга «in situ» [9, с. 51].

Диагностика функционального состояния осложняется тем, что оно не наблюдается непосредственно, а проявляется через комплекс симптомов и зависит от контекста. Одни и те же требования могут вызывать разные состояния и стратегии поведения, а сходные физиологические изменения – иметь разные психологические интерпретации [8]. Поэтому для эмпирических исследований необходима операциональная модель, связывающая регистрируемые показатели с требованиями деятельности и критериями её эффективности.

Ключевым методологическим требованием является разграничение уровней описания. Субъективный уровень представлен переживаемыми признаками состояния (напряжение, тревога, сонливость, усталость). Поведенческий уровень фиксирует изменения эффективности выполнения задач, динамику ошибок и параметры взаимодействия с инструментами. Психофизиологический уровень охватывает показатели активации и напряжения функциональных систем (электродермальную активность, температуру кожи, двигательную активность), а также более медленные эндокринные маркеры, для которых значимы суточные ритмы [8].

В структурно-интегративном подходе функциональное состояние описывается как относительно устойчивая структура актуализируемых внутренних средств, которая отражает механизмы регуляции деятельности и обуславливает её эффективность [3].

Такое понимание задаёт требования к диагностике: интерпретация состояния должна объединять результаты работы и показатели разных уровней проявления, поскольку «оптимальное» состояние всегда соотносено с задачей и условиями её выполнения [3, с. 18].

Предлагаемая нами модель опирается на структурно-интегративное понимание функционального состояния как динамической структуры регуляции деятельности и задаёт три уровня индикаторов: 1) психофизиологические маркеры активации и напряжения; 2) поведенческие признаки выполнения задач и взаимодействия с интерфейсом; 3) субъективные признаки состояния, используемые как «якорь» интерпретации и критерий согласованности каналов.

Основным требованием модели является привязка индикаторов к конкретному виду деятельности – разработке конструкторской документации

в CAD-среде (CAD, от англ. Computer-Aided Design, то есть система автоматизированного проектирования) – и к расширенным критериям эффективности: результативности, стабильности качества и «цене деятельности».

Встроенная (in situ) диагностика реализуется с использованием сенсорной компьютерной мыши КПФ-01 как рабочего инструмента, применяемого непосредственно в процессе деятельности [5].

Результатом применения модели является количественный композитный индекс функционального состояния (ИФС), его качественная интерпретация в зонах «оптимум – напряжение – утомление» и решение о необходимости дополнительной диагностики или регуляторных вмешательств.

Структура предлагаемой модели представлена на рис. 1.

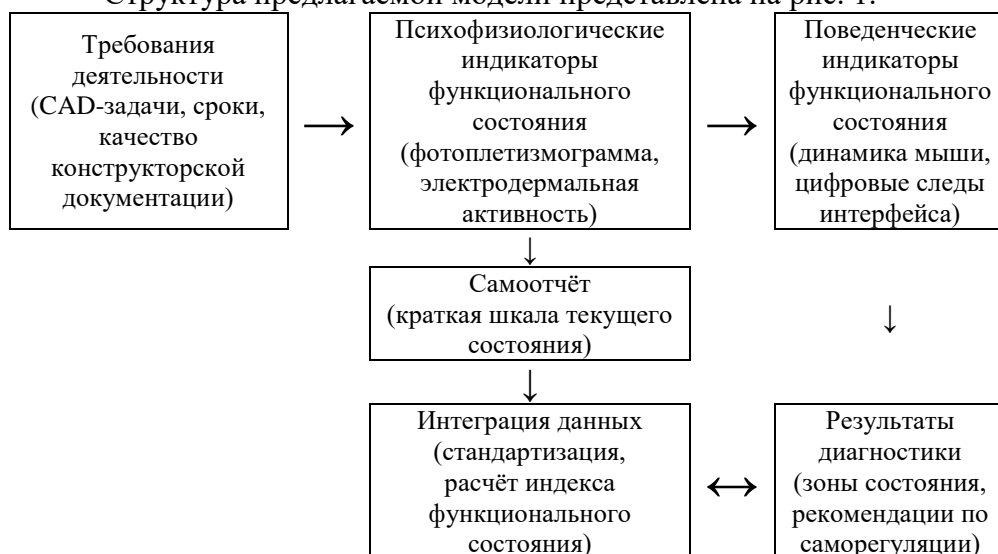


Рис. 1. Структурно-операционная модель встроенной диагностики функционального состояния инженера-конструктора

На рис. 1 представлена логика встроенной диагностики функционального состояния инженера-конструктора в цифровой деятельности. Интерпретация данных строится с учётом параметров профессиональной задачи – типа CAD-операций, временных ограничений и требований к качеству конструкторской документации. В ходе работы регистрируются три группы показателей: психофизиологические, поведенческие и субъективные. К психофизиологическим относятся сигналы, регистрируемые сенсорной компьютерной мышью, к поведенческим – параметры работы с интерфейсом, к субъективным – краткий самоотчёт о текущем состоянии. Их интеграция служит основой для оценки и интерпретации функционального состояния.

На этапе интеграции показатели стандартизируются относительно индивидуального фона и объединяются в композитный индекс функционального состояния. Результатом диагностики являются оценка текущего состояния, его отнесение к одной из зон («норма – напряжение

– утомление») и рекомендации по саморегуляции. Пороги интерпретации уточняются по данным самоотчёта и внешним критериям деятельности.

Для предложенной модели важно учитывать, что работоспособность поддерживается как автоматизированными, так и осознанными механизмами саморегуляции. По мере усложнения задачи возрастает роль сознательного контроля. Это позволяет сохранить результативность деятельности, но нередко сопровождается увеличением её субъективной «цены». Поэтому оценка функционального состояния должна учитывать не только ошибки и скорость работы, но и признаки напряжения, усилия и утомления [2, 3, 10].

Эмпирические данные показывают, что готовность работника отслеживать изменения функционального состояния и использовать осознанные приёмы саморегуляции для предотвращения развития деструктивных состояний связана с ростом профессиональных достижений при сохранении здоровья и психологического благополучия [2, с. 53]. В условиях кратковременной напряженности особое значение имеет способность формировать «целевое» функциональное состояние – состояние высокого соответствия требованиям профессиональных задач и правилам организационного поведения в конкретной ситуации [2, с. 57].

В отношении утомления важно подчеркнуть его многокомпонентный характер. В психологической перспективе утомление может трактоваться не только как «негативное последствие работы», но и как состояние, связанное с контролем целей; в таком подходе усталость рассматривается как эмоциональный сигнал, играющий адаптивную роль в управлении целями [10]. Это позволяет избегать упрощения, когда снижение производительности автоматически приписывается истощению ресурсов: в ряде случаев наблюдаемое ухудшение результатов отражает изменение мотивации, стратегии или распределения внимания.

Для систематизации диагностических подходов выделим четыре взаимодополняющих класса методов: психометрические, поведенческие, психофизиологические и цифровые следы взаимодействия с компьютерными устройствами (см. табл. 1).

Психометрические методики фиксируют субъективную составляющую функционального состояния и широко применяются в исследованиях стресса и утомления. Самоотчёт позволяет судить о переживаемых аспектах состояния, которые не всегда прямо отражаются в показателях эффективности из-за компенсаторных усилий. В предлагаемой модели он используется как дополнительный источник информации и сопоставляется с поведенческими и психофизиологическими показателями.

Перспективным дополнением к традиционным опросникам выступают психосемантические процедуры описания функционального состояния, позволяющие реконструировать индивидуальную систему

значений, связанных с переживанием состояния, и тем самым связать диагностику с контекстом «человек – работа» [1, с. 34]. В психосемантике функционального состояния возможно не только сопоставлять разные состояния по единому набору шкал, но и получать косвенную информацию о том, как сам респондент организует оценивание и различает оттенки переживаний [1, с. 35].

Таблица 1

Карта методов диагностики функционального состояния

Класс методов	Что измеряют	Сильные стороны	Ограничения/ риски интерпретации
Психометрические (самоотчёт)	Субъективный стресс, утомление/ сонливость, аффект, симптомы	Простота; наличие валидированных шкал; прозрачная интерпретация	Реактивность; социальная желательность; ограниченная частота измерений
Поведенческие (эффективность и ошибки)	Скорость, точность, число ошибок, замедление, устойчивость выполнения	Непосредственная связь с результативностью деятельности	Зависимость от задачи и контекста; компенсаторные стратегии могут «скрывать» состояние
Психофизиологические (биосигналы)	Показатели активации/ напряжения (EDA), температура кожи, двигательная активность; эндокринные маркеры	Относительная объективность; чувствительность к динамике	Артефакты; требования к протоколу и биоритмам; неоднозначность интерпретации одиночных сигналов
Цифровые следы (мышь/ клавиатура)	Кинематика движений, паузы, клики; при наличии сенсоров – давление/ контакт	Ненавязчивость; высокая частота; потенциал персонализации моделей	Зависимость от устройства и его настроек, а также от факторов, не связанных непосредственно с функциональным состоянием, включая обученность, стиль работы и особенности задачи.

На практике это реализуется, например, через семантический дифференциал: совмещение классических шкал состояния и семантического дифференциала позволяет анализировать не только уровни выраженности симптомов, но и смысловую структуру описания текущего и

предпочитаемого состояний, что повышает интерпретируемость данных при выраженных межиндивидуальных различиях [1].

Показателен пример исследования утомления в строительной отрасли, где анализировались факторы риска профессиональной усталости и их связь с физическими и когнитивными показателями. В выборке 606 работников показано, что самооценка утомления связана с переживаемыми трудностями выполнения задач, при этом подчёркивается необходимость интерпретации результатов в контексте условий труда и индивидуальных различий [12]. Для цифрового труда аналогичная логика предполагает совместный анализ субъективных признаков перегрузки, параметров деятельности и режима работы.

Поведенческие показатели включают скорость, точность, ошибки, устойчивость внимания и темп работы. В цифровом труде особое значение имеют параметры движения мыши, клики, паузы и динамика ввода, поскольку они регистрируются без дополнительной нагрузки на пользователя и могут отражать изменения внимания, напряжения и утомления.

В исследовании «Under Pressure» предложен комплексный подход к оценке стресса пользователей компьютера на основе сочетания самоотчёта, поведения и сенсорных данных. Протокол включал 30-минутную сессию и манипуляции, направленные на индуцирование стрессовых условий; использовались сенсоры, интегрированные в клавиатуру и мышь, а также носимый браслет. Показано, что комбинированные признаки позволяют дифференцировать стрессовые и нестрессовые условия [9].

Такая операционализация повышает внутреннюю валидность, но ограничивает переносимость в естественные условия, где стрессоры менее контролируемы и более разнообразны. Следовательно, встроенная диагностика требует проверки устойчивости маркеров на реальных рабочих задачах и при вариации контекста.

В работе D. Carneiro с соавторами предложена оценка стресса во время онлайн-экзаменов на основании параметров использования мыши; подчёркивается, что при входе в стрессовую ситуацию изменяется микродинамика взаимодействия с устройством, а модели должны учитывать индивидуальные различия [6]. Тем самым фиксируется принцип персонализации: межиндивидуальные различия в стиле работы с мышью могут быть сравнимы по масштабу с изменениями, обусловленными текущим функциональным состоянием.

В исследовании T. Dias da Silva и M. Postma-Nilsenová рассмотрены перспективы оценки внимания по цифровым следам взаимодействия с компьютером. Авторы изучали связь непроизвольного отвлечения внимания с параметрами динамики движений мыши и показали, что эти параметры могут отражать колебания внимания в процессе выполнения когнитивной задачи [7]. Для диагностики

функционального состояния это важно, поскольку внимание одновременно входит в структуру работоспособности и участвует в её компенсации.

При анализе цифровых следов важно учитывать, чем именно обусловлены изменения регистрируемых показателей: функциональным состоянием пользователя, особенностями задачи, индивидуальным стилем работы или техническими параметрами устройства.

Психофизиологические показатели дают информацию об активации функциональных систем организма и широко применяются при оценке напряжения и стресс-реакций. Однако физиологическая активация может отражать не только стресс, но и физическую активность, эмоции, температуру среды и время суток, поэтому единичные сигналы требуют контекстной интерпретации [8].

В практическом плане для предлагаемой методики значимы психофизиологические сигналы, регистрируемые сенсорной компьютерной мышью КПФ-01. Их использование требует контроля качества контакта с датчиками, пропусков сигнала, искажений записи, вызванных движением руки, и условий регистрации, иначе наблюдаемая динамика может быть ошибочно связана с психологическим состоянием.

Полевое применение носимых технологий иллюстрирует «technology probe» для домашней компьютер-ассистированной физиотерапии. В работе демонстрируется 7-дневное использование носимого устройства с записью сенсорных данных у пациентов, что показывает реализуемость длительного мониторинга в естественных условиях [11, с. 2541]. Методически такие исследования важны для оценки приемлемости технологии, соблюдения режима измерений и устойчивости сигналов.

Для интеграции психофизиологических данных в диагностику функционального состояния необходимо учитывать качество сигнала, контекст измерений и соответствие интерпретации психологическим компонентам состояния. В противном случае возможны ошибки при выводах о состоянии и тем более – при выводах о причинности, что подчёркивается в междисциплинарных обзорах стресса и здоровья [8].

Ключевая методическая проблема мониторинга состоит в выборе критериев функционального состояния и способов проверки диагностической модели. Для её решения целесообразно сочетать самоотчёт, поведенческие и психофизиологические показатели как взаимодополняющие источники данных, а качество модели оценивать по связи с результативностью деятельности и ошибками.

Мультимодальный подход может быть ориентирован на две разные прикладные задачи. Первая состоит в поддержке пользователя, в том числе через рекомендации по режиму работы и перерывам. Вторая связана с диагностикой рисков, способных повлиять на качество деятельности. Соответственно, в первом случае на первый план выходят субъективное благополучие и приемлемость обратной связи, а во втором – прогностическая валидность маркеров ошибок и сбоев.

Учёт индивидуальной нормы пользователя является важным условием повышения валидности встроенной диагностики по цифровым следам, поскольку исследования динамики движений мыши показывают существенную роль межиндивидуальных различий [6].

Индикаторы функционального состояния должны быть связаны как с самим оцениваемым состоянием, так и с внешними результатами деятельности, включая ошибки, снижение качества работы и другие неблагоприятные изменения. Необходимы также процедуры контроля качества данных и исключения искажённых участков записи.

Для прикладного мониторинга важно заранее определить компоненты эффективности, которые будут служить критериями валидации: результативность, «цена деятельности» и способ выполнения. Это позволяет связать встроенные индикаторы с профессиональными нормами и динамикой саморегуляции [2, 3].

В качестве средства контактной регистрации предлагается использовать сенсорную компьютерную мышь КПФ-01, функционально совместимую со стандартной мышью и обеспечивающую одновременную регистрацию фотоплетизмограммы, фазической кожно-гальванической активности и тонического электрокожного сопротивления непосредственно в процессе работы инженера-конструктора [5, с. 28–30].

Регистрация проводится при выполнении типовых операций разработки и оформления конструкторской документации в САД-среде (КОМПАС-3D). Внешними критериями первичной валидации служат качество документации, соблюдение сроков и, при необходимости, нормативные значения трудоёмкости [3, 4].

Протокол регистрации может быть организован по двум схемам. Первая предполагает непрерывную запись сигналов и динамики мыши на протяжении рабочей смены с разметкой значимых событий, включая перерывы, совещания и этапы проверки. Вторая включает индивидуальную калибровку в начале смены и последующую регистрацию показателей в естественной деятельности с пересчётом относительно индивидуального базового уровня.

По данным фотоплетизмограммы рассчитываются интервальные ряды сердечного ритма с контролем искажённых участков записи. Для электрокожных показателей выделяются фазический и тонический компоненты. Поведенческий канал включает параметры микродинамики движений мыши и цифровые следы взаимодействия с интерфейсом – скорость, ускорение, паузы и частоту кликов, чувствительные к изменениям напряжения и утомления [9, с. 51–54].

Для каждого периода регистрации рассчитываются стандартизированные отклонения показателей относительно индивидуального фона. На этапе апробации индекс функционального состояния задаётся как алгебраическая сумма z-оценок ключевых индикаторов с учётом направленности их связи с функциональным состоянием:

$$I_{\text{ФС}} = z(\text{HR}) - z(\text{RMSSD}) + z(\text{SCL}) + z(\text{SCR}_{\text{freq}}),$$

где $I_{\text{ФС}}$ – интегральный индекс функционального состояния: чем выше значение, тем больше выраженность неблагоприятного состояния в выбранной операционализации.

HR – частота сердечных сокращений, уд/мин;

RMSSD – корень из среднего квадрата разностей соседних интервалов между последовательными сердечными сокращениями, мс;

SCL – тонический уровень кожной проводимости;

SCR_{freq} – частота фазических кожно-гальванических реакций за заданный интервал наблюдения.

Таблица 2

Показатели методики и правила их расчёта

Канал/ сигнал	Показатель	Правило расчёта (окно, единицы)	Интерпретация в модели функционального состояния
ФПГ (фотоплетизмограмма)	ЧСС (HR) (Частота сердечных сокращений)	Среднее HR за окно 30–60 с; изменение относительно индивидуального фона	Рост HR при неизменной нагрузке – индикатор активации/напряжения
	Вариабельность сердечного ритма HRV (RMSSD)	RMSSD по рядам RR за 2–5 мин; RR – интервалы между последовательными сердечными сокращениями, мс; изменение относительно фона	Снижение RMSSD – признак напряжения/утомления
ЭКП (Электрокожные показатели): ЭКС (SCL, электрокожное сопротивление)/ КГА (SCR, кожно-гальваническая активность)	Тонический уровень электрокожной активности (ЭКС)	Среднее значение за 30–60 с; контроль дрейфа	Рост тонуca – общая активация, чувствителен к стрессу
	Фазическая кожно-гальваническая реакция (КГР)	Частота/ амплитуда реакций в окне 30–60 с	Учащение реакций – эмоциональное напряжение, реактивность
Данные мыши (журнал событий)	Темп движений	Средняя скорость/ ускорение курсора в окне 1–3 мин	Замедление и рост вариативности – утомление/ снижение внимания
	Паузы и микропаузирование	Доля пауз > 1 с и > 3 с; частота остановок	Рост пауз – снижение устойчивости внимания или экономизация усилий
Работа (критерий)	Стабильность качества конструкторской документации (КД)	Число замечаний/ нормоконтроля/ возвратов на доработку за единицу времени	Рост замечаний при росте индекса ФС – критерий валидности

Валидность индекса функционального состояния оценивается по трём группам критериев: субъективным оценкам текущего состояния, поведенческим индикаторам эффективности и ошибок, а также внешним производственным показателям – соблюдению сроков и количеству замечаний нормоконтроля.

Предлагаемая методика может использоваться для эмпирического изучения изменений функционального состояния инженеров-конструкторов в реальной профессиональной деятельности, а также для разработки индивидуализированных мер профилактики утомления и поддержания оптимального рабочего состояния [2, с. 57].

В статье обоснована структурно-операционная модель встроенной диагностики функционального состояния инженера-конструктора в САД-деятельности. Модель согласует психофизиологические, поведенческие и субъективные индикаторы с требованиями конкретной деятельности и расширенными критериями эффективности.

Предложена методика регистрации и расчёта показателей с применением сенсорной компьютерной мыши и цифровых следов взаимодействия с интерфейсом (см. табл. 2). Описаны два варианта протокола, предварительная обработка данных и интеграция индикаторов в композитный индекс функционального состояния.

Дальнейшая работа предполагает эмпирическую апробацию методики в реальной конструкторской деятельности: проверку надёжности индикаторов, калибровку порогов по индивидуальному фону и внешним критериям качества, оценку прогностической валидности индекса и тестирование персонализированных форматов обратной связи.

Список литературы

1. Абдуллаева М.М. Особенности психосемантического описания функциональных состояний // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. 2019. № 1. С. 34–50.
2. Кузнецова А.С., Титова М.А., Злоказова Т.А. Психологическая саморегуляция функционального состояния и профессиональная успешность // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. 2019. № 1. С. 51–68.
3. Леонова А.Б., Кузнецова А.С. Структурно-интегративный подход к анализу функциональных состояний: история развития и перспективы // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. 2019. № 1. С. 13–33.
4. Типовые нормативы времени на разработку конструкторской документации. ШИФР 13.01.01 (утв. ФГБУ «НИИ ТСС» Минтруда России 07.03.2014 № 003) [Электронный ресурс]. URL: <https://legalacts.ru/doc/typovye-normativy-vremeni-na-razrabotku-konstruktorskoi-dokumentatsii/>.
5. Универсальная психофизиологическая лаборатория – БиоМышь. Компьютерная мышь с датчиком пульса. Руководство пользователя. М.: ООО «НейроЛаб», 2008–2017. 100 с. URL: <http://bio-mouse.ru/>
6. Carneiro D., Novais P., Pêgo J.M., Sousa N., Neves J. Using Mouse Dynamics to Assess Stress During Online Exams // Hybrid Artificial Intelligence Systems

- (HAIS 2015). Lecture Notes in Artificial Intelligence. V. 9121. Cham: Springer, 2015. P. 345–356.
7. Dias da Silva T., Postma-Nilsenová M. Wandering minds, wandering mice: A direct test of the link between mind wandering and human–computer interaction // *Computers in Human Behavior*. 2020. V. 112. Art. 106453.
 8. Ganster D.C., Rosen C.C. Work Stress and Employee Health: A Multidisciplinary Review // *Journal of Management*. 2013. V. 39(5). P. 1085–1122.
 9. Hernandez J., Paredes P., Roseway A., Czerwinski M. Under Pressure: Sensing Stress of Computer Users // *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '14)*. New York: ACM, 2014. P. 51–60.
 10. Hockey R. *The Psychology of Fatigue: Work, Effort and Control*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. xv+272 p.
 11. Huang K., Sparto P., Kiesler S., Smailagic A., Mankoff J., Siewiorek D. A Technology Probe of Wearable In-Home Computer-Assisted Physical Therapy // *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '14)*. New York: ACM, 2014. P. 2541–2550.
 12. Zhang M., Murphy L.A., Fang D., Caban-Martinez A.J. Influence of fatigue on construction workers' physical and cognitive function // *Occupational Medicine*. 2015. V. 65(3). P. 245–250.

Об авторах:

КОПЫЛОВА Наталья Вячеславовна – доктор психологических наук, профессор кафедры «Психология» ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» (170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33), nvkopylova@mail.ru

ТЮЛИН Павел Вячеславович – аспирант, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» (170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33), tyulin.pavel@gmail.com

Operational model and methodology for assessing the functional state of a design engineer in digital work

N.V. Kopylova, P.V. Tyulin

Tver State University, Tver

This article presents a structural-operational model for the embedded assessment of the functional state of specialists engaged in digital design work, together with a methodology for its evaluation using a sensor computer mouse. The study substantiates a multimodal diagnostic approach that combines self-report, behavioral indicators of interaction with the interface, photoplethysmography, and electrodermal activity. It describes an in situ recording protocol for typical tasks performed in a CAD environment, as well as the set of indicators, the rules for their preliminary processing, and their integration into a composite functional state index. The proposed methodology may be used for the empirical assessment of changes in the functional state of design engineers according to the criteria of performance and the «cost of activity».

Keywords: *functional states, design engineer, sensor computer mouse, CAD, photoplethysmography, electrodermal activity, mouse dynamics, embedded monitoring, multimodal diagnostics.*