

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УРОВНЯ КАЧЕСТВА ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОЙ СИСТЕМЫ ОТ ПАРАМЕТРОВ ОРГАНИЗАЦИИ ТРУДОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРА

А.Н. Варнавский (РГРТУ)

На основе имитационной модели, описывающей деятельность работника в виде последовательностей интервалов работы и отдыха, осуществлено моделирование зависимости величины интегральной оценки качества человеко-машинной системы от параметров организации трудовой деятельности оператора. Получены семейства кривых зависимостей частных показателей качества и интегральной оценки качества человеко-машинной системы от числа регламентированных перерывов при различных значениях начальной работоспособности, интенсивностей утомления и восстановления оператора.

**Ключевые слова:** показатели качества, интегральная оценка качества, имитационная модель, GPSS World, интенсивность утомления, интенсивность восстановления, начальное значение работоспособности, число регламентированных перерывов.

### Введение

Проектирование системы «человек-машина» (СЧМ) начинается с определения значений ключевых свойств системы. Такие значения, с одной стороны, влияют на конечную стоимость системы, а с другой — определяют эффективность ее функционирования. Ключевые свойства системы определяют ее качество.

Качество человеко-машинной системы — это совокупность свойств, направленное на удовлетворение тех или иных потребностей человека и общества. Данные свойства закладываются при проектировании системы «человек-машина» и реализуются в процессе эксплуатации. Количественную характеристику того или иного свойства системы, рассматриваемого применительно к определенным условиям ее создания или эксплуатации, называют показателем качества СЧМ [1].

Используя совокупность показателей качества СЧМ, можно оценить эффективность использования такой системы. Можно отметить, что параметры систем могут быть как статическими и не зависеть от времени, так и динамическими и зависеть от времени. Соответственно, актуальной является задача исследования влияния различных статических и динамических факторов и показателей системы на значение величины качества.

Ключевым элементом любой человеко-машинной системы является человек — работник или оператор, параметры функционального состояния и деятельности которого влияют на эффективность функционирования системы.

В работах [1, 2], посвященных качеству СЧМ, уровень качества рассматривается постоянной величиной, которая определяется только параметрами самой системы. Поскольку на показатели функционального состояния оператора влияет организация трудовой деятельности, то целесообразно рассматривать динамику величины качества СЧМ в течение рабочего дня в зависимости от параметров трудовой деятельности.

Целью работы является имитационное моделирование зависимости уровня качества человеко-машинной системы от параметров организации трудовой деятельности оператора.

Для решения поставленной задачи используем модель процесса деятельности работника во времени

[3], на основе экспериментов с которой можно будет определить зависимость величин показателей качества и интегральной оценки качества СЧМ от параметров трудовой деятельности. В качестве параметра трудовой деятельности рассмотрим число регламентированных перерывов для отдыха между отдельными производственными операциями.

### Интегральная оценка качества человеко-машинной системы

Совокупность всех частных показателей определяет интегральную оценку качества СЧМ, которая характеризует эффективность работы системы [1]. При этом каждому частному показателю соответствует свой весовой коэффициент  $a_i$ , характеризующий важность этого показателя в данной системе. Тогда интегральную оценку качества СЧМ можно оценить по формуле:

$$Q_{СЧМ} = \sum_{i=1}^m a_i \left( \frac{E_i}{E_{opt\ i}} \right)^{k_i}, \quad (1)$$

где  $m$  — число учитываемых частных показателей,  $E_i$  — абсолютное значение  $i$ -го частного показателя;  $E_{opt\ i}$  — оптимальное (максимальное или минимальное) значение  $i$ -го частного показателя, которое имеет существующая или проектируемая аналогичная система «человек-машина»,  $k_i = 1$  — для показателя, возрастание которого приводит к увеличению эффективности СЧМ (например, надежность, безопасность, своевременность и т. п.),  $k_i = -1$  для показателя, возрастание которого приводит к уменьшению эффективности СЧМ (например, время решения задачи, погрешность и т. п.);

$$\sum_{i=1}^m a_i = 1.$$

Для большинства систем «человек-машина» основными показателями качества являются быстродействие, надежность, точность, своевременность и безопасность труда.

### Имитационная модель процесса деятельности оператора человеко-машинной системы

В имитационной модели [3] процесс трудовой деятельности оператора представим в виде перио-

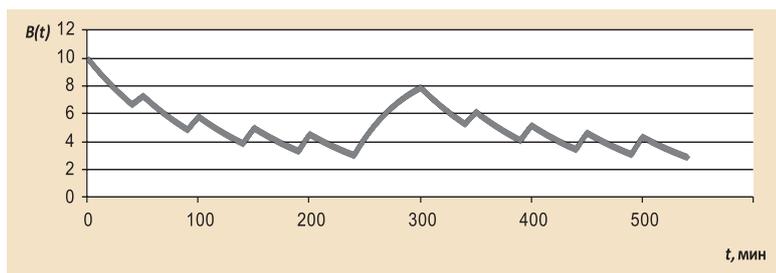


Рис. 1. Зависимость работоспособности  $V(t)$  от времени в течение рабочего дня

дической последовательности рабочих интервалов, в течение которых происходит выполнение производственных операций, снижение работоспособности и нарастание утомления, разделенных перерывами для отдыха (микропаузы, регламентированные перерывы, обеденный перерыв), в течение которых происходит снижение утомления и восстановление работоспособности.

Примем длительности рабочего дня, интервалов деятельности, интервалов отдыха, обеденного перерыва за  $T$ ,  $T_w$ ,  $Tr$ ,  $Td$  соответственно. Пусть число интервалов деятельности равно  $n$  и является четным, т.е. число интервалов до обеденного перерыва равно числу интервалов после обеденного перерыва и равно  $n/2$ , номер интервала деятельности обозначим за  $i$ :  $i = 1 \dots n$ . Момент времени  $tw_i$  является началом  $i$ -го интервала деятельности, а момент времени  $tw_i + Tr$  — началом  $i$ -го интервала отдыха, следующего за соответствующим интервалом деятельности. За интервалом деятельности с номером  $i = n/2$  следует обеденный перерыв. В момент времени  $t=0$  начала работы работоспособность максимальна и равна  $B(0)$ .

Для аналитического описания изменения работоспособности  $B(t)$  на интервалах трудовой деятельности при интенсивном выполнении работ будем использовать экспоненциальный закон с коэффициентом  $\mu_u$ , соответствующим интенсивности накопления утомления [4]:

$$B(t) = B(tw_i) \cdot e^{-\mu_u \cdot (t - tw_i)},$$

а для аналитического описания изменения работоспособности  $B(t)$  в течение отдыха — экспоненциальный закон с коэффициентом  $\mu_v$ , соответствующим интенсивности восстановления работоспособности:

$$B(t) = (B(0) - B(tw_i + Tr)) \cdot (1 - e^{-\mu_v \cdot (t - (tw_i + Tr))}) + B(tw_i + Tr).$$

По результатам регрессионного анализа экспериментальных значений уровней работоспособности при интенсивных операциях и отдыха после них, определяемых в различные моменты времени, был установлен экспоненциальный характер функции  $B(t)$ . Данный анализ может использоваться и для определения коэффициентов  $\mu_u$ ,  $\mu_v$  в зависимостях  $B(t)$  для каждого человека-оператора.

На рис. 1 представлен пример полученной зависимости  $B(t)$  в течение рабочего дня.

Рабочая деятельность оператора человеко-машинной системы характеризуется рядом параметров: временем обработки информации, точностью работы, числом правильно решенных задач, числом своевременно решенных задач, вероятностью правильных действий в опасной или вредной ситуации. Поскольку работоспособность оператора определяет эффективность его деятельности, то для построения модели функционирования СЧМ и оценки ее быстродействия, надежности, точности, своевременности и безопасности труда целесообразно ввести

совокупность коэффициентов, которые свяжут уровень работоспособности человека-оператора с конкретными параметрами его работы:  $k_{ц}$  — коэффициент времени обработки информации,  $k_{он}$  — коэффициент точности работы,  $k_{пр}$  — коэффициент правильности решения задач,  $k_{св}$  — коэффициент своевременности решения задач,  $k_{ош i}$  — коэффициент ошибочности действий в  $i$ -й опасной или вредной ситуации.

Смысл данных коэффициентов заключается в том, насколько уровень работоспособности влияет на значения конкретных параметров деятельности. В соответствии с таким смыслом коэффициентов можно ввести в модель следующие выражения для оценки изменения параметров деятельности человека-оператора при изменении уровня работоспособности с течением времени:

— времени обработки информации  $t_1(t)$ :

$$t_1(t) = k_{ц} / B(t); \quad (2)$$

— точности работы в моменты деятельности  $\Delta Y(t)$ :

$$Y(t) = k_{он} (B(0) - B(t)); \quad (3)$$

— числа правильно решенных задач  $m_{пр}(t)$ :

$$m_{пр}(t) = k_{пр} B(t); \quad (4)$$

— числа своевременно решенных задач  $m_{св}(t)$ :

$$m_{св}(t) = k_{св} B(t); \quad (5)$$

— вероятности правильных действий в  $i$ -й опасной или вредной производственной ситуации:

$$P_i(t) = k_{ош i} B(t). \quad (6)$$

Значения коэффициентов для каждого оператора могут быть определены по результатам его тестирования эмпирическим путем.

Примем, что в течение рабочего дня периодически возникают задачи примерно одинаковой трудоемкости, подлежащие решению. В каждую единицу времени решается только одна задача, а длительности интервалов времени между наступлением соседних задач одинаковые.

Определим функцию интегрального (суммарного) значения работоспособности за рабочий день только на интервалах деятельности оператора от числа регламентированных перерывов:

$$BS(n) = \sum_{j=1}^{n/2} \int_{(Tw+Tr)(j-1)}^{(Tw+Tr)j-Tr} B(t) dt + \sum_{j=n/2+1}^n \int_{(T+Td)/2+(Tw+Tr)(j-n/2-1)-Tr}^{(T+Td)/2+(Tw+Tr)(j-n/2-1)+Tr} B(t) dt.$$

Данная функция может использоваться для определения общей производительности труда [3] и среднего уровня работоспособности за рабочий день. Она зависит от значений параметров  $B(0)$ ,  $\mu_w$ ,  $\mu_v$ , то есть биологических свойств и текущего функционального состояния оператора, и имеет максимум при определенном значении  $n = n_{opt}$ .

#### Моделирование динамики показателей качества человеко-машинной системы с течением времени

На динамику работоспособности оказывают влияние различные производственные факторы, в частности, параметры трудовой деятельности, например число регламентированных перерывов для отдыха за рабочий день. Осуществим моделирование динамики показателей качества СЧМ с течением времени и рассмотрим их вариации при изменении числа регламентированных перерывов для отдыха за рабочий день.

1. Быстродействие СЧМ  $T_u$  характеризуется временем прохождения информации по замкнутому контуру «человек — машина» [1]:

$$T_u(t) = \sum_{i=1}^k t_i(t), \quad (7)$$

где  $t_i$  — время задержки (обработки) информации в  $i$ -м звене СЧМ;  $k$  — число последовательно соединенных звеньев СЧМ, в качестве которых могут выступать как технические элементы, так и операторы.

Примем, что звено  $i = 1$  является оператором, а остальные звенья — элементы машин. Тогда выражение (7) можно переписать как:

$$T_u(t) = t_1(t) + \sum_{i=2}^k t_i,$$

где  $t_1$  — время обработки информации оператором.

На основе мгновенных значений  $T_u(t)$  с учетом выражения (2) можно определить среднее значение времени обработки информации оператором за рабочий день, учитывая такую обработку только в интервалы его работы:

$$\overline{T_u}(n) = k_u \frac{T - Td - (n-2)Tr}{BS(n)} + \sum_{i=2}^k t_i.$$

2. Точность работы человека-оператора характеризуется величиной погрешности, с которой осуществляется измерение, установка или регулирование требуемого параметра системы. Данная величина  $\Delta I$  определяется как модуль разности между фактически измеряемым (регулируемым) оператором значением этого параметра  $I_{on}$ , и своим истинным (номинальным) значением параметра  $I_n$  [1]:

$$Y(t) = |I - I(t)|.$$

Величину  $I_{on}$  с учетом выражения (3) определим как:

$$I_{on} = I_n \pm \Delta Y(t) = I_n \pm k_{on} \cdot (B_0 - B(t)).$$

Тогда

$$Y(t) = |I_n - I_n \pm k_{on} \cdot (B_0 - B(t))| = k_{on} \cdot (B_0 - B(t)).$$

На основе динамики  $Y(t)$  в течение рабочего дня можно определить среднее значение погрешности  $\bar{Y}$ :

$$\bar{Y}(n) = k_{on} \left( B_0 - \frac{BS(n)}{T - Td - (n-2)Tr} \right).$$

3. Надежность работы СЧМ можно определить как безошибочность (правильность) решения стоящих перед системой задач. Для ее оценки используется вероятность правильного решения задачи, определяемая по отношению [1]

$$P_{np} = \frac{m_{np}}{N} = 1 - \frac{m_{ou}}{N},$$

где  $m_{np}$ ,  $m_{ou}$  и  $N$  — статистические данные являющиеся числом правильно решенных, ошибочно решенных и общим числом решаемых задач.

Учитывая динамику работоспособности с течением времени и, соответственно, зависимость от времени числа правильно решенных задач и выражение (4), для оценки надежности будем использовать среднее значение вероятности правильного решения задачи:

$$\overline{P_{np}}(n) = k_{np} \frac{BS(n)}{T}. \quad (8)$$

4. Своевременность решения задачи СЧМ можно оценить вероятностью того, что стоящая перед системой задача будет решена за время, не превышающее допустимое [1]:

$$P_{cv} = \frac{m_{cv}}{N} = 1 - \frac{m_{nc}}{N},$$

где  $m_{cv}$ ,  $m_{nc}$  и  $N$  — статистические данные, являющиеся числом своевременно решенных, несвоевременно решенных и общим числом решаемых задач.

Среднее значение вероятности своевременного решения задач за рабочий день с учетом выражения (5) будет определяться как:

$$\overline{P_{cv}}(n) = k_{cv} \frac{BS(n)}{T}. \quad (9)$$

5. Общий показатель надежности СЧМ характеризует способность системы качественно (правильно) и своевременно решать все поставленные задачи. Соответственно, некачественное и несвоевременное решение задачи приводит к не достижению цели, стоящей перед СЧМ. Поэтому общий показатель надежности может быть рассчитан по следующей формуле [1]

$$P_{СЧМ} = P_{np} P_{cv}.$$

Используя формулы (8) и (9), можно записать выражение для определения среднего значения общего показателя надежности:

$$\overline{P_{СЧМ}}(n) = k_{np} k_{cv} \frac{(BS(n))^2}{T^2}.$$

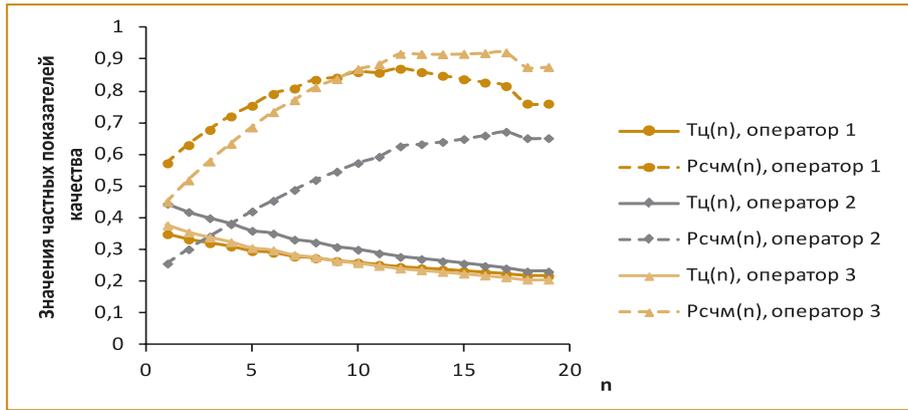


Рис. 2. Пример семейства кривых зависимостей  $\overline{T}_y(n)$  и  $\overline{P}_{СЧМ}(n)$  для трех разных операторов

6. Безопасность труда человека в системе «человек-машина» оценивается вероятностью того, что во множестве опасных или вредных производственных ситуациях оператор выполнит правильные действия. Для ее оценки можно использовать вероятность безопасной работы СЧМ, определяемой по выражению [1]:

$$P_{\text{бт}} = 1 - \sum_{i=1}^q P_{\text{воз}i} P_{\text{ош}i} = 1 - \sum_{i=1}^q P_{\text{воз}i} (1 - P_{\text{верн}i}),$$

где  $P_{\text{воз}i}$  — вероятность возникновения опасной или вредной для человека производственной ситуации  $i$ -го типа;  $P_{\text{ош}i}$  — вероятность неправильных действий оператора в  $i$ -й ситуации;  $q$  — число возможных травмоопасных ситуаций.

Учитывая динамику работоспособности с течением времени и, соответственно, зависимость от времени вероятности неправильных действий оператора и выражение (6), для оценки безопасности труда будем использовать среднее значение вероятности безопасной работы за рабочий день:

$$\overline{P}_{\text{бт}}(n) = 1 - \sum_{i=1}^q P_{\text{воз}i} \left( 1 - k_{\text{верн}i} \frac{BS(n)}{T - Td - (n-2)Tr} \right).$$

В программе GPSS World [5] проведена серия экспериментов с имитационной моделью процесса деятельности оператора при разных значениях  $n$ . В результате каждого эксперимента определялись значения частных показателей качества СЧМ.

Построены семейства кривых зависимостей значений частных показателей качества СЧМ от  $n$  при различных значениях параметров  $B(0)$ ,  $\mu_u$ ,  $\mu_v$ , т.е. фактически для операторов с разными биологическими свойствами и текущими функциональными состояниями. На

рис. 2 в качестве примера представлены семейства кривых зависимостей  $\overline{T}_y(n)$  и  $\overline{P}_{СЧМ}(n)$  для трех разных операторов СЧМ.

Анализ зависимостей средних значений частных показателей качества СЧМ за рабочий день от числа регламентированных перерывов позволяет сделать два вывода.

Во-первых, все зависимости значений показателей от  $n$  можно разделить на два типа: показатели, которые монотонно возрастают или убывают при увеличении  $n$ , и показатели, которые имеют максимум (минимум), т.е. сначала возрастают (убывают) с увеличением числа интервалов отдыха, а затем убывают (возрастают) при дальнейшем увеличении  $n$ .

Во-вторых, значения  $B(0)$ ,  $\mu_u$ ,  $\mu_v$  влияют на модификации кривых зависимостей значений частных показателей качества СЧМ от числа  $n$ .

**Моделирование зависимости интегральной оценки качества человеко-машинной системы от числа регламентированных перерывов для отдыха между отдельными производственными операциями**

Поскольку средние значения частных показателей качества за рабочий день зависят от числа регламентированных периодов отдыха, то и интегральная оценка качества системы «человек-машина» также зависит от этого числа. Выделив в качестве частных показателей свойства быстродействия, точности, надежности, своевременности и безопасности труда, формулу (1) запишем в виде

$$Q_{СЧМ}(n) = a_1 \frac{T_{y \min}}{T_y(n)} + a_2 \frac{Y_{\min}}{Y(n)} + a_3 \frac{\overline{P}_{np}(n)}{P_{np \max}} + a_4 \frac{\overline{P}_{cv}(n)}{P_{cv \max}} + a_5 \frac{\overline{P}_{СЧМ}(n)}{P_{СЧМ \max}} + a_6 \frac{\overline{P}_{бт}(n)}{P_{бт \max}}.$$

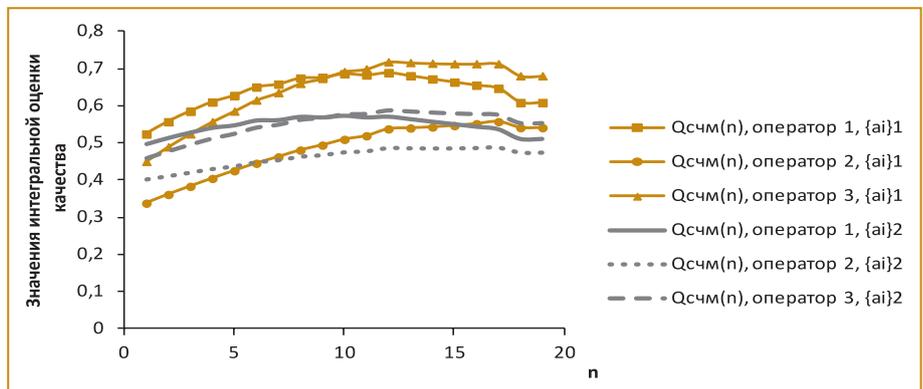


Рис. 3. Пример зависимости интегральной оценки качества СЧМ с разными операторами от числа регламентированных перерывов при различных значениях совокупности весовых коэффициентов  $\{a_i\}$

В зависимости от того, какие параметры наиболее важны для получения результатов деятельности СЧМ, выбирается соответствующая совокупность весовых коэффициентов  $\{a_{ij}\}$ . Например, если эффективность деятельности системы в первую очередь определяется ее надежностью, то коэффициент  $a_5$  будет иметь наибольшее значение среди других коэффициентов. Если критичным показателем является быстродействие, то коэффициент  $a_1$  должен иметь большое значение.

На рис. 3 представлены примеры семейств кривых зависимостей  $Q_{СЧМ}(n)$  для СЧМ с тремя разными операторами при двух различных совокупностях  $\{a_{ij}\}$ . В первой совокупности наибольшее значение имеет коэффициент  $a_5$ , соответствующий общему показателю надежности системы, а во второй — коэффициент  $a_1$ , соответствующий показателю быстродействия системы. Из рисунка видно, что интегральная оценка качества СЧМ зависит как от индивидуальных свойств операторов, то есть значений  $B(0)$ ,  $\mu_u$ ,  $\mu_v$ , так и от значения числа интервалов отдыха  $n$ . В зависимости от коэффициентов меняется значение  $n_{opt}$ .

#### Заключение

В работе рассмотрена задача моделирования зависимости величины интегральной оценки качества человеко-машинной системы от параметров организации трудовой деятельности, в частности, от числа регламентированных перерывов для отдыха между отдельными производственными операциями. Данная оценка фактически является показателем эффективности деятельности системы «человек-машина». Осуществлено моделирование зависимости влияния числа регламентированных перерывов на значения частных показателей качества.

Результаты моделирования показали, что при использовании методики по регламентации времени на отдых и числа перерывов, в которой такие значения задаются постоянными в зависимости только от типа производственных работ, имеет существенный недостаток, связанный с тем, что отсутствие учета текущих значений  $B(0)$ ,  $\mu_u$ ,  $\mu_v$  может привести к снижению значения интегральной оценки качества от максимально возможного.

Значения  $B(0)$ ,  $\mu_u$ ,  $\mu_v$  могут быть определены перед началом работы путем проведения тестирования [6], по результатам которого возможна оценка интенсивностей утомления и восстановления, максимальной работоспособности. Далее возможна оценка значения  $n = n_{opt}$  для каждого оператора в зависимости от его индивидуальных свойств, назначения системы и ее наиболее важных свойств, при котором интегральная оценка качества максимальна.

*Варнавский Александр Николаевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник/доцент  
Рязанского государственного радиотехнического университета.  
Контактный телефон (4912) 46-03-43.  
E-mail: varnavsky\_alex@rambler.ru*

При этом в работе использовались некоторые упрощения и допущения, в частности, считалось, что продолжительности всех интервалов работы и перерывов одинаковые, интенсивности накопления утомления и восстановления работоспособности не меняются в течение рабочего дня (хотя может присутствовать не довосстановление), в модели рассматривались линейные зависимости показателей эффективности деятельности от уровня работоспособности. Усложнение модели будет предпосылкой следующих отдельных исследований. В частности, планируется исследовать поведение функции  $BS(n)$  и определить изменение производительности труда и уровня качества системы при увеличении продолжительности интервалов отдыха к концу рабочего дня как при неизменных значениях интенсивностей накопления утомления и восстановления утомления, так и при изменении этих интенсивностей по мере трудовой деятельности.

Результаты работы могут использоваться при проектировании и разработке системы «человек-машина» на этапе определения и формирования требований как к самой системе, так и к человеку-оператору, а также для оптимальной организации работы оператора в человеко-машинной системе и повышения эффективности ее использования. Результаты моделирования на этапах проектирования СЧМ могут использоваться при решении такой важной задачи, как перераспределение функций между оператором и машиной [7].

#### Список литературы

1. *Медяник В. А.* Необходимость учета проблем безопасности при исследовании механизма адаптации человека-оператора в системе «человек-машина-среда» // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні — Луганськ: вид-во СНУ ім. В. Даля. 2010.
2. *Пряжников, Н. С.* Психология труда и человеческого достоинства: учеб. пособие для вузов / Н. С. Пряжников, Е. Ю. Пряжникова. — М.: Издательский центр «Академия». 2004.
3. *Варнавский А. Н.* Имитационное моделирование производительности труда работника при разных вариантах организации производственных работ // Автоматизация в промышленности. 2013. №7. С. 55-59
4. *Дружинин Г. В.* Учет свойств человека в модулях технологий. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика». 2000.
5. *Томашевский В., Жданова Е.* Имитационное моделирование в среде GPSS. М.: Бестселлер. 2003.
6. *Основы профессионального психофизиологического отбора / Н. В. Макаренко, Б. А. Пухов, Н. В. Кольченко и др.* Киев: Наук. Думка. 1987.
7. *Рыбников О. Н.* Психофизиология профессиональной деятельности. М.: Изд. центр «Академия». 2010.