Вестник научно-технического развития
Bulletin of Science and Technical Development

Номер 164, 2022г.

DOI: 10.18411/vntr2022-164

Издается с 2007 года

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.

ISSN 2070-6847

Журнал выпускается под научным руководством Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН

DOI: 10.18411/vntr2022-164

ОГЛАВЛЕНИЕ № 164, 2022

Виталий Сергеевич Кузнецов, Валерия Алексеевна Екимовская. Усилия от пульсационной составляющей ветра на здания призматической формы.....**стр. 3 - 9**

Лидия Ивановна Куксенова, Сергей Андреевич Поляков. Методологические основы выбора состава латуней для узлов трения скольжения в среде поверхностно-активных смазочных материалов……..……**стр. 10 – 22**

Исак Наумович Статников, Георгий Игоревич Фирсов. Особенности планирования и обработки результатов активных экспериментальных исследований биомеханических систем на примере анализа взаимодействия зрительного и вибротактильного каналов передачи сенсорной информации..……**стр. 23 – 37**

Александр Анатольевич Шульженко, Михаил Борисович Модестов, Борис Михайлович Модестов, Анна Александровна Шульженко. Моделирование тепловых процессов при различных параметрах слоев многослойной тонкой стенки: человек – тканый электронагреватель…..……**стр. 38 – 44**

Издание зарегистрировано в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации Эл. № ФС77-29768.

Федеральная служба
по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи
и охраны культурного наследия

СВИДЕТЕЛЬСТВО
О РЕГИСТРАЦИИ СРЕДСТВА МАССОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Эл № ФС77-29768 от 04 октября 2007 г.

Название «Интернет-журнал «Вестник научно-технического развития» vntr.ru»

Адрес редакции 109029, г. Москва, ул. Нижегородская, д. 32, корп. 15, оф. 404

Примерная тематика и (или) специализация
Информационно-аналитическая, научная; реклама до 20 %

Форма периодического распространения электронное периодическое издание

Язык(и) русский, английский

Территория распространения Российская Федерация, зарубежные страны

Учредитель (соучредители) ЗАО «Национальная Технологическая Группа» (109029, г. Москва, ул. Нижегородская, д. 32, корп. 15, оф. 404)

Заместитель Руководителя С.К. Ситников

Начальник Управления разрешительной работы в сфере СМИ М.Ю. Козлов

001727

ISSN 2070-6847

DOI: 10.18411/vntr2022-164-1

УДК 624.012.3

УСИЛИЯ ОТ ПУЛЬСАЦИОННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ВЕТРА НА ЗДАНИЯ ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

© Виталий Сергеевич Кузнецов, Валерия Алексеевна Екимовская
МГСУ, Москва, Россия
KuznetsovVS@mgsu.ru
Lera.ek00@mail.ru

Аннотация. *Пульсационная ветровая нагрузка является важной составляющей общей ветровой нагрузки, в значительной мере, влияющей на напряженно-деформированное состояние зданий и сооружений. На величину и траекторию действия пульсационной нагрузки влияют: вид ландшафта, условия застройки, конфигурация, жесткость здания и др. Влияние вида и величины пульсационной нагрузки изучалось на примере многоэтажных железобетонных каркасных зданий, высотой до 80 метров с различными пропорциями ветровой поверхности, что соответствует большинству типовых проектов жилых и гражданских зданий. В работе выявлялись и устанавливались корреляционные связи коэффициентов пульсации с высотой здания его формой. Для вертикальных элементов каркаса вычислялись усилия от действия пульсационной нагрузки, при различных формах ее представления. Сравнительный анализ показал неоднозначность результатов, допускающих возможность превышения или недогруженности конструкций зданий. Установление локальных участков зданий с возможными превышениями расчетных нагрузок позволяет прогнозировать расположение начальных очагов прогрессирующего разрушения.*
Ключевые слова: *железобетон, здания, элементы, фронтальная поверхность, коэффициент пульсации, ветровая нагрузка, анализ, усилия, ветер.*

EFFORTS OF THE PULSATING WIND COMPONENT ON PRISMATIC BUILDINGS

© Vitaliy Sergeevich Kuznetsov, Valeria Alekseevna Ekimovskaya
MGSU, Moscow, Russia
KuznetsovVS@mgsu.ru
Lera.ek00@mail.ru

Abstract. *Pulsating wind load is an important component of the overall wind load, which significantly affects the stress-strain state of buildings and structures. The magnitude and trajectory of the pulsation load are affected by: the type of landscape, building conditions, configuration, rigidity of the building, etc. The influence of the type and magnitude of the pulsation load was studied on the example of multi-storey reinforced concrete frame buildings, up to 80 meters high with different proportions of the wind surface, which corresponds to most typical residential and*

civil building projects. In the work, correlations of pulsation coefficients with the height of the building and its shape were identified and established. For the vertical elements of the frame, the forces from the action of the pulsation load were calculated, with various forms of its representation. Comparative analysis has shown the ambiguity of the results, allowing for the possibility of exceeding or underloading the structures of buildings. The establishment of local sections of buildings with possible excess design loads allows you to predict the location of the initial foci of progressive destruction.

Keywords: *reinforced concrete, buildings, elements, frontal surface, ripple coefficient, wind load, analysis, forces, wind.*

Обеспечение прочности, долговечности и сохранения эксплуатационных свойств здания или сооружения невозможно без постоянного совершенствования методов расчета строительных конструкций, уточнения расчетных схем и действующих нагрузок. По мере накопления новых экспериментальных данных, выявления нестыковок или противоречий, положения норм уточняются и закрепляются законодательно. В полной мере это относится к ветровым нагрузкам и воздействиям. Так совокупность воздействия окружающей среды и желание максимально удешевить сооружение привели к чрезмерным колебаниям моста (танцующий мост) в Волгограде в 2010 году [1]. Глобальное изменение климата, влияние ландшафта, окружающей застройки и других факторов неизбежно влияет на распределение и величины ветровых нагрузок [2]. Очевидно, что неверная оценка ветровой нагрузки и применение ее в проектной практике может привести или к перегрузке отдельных элементов здания, провоцирующих аварийную ситуацию или к созданию необоснованных запасов прочности, что увеличивает расход конструкционных материалов и стоимость объекта в целом [3,4].

Нормативное значение ветровой нагрузки, определяется, согласно «СП 20.13330. Нагрузки и воздействия. Актуализация СНиП 2.01.07-85* 2016», (далее СП 20.13330), в соответствии с формулой (1).

$$W = W_m + W_p, \quad (1)$$

Здесь

W_m –средняя составляющая основной ветровой нагрузки (подробное исследование W_m для зданий аналогичного класса, выполненное авторами, изложено в [5] и в настоящей работе ее влияние не рассматривалось).

W_p – пульсационная составляющая ветровой нагрузки.

Распределение пульсационной составляющей ветровой нагрузки W_p, основанное на статистических данных метеостанций Росгидромета и закрепленное в (СП 20.13330), принималось в виде (2)

$$W_p = W_m \xi(z_e) \nu, \quad (2)$$

где

$\xi(z_e)$- коэффициент пульсации давления ветра,

z_e- эквивалентная высота, (высота от поверхности земли до расчетной отметки),

ν-коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра, оценивающий ориентацию ветровой поверхности и ее пропорции.

Исследуемым компонентом формулы (2) является коэффициент пульсации ζ, величина которого достигает максимума на поверхности земли и уменьшается с набором высоты. Установочные параметры для определения коэффициента корреляции зависят от типа местности, где расположен объект. Тип А-открытые пространства, степи, побережья и др, тип В - равномерная городская застройка с препятствиями не более 10 метров, С-городская

застройка со зданиями высотой более 25 метров. На рис. 1 представлена графическая интерпретация коэффициентов пульсации давления ветра $\xi(z_e)$, вычисленных в соответствии с формулой (3) до высоты 80 метров для различных типов местности.

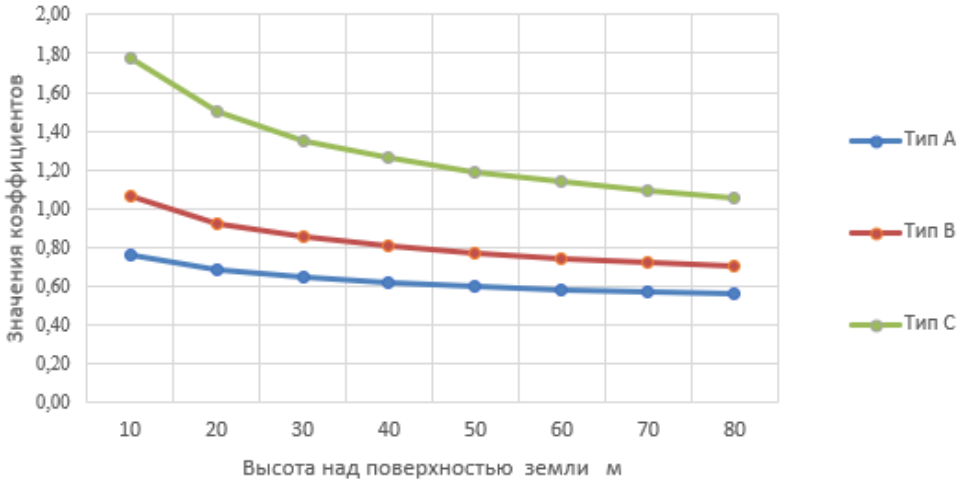


Рис.1. Коэффициенты пульсаций для различных типов местности

$$\zeta(z_e) = \zeta_{10}\left(\frac{z_e}{10}\right)^{-\alpha} \quad (3)$$

Здесь ξ_{10}-коэффициент пульсационного ветрового давления, на высоте 10 м над уровнем земли, z_e -эквивалентная высота. Для местности типа «В» ξ_{10}=1,06; α-эмпирический коэффициент, учитывающий тип местности (для типа В α=0,2).

Для дальнейшей разработки использовалось распределение коэффициента пульсации ζ, соответствующее местности типа В, как наиболее распространенное в строительстве населенных пунктов.

В настоящее время нормы рекомендуют использовать дискретное (ступенчатое) распределение коэффициента ζ (рис.2) в зависимости от пропорций фронтальной поверхности и эквивалентной высоты z_e.

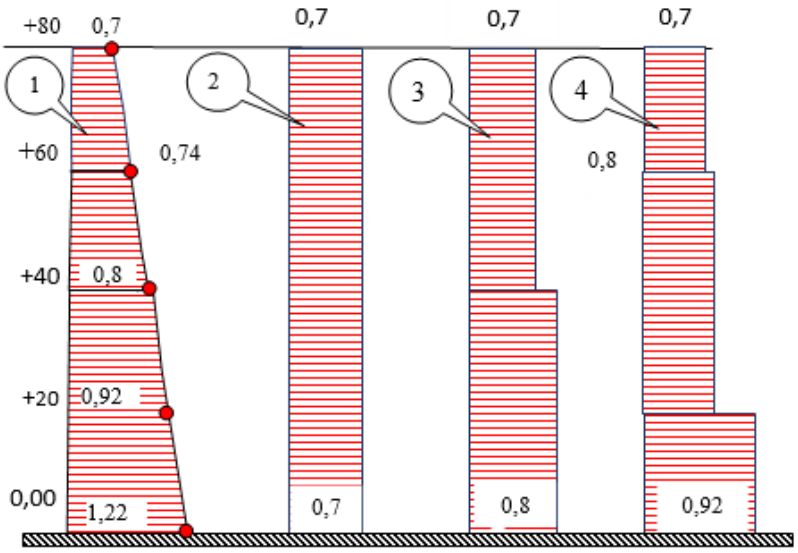


Рис.2. Распределение коэффициентов пульсации по высоте.

1-классическое; 2- условное, для поверхности 80х80м; 3-условное, для поверхности 80х40м; 4-условное, для поверхности 80х20 м.

Для зданий с габаритами: ***d*** - размер в направлении, перпендикулярном расчетному направлению ветра; ***h*** - высота здания эквивалентная высота вычисляется в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1

Габариты здания	Условия вычисления эквивалентной высоты
При $h \le d$	$z_e = h$
При $d < h \le 2d$	для $z \ge h-d \rightarrow z_e = h$
	для $0 < z \le h-d \rightarrow z_e = d$
При $h > 2d$	для $z \ge h-d \rightarrow z_e = h$
	для $d < z < h-d \rightarrow z_e = z$
	для $0 < z \le d \rightarrow z_e = d$

Для сооружений и их конструктивных элементов установление пульсационной составляющей ветра W_p зависит от величины частоты собственных колебаний f_i и предельных значений f_l, Гц. Как правило, для большинства жилых и гражданских железобетонных зданий первая частота собственных колебаний f_1 больше предельного значений f_l [6,7].

В качестве объекта (модели) исследования принимались, широко распространённые каркасные железобетонные здания, призматического очертания с размерами фронтальной ветровой поверхности $h \times d$ = (80×80 м), (80×40 м) и (80×20 м), нагруженные пульсационной ветровой нагрузкой нормальной к поверхности с наветренной стороны и расположенные в местности типа В.

Исследование заключалось в установлении распределения пульсационной ветровой нагрузки по высоте, согласно принятым в нормах зависимостям, установлении степени их влияния на действующие усилия при различных пропорциях здания и выявлении участков (вертикальных элементов), испытывающих нагрузки, превышающие расчетные значения.

На основе полученных форм распределения пульсационных коэффициентов, определялась общая нагрузка на фронтальную поверхность и вычислялись изгибающие моменты для наветренной стороны здания, расположенного в местности типа «В».

Нагрузка на напорную поверхность (шириной 1 метр) в декартовой системе координат определяется площадью A_{ze} криволинейной трапеции, ограниченной графиком функции (3) и прямыми $z_e=a$ и $z_e=b$, соответствующими высотным диапазонам, формула (4).

$$A_{ze} = ckw_0 L\zeta_{10} \int_a^b (z_e/10)^{-\alpha} dz_e \qquad (4)$$

В формуле (4)

c-аэродинамический коэффициент, k-коэффициент надежности по нагрузке, w_0-нормативное давление ветра, L-ширина грузовой полосы, $(z_e/10)^{-\alpha}$ -подынтегральная функция, a и b-верхний и нижний пределы интегрирования, ξ_{10}- значение коэффициента пульсации ветра на высоте 10 м от уровня земли.

Коэффициенты c, k, w_0, L -в выражении (4) являются константами, в одинаковой степени, влияющими на абсолютные значения аргумента, при любых распределениях коэффициента пульсации и которые в последующем анализе не учитывались.

Если пределы интегрирования соответствуют отметкам высот этажей здания, то усилия равны ярусным (поэтажным) силам, если равны высоте здания, то общей нагрузке на напорную поверхность, высотой 80 метров и шириной 1 метр.
В таблице 2 представлены значения нагрузки ***P***, вычисленные при различных формах распределения коэффициентов пульсации ξ.

Таблица 2

Форма (рис. 2)	Тип здания	Нагрузка на полосу 1×80 м P	Отношение $(P_i/P_1)100\%$	Отклонение %
1	Все	P_1=69,93	100	0
2	(80×80) м	P_2=56	80	20
3	(80×40) м	P_3=60	85,8	14,2
4	(80×20) м	P_4=64,2	91,8	8,2

Видно, что величины суммарного давления ***P*** зависят от вида распределения коэффициентов пульсации ξ. Наибольшая потеря нагрузки до 20% наблюдается в зданиях 80×80 м, наименьшая 8,2% в зданиях 80×20 м.
Напряженно-деформированное состояние характеризуется распределением (эпюрами) усилий изгибающих моментов и поперечных сил. Для вычисления изгибающих моментов, здание представлялось в виде консоли, жестко соединенной с фундаментом, загруженной нагрузкой, соответствующей принятой форме коэффициента пульсации. Эпюры изгибающих моментов при классическом распределении коэффициента пульсации ветра вычислялись после определения ярусных сил с длиной участка 10 м (рис. 3.1); при иных вариантах распределения коэффициентов как от ступенчатой равномерно распределенной нагрузки (рис. 3.2; 3,3; 3,4). Численные значения ординат изгибающих моментов для всех форм распределения коэффициентов пульсации представлены на рис.3.

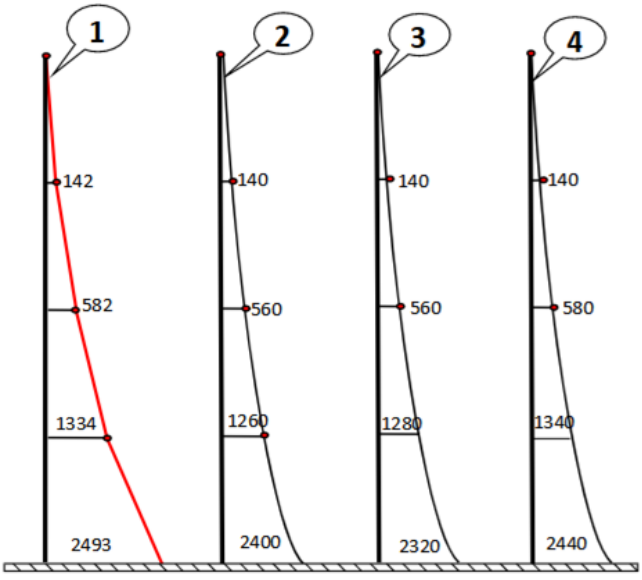
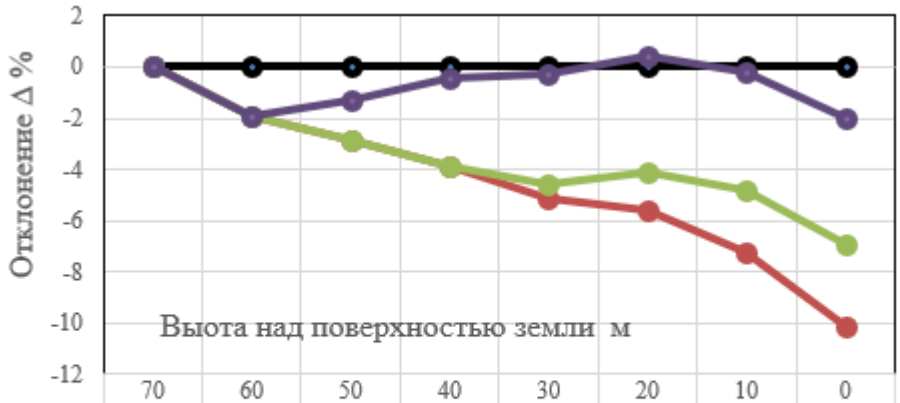


Рис.3. Эпюры изгибающих моментов от нагрузки, численно равной коэффициентам пульсаций.

Сравнение результатов вычислений, показывает, что наибольшие отклонения моментов Δ_i=100%(M_i-M_1)/M_1 от эталонного значения имеют здания с конфигурацией фасада 80×80 метров Δ_2= -10.15%, наименьшие с размерами 80×20 метров Δ_4= (-2+1) %. Таким образом ступенчатое представление коэффициентов пульсации, обеспечивает наилучшее совпадение с эталонным для объектов башенного типа и широко корпусных зданий [8]. При увеличении ширины фронтальной поверхности амплитуда расхождений возрастает (рис.4).



	70	60	50	40	30	20	10	0
Δ1	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Δ2	0,00	-1,89	-2,84	-3,90	-5,15	-5,59	-7,25	-10,15
Δ3	0,00	-1,89	-2,84	-3,90	-4,61	-4,09	-4,81	-6,94
Δ4	0,00	-1,89	-1,30	-0,46	-0,27	0,40	-0,16	-1,97

Рис.4. Расхождение моментов.

Влияние отклонений становится более заметным при оценке усилий в абсолютных величинах. Например, для зданий, расположенных в ветровом районе «1», Москва или Ярославль, в соответствии с картой районирования (СП 20.13330), нормативное давление ветра w_0=0,23кПа (23 кгс/м^2), для наветренной стороны c=0.8, ширина условной полосы L=1 м. В этом, конкретном случае, значение изгибающего момента на уровне нулевой отметки M= 642,19 кНм и максимальное расхождение (при Δ=0,1015 (рис. 4)) ΔM= 0,1015·642,19 =89,91кНм.

Таким образом, в процессе исследования установлено, что применение предложенных нормами вариантов распределения пульсационной ветровой нагрузки, для заданий названных типов не дает однозначных результатов, свидетельствующих о корректности и надёжности получения расчетных усилий в системах данного типа.

Установлены локальные участки зданий с наибольшими отклонениями усилий, где расчетные моменты в вертикальных элементах, могут превышать значения, первоначально заложенные при проектировании объекта.

Представленные результаты позволяют уточнять распределение ветровых пульсационных нагрузок на здания с различными пропорциями фронтальной поверхности для использования в практике проектирования.

Список литературы

1. Платонов А.С. Уроки аварий конструкций мостов // Транспортное строительство. - 2009. - № 6. - С. 6–9.

2. Алексеева А.А., Васильев Е.В., Бухаров В.М. Прогноз сильных шквалов на Европейской территории России и их идентификация доплеровскими радиолокаторами // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. - 2017. - Вып. 363. - С. 47-64.
3. Ким Д.А. Анализ ветрового воздействия на здания и сооружения// Инженерный вестник Дона. – 2020. - №12.
4. Belal A.A. Typological analysis of architectural forms of Arab cities // Sustainable development of territories : collection of doll. II International Scientific.- practical conf. - M., 2019. - P. 108-110.
5. Кузнецов В.С., Шурушкин А.А. Усилия в зданиях призматической формы при различном распределении ветрового воздействия // Строительство и реконструкция. – 2021. - № 4.
6. Могилюк Ж.Г., Подувальцев В.В. Нормативные проблемы расчета динамических параметров зданий и сооружений // Компетентность. – 2020. - №10.
7. Koiter, W.T., The effective width of flat plates for various longitudinal edge conditions at loads far beyond the buckling load //National Luchtvaart Laboratorium (The Netherlands). - 2017. - Rep. No. 5287.
8. Галямичев А.В. Ветровая нагрузка и её действие на фасадные конструкции // Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – 2017. doi: 0.18720/CUBS.60.4.

References

1. Platonov A.S. Lessons of accidents of bridge structures // Transport construction. - 2009. - No. 6. - P. 6-9.
2. Alekseeva A.A., Vasiliev E.V., Bukharov V.M. Forecast of strong squalls on the European territory of Russia and their identification by Doppler radars // Hydrometeorological studies and forecasts. - 2017. - Issue 363. - P. 47-64.
3. Kim D.A. Analysis of wind impact on buildings and structures// Engineering Bulletin of the Don. – 2020. - No. 12.
4. Belal A.A. Typological analysis of architectural forms of Arab cities // Sustainable development of territories : collection of dokl. II International Scientific.- practical conf. - M.. 2019. - P. 108-110.
5. Kuznetsov V.S., Gurushkin A.A. Efforts in buildings of prismatic shape with different distribution of wind impact // Construction and reconstruction. – 2021. - No. 4.
6. Mogilyuk Zh.G., Poduvaltsev V.V. Normative problems of calculating dynamic parameters of buildings and structures // Competence. – 2020. - No. 10.
7. Koiter, W.T., The effective width of flat plates for various longitudinal edge conditions at loads far beyond the buckling load //National Luchtvaart Laboratorium (The Netherlands). - 2017. - Rep. No. 5287.
8. Galyamichev A.V. Wind load and its effect on facade structures // Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. - 2017. doi: 0.18720/CUBS.60.4.

Дата поступления: 5 февраля 2022 г.

DOI: 10.18411/vntr2022-164-2

УДК 669.01:621.8.0316

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВЫБОРА СОСТАВА ЛАТУНЕЙ ДЛЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ В СРЕДЕ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Лидия Ивановна Куксенова[1], Сергей Андреевич Поляков[2,1]

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

lkukc@mail.ru

[2]МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия

serpol50z@rambler.ru

Аннотация. *Масштаб применения медных сплавов для триботехнических целей постоянно расширяется, что связано с возможностью реализации в парах трения явления избирательного переноса, обеспечивающего существенное повышение их работоспособности. Представлены характеристики структурного состояния зоны контактной деформации при трении латуней в среде активных смазочных материалов. Установлено, что для обеспечения экстремально высоких триботехнических характеристик традиционно используемых латуней необходима гомогенность сплава и соответствующий концентрационный интервал растворимости легирующего элемента в твердом состоянии, позволяющий развитие макроскопического диффузионного потока, направленного к свободной поверхности зоны контактного взаимодействия, сопровождающийся растворением легирующих элементов сплава в смазочной среде. Для промышленных сплавов, применяемых в триботехнике, эта область ограничена, как правило, пятью-восемью процентами цинка. Предложена модель, описывающая роль механохимических и хемомеханических эффектов, возникающих при трении в поверхностно-активной смазочной среде, определяющих комплекс структурных превращений в зоне деформации и реализацию явления избирательного переноса.*

Ключевые слова: *медные сплавы, латуни, структура, контактная деформация, трение, износ, поверхностно-активные смазочные материалы, явление избирательного переноса.*

METHODOLOGICAL BASES FOR CHOOSING THE COMPOSITION OF BRASSES FOR SLIDING FRICTION UNIT IN THE ENVIRONMENT OF SURFACE-ACTIVE LUBRICANTS

Lidiya I. Kuksenova[1], Sergey A. Polyakov[2,1]

[1]Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Mechanical Engineering named after. A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

lkukc@mail.ru

[2]MSTU im. N.E. Bauman, Moscow, Russia

serpol50z@rambler.ru

Abstract. *The scale of application of copper alloys for tribological purposes is constantly expanding, which is associated with the possibility of implementing the phenomenon of selective transfer in friction pairs, which provides a significant increase in their performance. The characteristics of the structural state of the contact deformation zone during friction of brass in the medium of active lubricants are presented. It has been established that to ensure extremely high tribotechnical characteristics of traditionally used brasses, the homogeneity of the alloy and the corresponding concentration range of the solubility of the alloying element in the solid state are necessary, which allows the development of a macroscopic diffusion flow directed to the free surface of the contact interaction zone, accompanied by the dissolution of the alloying elements of the alloy in the lubricating medium. For industrial alloys used in tribotechnics, this area is usually limited to five to eight percent zinc. A model is proposed that describes the role of mechanochemical and chemomechanical effects arising from friction in a surface-active lubricating medium, which determine the complex of structural transformations in the deformation zone and the implementation of the selective transfer phenomenon.*
Key words: *copper alloys, brass, structure, contact deformation, friction, wear, surface-active lubricants, selective transfer phenomenon.*

Введение. Проблема повышения надежности, долговечности и безопасности эксплуатации машин тесно связана с задачами обеспечения работоспособности узлов трения, износостойкости конструкционных материалов, их совместимости в триаде трения. Однако при конструировании узлов и их изготовлении сопротивляемость износу материалов чаще всего рассматривается как узкоспецифическое свойство по отношению к внешнему воздействию, а выбор материалов осуществляется в соответствии с разнообразными технологическими и экономическими требованиями.

Объемы применения меди и медных сплавов в качестве антифрикционных материалов постоянно увеличиваются, что обосновано положительным эффектом при трении, связанным с реализацией правила положительного градиента механических свойств по толщине поверхностного слоя в условиях контактной деформации и явления избирательного переноса (практической безызносности). Результаты научных исследований выявили несколько направлений наиболее эффективного применения этих материалов для триботехнических целей: в качестве основного антифрикционного сплава в парах трения медный сплав - сталь; покрытия в парах трения из разных конструкционных материалов; пленок, получаемых в условиях штатной эксплуатации в разных средах, в частности, в металлоплакирующих смазочных материалах. Они выявили разнообразие технических решений, способствующих изменению износостойкости материалов узлов трения. Однако эффекты применения этих решений часто оказываются противоречивыми. Есть основания полагать, что среди многообразия причин получения несопоставимых результатов особое место занимает отсутствие методологии выбора состава антифрикционного материала (медного сплава) с учетом конкретных условий эксплуатации.

Известно, что износостойкость материала зависит от характеристик механических свойств и прежде всего от его твердости, которая в свою очередь определяется элементным составом сплава. Поэтому в условиях граничной смазки при смазывании инактивным смазочным материалом, например, индустриальным маслом, износостойкость бронзы БрАЖ9-4 оказывается примерно на 30% выше, чем бронзы БрОЦС5-5-5. При трении в пластичном смазочном материале Солидол износостойкость БрАЖ9-4 в два раза выше, чем БРОЦС5-5-5 (при прочих одинаковых условиях) [1,2]. Опыт экспериментальных исследований показывает, что в условиях смазывания активным смазочным материалом может произойти

инверсия рядов износостойкости, что обусловлено изменением других характеристик механических свойств, в первую очередь, пластичности приповерхностных слоев материалов [3].

Ряд новых отраслей науки, возникших в XX веке, в первую очередь, физико-химическая механика материалов [4], позволили сформулировать условия, при которых механические свойства материалов могут существенно меняться под воздействием среды, в том числе, в направлении многократного повышения пластичности. При этом трибологические исследования показали, что влияние активной среды проявляется в комплексном воздействии на механические свойства материалов в связи с механохимическими, хемомеханическими и диффузионными эффектами [3,5,6]. Износостойкость, оцениваемая через величину, обратную интенсивности изнашивания, существенно изменяется при реализации указанных эффектов через характеристику пластичности.

Зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки имеет, как правило, степенную форму, а ее наиболее простой вариант имеет вид:

$$I_h = \kappa P^m,$$

где I_h – интенсивность изнашивания; κ – размерный коэффициент, характеризующий механические свойства материала и геометрические характеристики изнашиваемой детали, пронормированный на длину пути трения: $\kappa = A_{ном}/2\pi rHBn$, $A_{ном}$ – номинальная площадь контакта, r - средний радиус закругления шероховатости, НВ – твердость, n − характеристика пластичности; P – отношение нормальной нагрузки к номинальной площади контакта (среднее номинальное давление); m − показатель степени, учитываемый в случае нелинейности зависимости интенсивности изнашивания от нагрузки. Для оценки пластичности часто используют величину предельной деформации при разрыве, однако эта характеристика недостаточна в условиях поверхностной (контактной) деформации при трении [3]. Поэтому авторами данной работы величина n интерпретируется как соотношение между фактической и максимально допустимой деформацией при трении, определяемой специальным рентгенографическим методом послойного неразрушающего анализа зоны деформации металла при трении [6].

Из выражения для величины κ видно, что увеличение значений твердости и пластичности приводит к уменьшению интенсивности изнашивания. Однако, если твердость в результате термической обработки может изменяться в 1,5−2 раза, то пластичность приповерхностных слоев в результате действия активной смазочной среды и формирования динамической структуры в условиях контактной деформации может изменяться на порядки [3,5,7]. При этом одной из важных составляющих формирования такой структуры в медном сплаве является фазовый состав и совокупное количество легирующих элементов.

Данная работа посвящена обобщению экспериментальных результатов исследований структурных изменений и триботехнических свойств распространенных латуней с позиций влияния количества легирующих элементов и фазового состава на износостойкость сплава в условиях трения скольжения в активной смазочной среде с учетом механохимических и хемомеханических эффектов, возникающих в процессе контактной деформации **с целью** разработки методологических основ выбора медного сплава триботехнического назначения для эксплуатации в условиях поверхностно-активной смазочной среды.

Материалы и методики исследования. В качестве объекта исследования была выбрана пара реверсивного трения скольжения сплав Cu-Zn − сталь в поверхностно- активной смазочной среде. Испытания проводили на машинах трения МТ-1 и МТ-8 с возвратно-поступательным движением плоских поверхностей. Выбранная схема испытаний

характеризуется тем, что поверхности трения испытывают воздействие знакопеременных сдвиговых деформаций, интенсифицирующих механохимические, хемомеханические процессы и эффект пластифицирования, что в совокупности позволяет наиболее достоверно выявить роль природы смазочной среды в условиях поверхностной контактной деформации. Дополнительно использовали методику испытаний на машине АЕ-5, которая соответствует ГОСТ 23.224-86 и позволяет определять коэффициент трения f и интенсивность изнашивания I_h при скольжении трех пальчиковых образцов из сплавов Cu-Zn по стальному диску. Выбор антифрикционных сплавов основывался на особенностях кривой растворимости легирующего элемента в меди в твердом состоянии. Так как сплавы Cu-Zn являются преимущественно однофазными примерно до 39% Zn, то испытывались латуни Л90, Л80, Л68, Л63, а также специально изготовленные сплавы с содержанием цинка 3, 8, 15, 30, 39, 43, 46, 50, 55, 93 % мас.

Структурное состояние поверхностей трения анализировали с помощью методов световой и электронной микроскопии, Оже-спектроскопии, рентгеноструктурного анализа, микротвердости. Наибольшее количество экспериментальных результатов, представленных в статье, получено с помощью рентгеноструктурного анализа как наиболее информативного для изучения структурных изменений, определяющих механические характеристики металла; при этом рентгеносъемки в Co-Kα излучении проводились с помощью специального метода, позволяющего послойно сканировать зону контактной деформации при трении, не подвергая ее разрушению [6]. Для анализа особенностей структуры поверхностных слоев пары трения с позиций фрикционного материаловедения использовали экспериментально полученную совокупность макроскопических критериев (показателей потерь на трение и износ) и микроскопических (физическое уширение рентгеновских линий материала зоны контактной деформации, отражающей плотность дефектов дислокационной природы, характеристики механических свойств материала зоны деформации, а также период кристаллической решетки, отражающий изменение элементного и фазового состава). Анализ проводился на основе связи между феноменологическими и структурными критериями состояния материала зоны контактной деформации, установленной в рамках системно-структурного подхода [8].

Результаты и их обсуждение. С позиций износостойкости как структурно-чувствительного свойства многообразие существующих способов повышения износостойкости металлических материалов условно делят на две основные группы: способы направленного воздействия на поверхность трущихся тел и способы, в основе которых заложен принцип реализации внутренних субструктурных резервов материалов в условиях контактной деформации. Практика триботехнических испытаний при возрастающих требованиях поиска методов и средств повышения надежности и долговечности узлов трения указывает на особую актуальность комплексного использования внутренних резервов традиционно применяемых конструкционных материалов триботехнического назначения при трении в поверхностно-активных смазочных средах. Ярким таким примером является реализация в паре трения явления избирательного переноса, приводящего пару трения в режим практической безызносности [9].

Рассмотрим основные структурные изменения в зоне контактной деформации при трении по стали в поверхностно-активной смазочной среде медных сплавов Cu-Zn с широкой областью растворимости основного легирующего элемента в твердом состоянии.

На рис.1 приведено изменение периода кристаллической решетки сплавов Cu-Zn (латуней) по глубине поверхностных слоев в исходном состоянии, кривые 1, и деформированных при трении в среде глицерина, кривые 2,3 (известно, что глицерин в результате трибохимических

реакций становится поверхностно-активной пластифицирующей средой по отношению к латуни). Видно, что происходит существенное изменение как состава α-твердого раствора, так и фазового состава зоны деформации в целом. Можно отметить следующие особенности:
- в отличие от исходного состояния (кривые 1) в результате трения поверхностный слой является многослойным материалом, состоящим из сформировавшегося в результате трения слоя меди (кривые 2) и слоя α-твердого раствора цинка в меди с измененным параметром решетки (кривые 3). Наличие поверхностной пленки меди подтверждено анализом с помощью световой и электронной микроскопии, ее состав – с помощью микроспектрального анализа [6];
- причина формирования двухслойной структуры связана с тем, что в поверхностном деформированном слое возникают значительные сжимающие напряжения первого рода, поэтому вследствие различия атомных объемов цинка и меди (~28%) цинк из поверхностного пластифицированного слоя удаляется, создается макроскопический диффузионный поток, направленный к поверхности контакта, формируя пленку чистой меди [10];

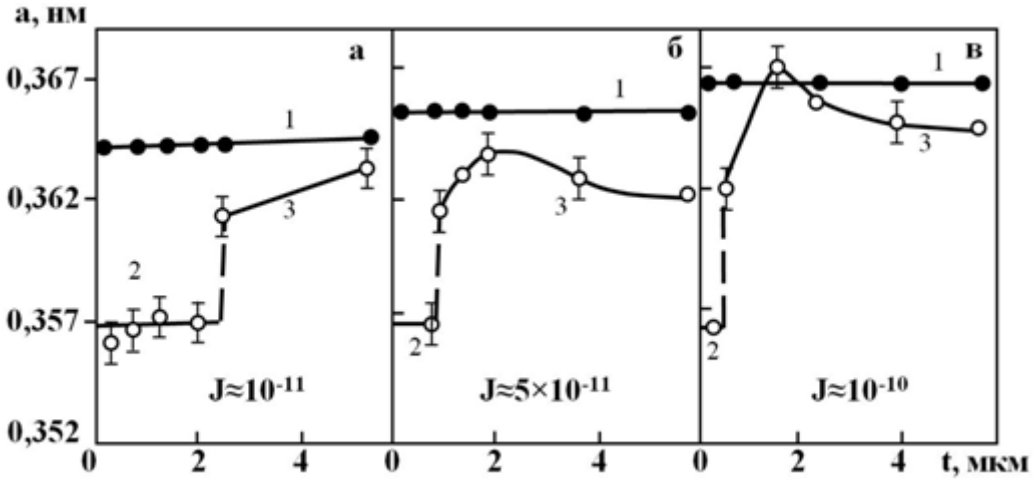


Рис.1. Изменение периода кристаллической решетки α-твердого раствора латуней по глубине зоны деформации при трении в среде глицерина (Р=10 МПа): а – Л90; б – Л80; в– Л63. 1 – α-твердый раствор до трения; 2 – пленка меди, 3 − α-твердый раствор после трения

- в подповерхностном слое, рис.1, кривые 3, формируется положительный градиент параметра решетки латуни, что свидетельствует об обеднении этого слоя атомами цинка в результате процесса восходящей диффузии, стимулированной сжимающими внутренними напряжениями в зоне деформации при трении, и растворением их в поверхностно-активной смазочной среде [10];
- при трении латуни Л90 (рис.1а) толщина пленки меди составляет ~2 мкм, а в подповерхностном слое с увеличением глубины происходит равномерное увеличение концентрации цинка до значений, характерных исходному состоянию;
- в сплавах с более высокой концентрацией цинка (латуни Л80 и Л63), рис.1б,в, также создается двухслойная структура зоны деформации, однако толщина пленки меди существенно меньше (~1мкм в Л80 и ~0,5 мкм в Л63). В этих сплавах кривая изменения периода решетки твердого раствора с увеличением толщины анализируемого слоя имеет максимум в глубине зоны контактной деформации, что указывает на формирование локальных неоднородностей сплава по химическому составу и является причиной

экспериментально наблюдаемого увеличения интенсивности изнашивания: Л90 – I_h~10^{-11}; Л80 – 10^{-10}, Л63 – 10^{-9} (при давлении 10 МПа).

В табл. 1 в качестве сравнения приведены данные по изменению концентрации легирующих элементов в поверхностных слоях сплавов Cu-Zn при сухом трении [11,6].

Таблица 1

Концентрация легирующего элемента

Сплав	Средняя концентрация легирующего элемента в растворе, % масс.		Увеличение концентрации элемента, %
	Исходное состояние	После трения	
Cu – Zn	26,1 ± 0,04	27,2 ± 0,2	4,2
Cu - Zn	20,1 ± 0,3	20,6 ± 0,4	2,5
Cu - Zn	8,0 ± 0,3	8,5 ± 0,3	6,2

В отличие от трения в среде активного смазочного материала, когда имеет место значительное снижение концентрации цинка в сплаве вплоть до образования пленки чистой меди, в условиях сухого трения [11,12] и трения в неактивной смазочной среде [6], наоборот, происходит увеличение концентрации легирующих элементов в поверхностном слое, что является, как показано в [13], результатом упругого взаимодействия атомов растворенного вещества с дислокациями, генерируемыми в процессе трения.

Рассмотрим результаты испытаний на износ сплавов Cu-Zn в среде глицерина. В табл. 2 приведены данные по интенсивности изнашивания специально изготовленных сплавов Cu-Zn.

Таблица 2

Интенсивность изнашивания сплавов Cu-Zn

Давление, МПа	Концентрация цинка, % масс.				
	3	8	30	43	50
3,1	$1,8 \times 10^{-11}$	$1,8 \times 10^{-10}$	$2,8 \times 10^{-10}$	$4,0 \times 10^{-10}$	$5,0 \times 10^{-9}$
7,5	$1,2 \times 10^{-11}$	$1,2 \times 10^{-10}$	$1,2 \times 10^{-10}$	$2,5 \times 10^{-9}$	$7,0 \times 10^{-9}$

Видно, что с увеличением концентрации цинка в сплаве растет интенсивность изнашивания. Наибольшая износостойкость соответствует сплаву с низкой концентрацией цинка. Следует отметить, что для сплавов, состав которых соответствует области концентраций от 3 до 30% Zn, интенсивность изнашивания снижается с ростом нагрузки. Это свойство является отличительным признаком эффекта избирательного переноса, поэтому реализация в паре трения этого явления дает наилучший результат при эксплуатации тяжелонагруженных узлов.

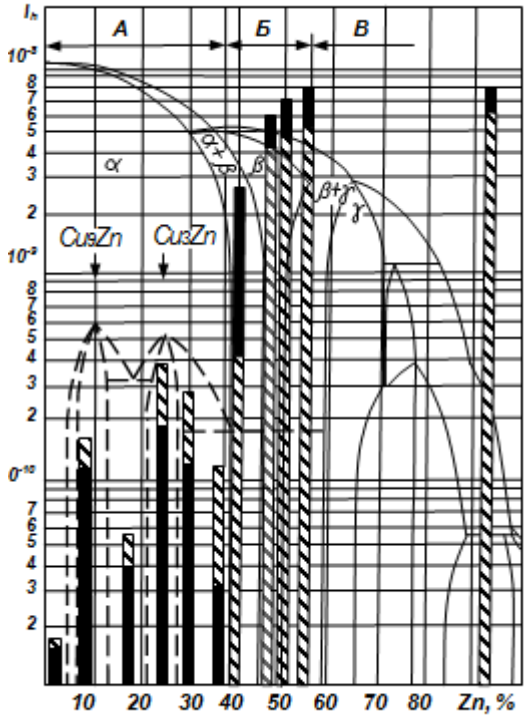


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания латуней (показана столбиками) от содержания цинка на фоне диаграммы состояния медь – цинк (в среде глицерина): зачерненная часть столбика – интенсивность изнашивания при давлении 7,5 МПа, заштрихованная – 3,1 МПа [14]

На рис.2 приведены гистограммы интенсивности изнашивания сплавов разного элементного и фазового состава в зависимости от концентрации сплавов на фоне диаграммы состояния Cu-Zn. Для варьирования концентрации легирующего элемента использовался набор латуней с различным содержанием цинка – 3, 8, 15, 23, 30, 39, 43, 46, 50, 55 и 93% [14].

Как следует из рис.2, в области А (то есть от 0 до 39% цинка) имеет место конверсия износостойкости по отношению к нагрузке – с ростом нагрузки интенсивность изнашивания уменьшается. Высокая износостойкость (I_h~10^{-11}) соответствует только концентрации менее 5%, что соответствует области оптимального проявления явления избирательного переноса. Причина этого – в механизме избирательного растворения, который, приводя к растворению в смазочной среде цинка, создает условия для формирования медной пленки. Следует особенно подчеркнуть, что даже в области α-твердого раствора (до ~39%Zn, участок А на рис.2) наблюдается немонотонное изменение уровня поверхностного разрушения при трении; причем в области концентраций цинка, соответствующих составам Cu_9Zn и Cu_3Zn наблюдается наиболее высокий износ. В концентрационных областях Б и В (концентрация цинка более 39%, рис.2), износ сплавов Cu-Zn увеличивается практически на два порядка.

Анализируя диаграмму состояния Cu-Zn и интенсивности изнашивания сплавов в широком диапазоне концентраций цинка, рис.2, в совокупности с результатами структурных изменений в зоне контактной деформации при трении, рис.1, можно полагать, что

формирование структурной неоднородности в подповерхностном слое, входящем в состав зоны деформации, создает предпосылки формирования новых структурных составляющих типа Cu_9Zn, Cu_3Zn и др., которые приводят к повышению твердости и понижению пластичности поверхностного слоя, в результате уровень поверхностного разрушения материала значительно повышается. Следовательно, при назначении латуни для пары трения антифрикционный сплав – сталь в среде активного смазочного материала целесообразно отдавать предпочтение сплавам с минимальной концентрацией цинка, которая соответствует области α - твердого раствора Cu-Zn, в которой реализация локальных микродиффузионных процессов мало вероятно; для этих сплавов при трении на поверхности формируется высокопластичная медная пленка и реализуется стабильный режим высокой износостойкости.

При трении в поверхностно-активной среде механохимические и хемомеханические эффекты представляют собой результаты совместного действия механических и химических факторов, возникающих в силу того, что механическое воздействие ускоряет, активирует химические реакции, а химическое взаимодействие на поверхности, в частности, избирательное растворение легирующих элементов, через изменение структуры влияет на механические свойства материала.

Для описания указанных эффектов при контактной деформации была предложена модель, основанная на термодинамической концепции, в которой учитываются перекрестные эффекты. В частности, если в системе уравнений неравновесной термодинамики в качестве характеристического параметра (параметра оптимизации) рассматривается скорость пластической деформации, то влияние активности среды может учитываться членом, содержащим величину химического потенциала, возникающего при совместном действии деформации и среды. Введя коэффициенты, принятые для изотермической задачи и включающие температуру как коэффициент типа ΣL_{ij} , получаем уравнения в виде:

$$d\varepsilon_i/dt = \Sigma L_{ij}\,\Delta\tau_j - \Sigma L_{ij}\,\Delta\mu_j \qquad (1)$$

$$dn_i/dt = \Sigma L_{ij}\,\Delta\mu_j - \Sigma L_{ij}\,\Delta\tau_j\ , \qquad (2)$$

где $d\varepsilon_i/dt$ − скорость пластической деформации, $\Delta\tau_j$ − градиент напряжений в приповерхностных слоях материала, $\Delta\mu_j$ − градиент химического потенциала, возникающий в области контакта в связи с деформацией и действием среды, dn_i/dt − скорость химического процесса.

Уравнения (1) и (2) представляют физически обоснованную математическую модель, в которой входными факторами являются термодинамические силы, а соответствующие потоки – параметрами оптимизации. Однако замерять в процессе трения параметры $d\varepsilon_i/dt$ и dn_i/dt затруднительно, поэтому целесообразно найти удобный для определения эквивалент одной из этих величин. Как показано в [15], на эту роль можно предложить коэффициент трения. С этой целью проводили испытания на трехпальчиковой машине; указанные материалы приведены в табл.3.

Таблица 3

Входные факторы при планировании эксперимента

Уровни варьирования	Входные факторы							
	Давление		Упрочняемость мягкого материала (бронзы, безразмерная)		Активность смазочного материала (безразмерная)		Упрочняемость твердого материала (стали, безразмерная)	
Обозначение, размерность	Натуральное	Кодовое	Натуральное	Кодовое	Натуральное	Кодовое	Натуральное	Кодовое
	P, МПа	γ_1	$\psi\ (\Delta\mu_1)$	γ_2	$\Delta\mu_2$	γ_3	$\psi\ (\Delta\mu_3)$	γ_4
Верхний	20	1	6(медь)	1	Глицерин	1	6 30ХГСА	1
Нижний	10	-1	2(бронза)	-1	МС-20	-1	2 Х18Н9Т	-1

Было разработано соответствующее регрессионное уравнение, представляющее собой такую математическую модель, в которой в качестве параметра оптимизации взят коэффициент трения *f*. Оно было получено путем преобразования уравнения (1) к виду обычного регрессионного уравнения, используемого при планировании эксперимента, т.е. с добавлением нулевого коэффициента β_0, регрессионных коэффициентов типа $\beta_к$ вместо L_{ij} и перекрестных членов типа $\Sigma\,\beta_{кm}\ \mu\,\Delta\tau_k\,\Delta\mu_m$:

$$f = \beta_0 + \Sigma\,\beta_к\,\Delta\tau_k + \Sigma\,\beta_m\Delta\mu_m + \Sigma\,\beta_{кm}\,\mu\,\Delta\tau_k\,\Delta\mu_m\,, \qquad (3)$$

где $\beta_к\,\Delta\tau_k = \Sigma L_{ij}\,\Delta\tau_j$, $\beta_m\,\Delta\mu_m = \Sigma L_{ij}\Delta\mu_j$.

Суммирование в уравнении регрессии относится к различным способам варьирования входных факторов. Так, $\Delta\tau_k$ можно варьировать как нагрузкой, так и подбором материала по степени фрикционного упрочнения ψ. Входящие факторы в уравнении получены из термодинамических соотношений, которые, в свою очередь, сформулированы на основе рассмотрения зоны элементарного контакта [16]. Термодинамические силы являются входящими факторами уравнения регрессии. Планирование эксперимента проводилось на основе данных табл.3.

Отметим, что в эксперименте при замене материала меняется соответственно и химический потенциал изменяемого элемента трибосистемы, поэтому материалы обозначены символами μ_1, μ_2, μ_3. Это связано с тем, что при замене смазочного материала меняется его химическая активность и соответственно химический потенциал. Для твердых материалов упрочнение представляет собой изменение химического потенциала вследствие роста плотности дислокаций. Поэтому варьирование всех четырех факторов (γ_1, γ_2, γ_3, γ_4) есть варьирование $\Delta\mu$ различными способами. При инактивном смазочном материале градиент химического

потенциала возникает лишь в результате упрочнения металлических материалов, что при пластическом контакте ведет к ухудшению параметра оптимизации – росту *f*. С введением активного смазочного материала возникает градиент химического потенциала, который провоцирует избирательное растворение и хемомеханический эффект.

Анализ данных показывает, что комплексное влияние на коэффициент трения механохимических и хемомеханических факторов приводит к снижению величины *f* при повышении градиента химпотенциала до определенных пределов. Это нашло отражение и в регрессионном уравнении (4):

$$1000f = 27 + 9{,}2\gamma_1 + 9{,}6\gamma_2 - 20\gamma_3 + 10\gamma_4 + 10{,}6\gamma_1\gamma_2 - 10\gamma_1\gamma_3 + 11{,}6\gamma_1\gamma_4 - 12{,}5\gamma_2\gamma_3 + 11{,}8\gamma_2\gamma_4 - 12\gamma_3\gamma_4 + 10\gamma_2\gamma_4 - 11{,}2\gamma_1\gamma_2\gamma_3 - 11\gamma_1\gamma_3\gamma_4 - 11{,}7\gamma_2\gamma_3\gamma_4 - 11{,}2\gamma_1\gamma_2\gamma_3\gamma_4 \quad (4)$$

В том случае, когда смазочный материал не обладает химической активностью, величина $(\Delta\mu_\Sigma)$ полностью определяется деформационной составляющей. Если в этом варианте рассмотреть зависимость $f(\Delta\mu_\Sigma)$, *считая, что* градиент химического потенциала растет в зависимости от роста упрочнения, результатом будет монотонно возрастающая функция. При этом составляющими аргумента $\Delta\mu_\Sigma$ будут факторы γ_1, γ_2, *и* γ_4 из табл.1, и рост аргумента будет происходить по мере роста указанных факторов. Результат построения соответствующего графика представлен на рис.3 для области А.

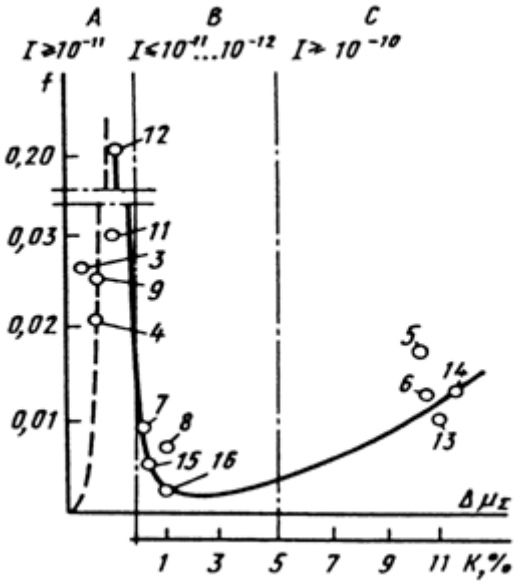


Рис.3. Совмещенная диаграмма зависимости коэффициента трения *f* от суммарного градиента химического потенциала $\Delta\mu_\Sigma$ трибосистемы и концентрации *K* (%) легирующего элемента в медном сплаве при смазывании глицерином: *A* – область механического изнашивания; *B* – область избирательного переноса; *C* – область коррозионно-механического изнашивания (номера точек на графике соответствуют номерам экспериментов)

Для построения полной зависимости $f(\Delta\mu_\Sigma)$ в областях В и С на рис. 3 можно воспользоваться тем же приемом, откладывая на оси абсцисс значения $\Delta\mu_\Sigma$, составленные аналогично значениям $\Delta\mu_\Sigma$ для области А из значений соответствующих входящих факторов

– концентрации легирующих элементов, пропорционально которой растет электродный потенциал, а значит и градиент суммарного химического потенциала.

В области В, где учитывается влияние активного смазочного материала, коэффициент трения снижается и подходит к минимуму. Однако дальнейший рост градиента химпотенциала, обусловленный выбором материалов с более высокой концентрацией легирующего элемента, приводит к увеличению роли химических процессов, что оказывает разрушающее действие на поверхностные слои и рост коэффициента трения, что и видно в области С на рис.3; происходит коррозионно-механическое изнашивание.

Основным результатом регрессионного анализа является оценка весомости входных факторов. Как следует из сопоставления значений регрессионных коэффициентов, наиболее весомым является фактор γ_3 – активность смазочного материала; его значение превышает в два раза значения всех остальных коэффициентов. Следует отметить, что полученное уравнение (4) является частным случаем представленного выше уравнения (1), которое с помощью методов неравновесной термодинамики описывает комплекс явлений, обобщенно названных физико-химической механикой трения, обусловленной активностью смазочного материала [17].

Важным итогом приведенных теоретических и экспериментальных исследований является определение концентрационной области используемых в триботехнике латуней, состав которых обеспечивает реализацию явления избирательного переноса при наличии активных составляющих в смазочном материале. Установлено, что для достижения экстремально высоких триботехнических характеристик традиционно используемых латуней необходима гомогенность сплава и соответствующий концентрационный интервал растворимости легирующего элемента в твердом состоянии, позволяющий развитие макроскопического диффузионного потока в условиях контактной деформации без реализации локальных диффузионных явлений. Эта область, рис.3, ограничена для промышленных латуней, применяемых в триботехнике, примерно, пятью-восемью процентами.

Выводы.

1. Анализировали экспериментально полученную совокупность макроскопических критериев (показателей потерь на трение и износ) и микроскопических (физическое уширение рентгеновских линий материала зоны контактной деформации, отражающей плотность дефектов дислокационной природы, характеристики механических свойств металла, а также период кристаллической решетки, указывающий на изменение элементного и фазового состава) при трении латуней, применяющихся в сопряжениях сталь – антифрикционный сплав в среде поверхностно-активных смазочных материалов. Показано, что реализация явления избирательного переноса, приводящая пару к практической безызносности, основана на формировании макроскопического диффузионного потока по глубине зоны контактной деформации, направленного к поверхности и имеющего положительный градиент параметра кристаллической решетки α-твердого раствора, сопровождающийся формированием пластифицированной пленки меди на поверхности трения.

2. Предложена математическая модель, описывающая роль механохимических и хемомеханических эффектов при трении медных сплавов в среде активного смазочного материала. Разработано регрессионное уравнение, в котором в качестве параметра оптимизации принят коэффициент трения пары медный сплав - сталь. Наиболее весомым фактором среди регрессионных коэффициентов, характеризующих давление в контакте, упрочняемость антифрикционного сплава и стали, является фактор активности смазочного материала. Его значение превышает в два раза значения остальных.

3. Установлено, что для обеспечения экстремально высоких триботехнических характеристик традиционно используемых медных сплавов при трении в поверхностно-активной смазочной среде, предпочтительна гомогенность сплава и соответствующий концентрационный интервал растворимости легирующего элемента в твердом состоянии, позволяющий развитие макроскопического диффузионного потока в зоне контактной деформации без реализации локальных диффузионных явлений и формирования новых фаз. Эта область ограничена для промышленных сплавов, применяемых в триботехнике, как правило, пятью-восемью процентами.

Список литературы

1. Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость конструкционных азотированных сталей и сплавов. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 518 с.
2. Буше Н.А., Копытько В.В. Совместимость трущихся поверхностей. - М.: Наука, 1981. - 127 с.
3. Куксенова Л.И., Поляков С.А. Формирование динамической структуры приповерхностных слоев материалов сопряжений скольжения в различных смазочных средах // МиТОМ. - 2019. - №11. - С.39-43.
4. Щукин Е.Д., Савенко ВИ., Малкин А.И. Лекции по физико-химической механике. - М.: Изд-во «Нобель Пресс», 2015. – 679 с.
5. Поляков С.А., Куксенова Л.И. Механизмы деформации приповерхностных слоев металлов и возможность возникновения самоорганизации в этих процессах // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2006. - №4. - С.51-61.
6. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. - М.: Машиностроение, 1982. - 212 с.
7. Алексеев Н.М., Куксенова Л.И., Правдухина Е.М., Рыбакова Л.М., Шапиро А.М. Исследование фрикционного упрочнения поверхностных слоев меди в режиме граничного трения // Трение и износ. - 1982. - №1. - С.33 – 42.
8. Савенко В.И., Щукин Е.Д. О соотношениях между феноменологическими и структурными критериями работы узлов трения // Трение и износ. - 1987. - № 4. - С.581-589.
9. Гаркунов Д.Н. Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности. Водородное изнашивание металлов. - М.: Изд-во МСХА, 2004. - 384с.
10. Савенко В.И. Роль эффекта Ребиндера в реализации режима безызносности в триботехнике // Эффект безызносности и триботехнологии. -1994. - №3-4. - С.26-38.
11. Nakajima K., Isogai A. Elektron microprobe study of the effect of abrasion of the surface of alloy crustals // Wear. - 1967. - V.10, N2. - P.151-156.
12. Ferrante J., Buckley D.H. A review of surface segregation, adhesion and friction studies performed on copper-aluminium, copper-tin and iron-aluminuma lloys // Trans.ASLE. - 1972. - V.15, N1. - P.18-24.
13. Nakajima K., Ohgo K., AwanoT. Formation of a built-up edge during cutting // Wear. - 1968. - V.11. N.3. P.369-375.
14. Гаркунов Д.Н., Поляков А.А. Повышение износостойкости деталей самолетов. - М.: Машиностроение, 1974. - 200с.
15. Поляков С.А., Поляков А.А. Обоснование метода подбора сочетаний триботехнических материалов при использовании избирательного переноса // Трение и износ. - 1983. - Т. 4, № 1. - С.121-131.

16. Поляков С.А. Самоорганизация при трении и эффект безызносности. - М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2009. - 108с.
17. Ребиндер П.А. Влияние активных смазочных сред на деформирование сопряженных поверхностей трения. / В сб. О природе трения твердых тел. - Минск: 1971. - С. 8-18.

Дата поступления: 15 марта 2022 г.

DOI: 10.18411/vntr2022-164-3

УДК 612.821

ОСОБЕННОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ АКТИВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ АНАЛИЗА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗРИТЕЛЬНОГО И ВИБРОТАКТИЛЬНОГО КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ СЕНСОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

© Исак Наумович Статников, Георгий Игоревич Фирсов
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия
firsovgi@mail.ru

Аннотация. *Рассматриваются некоторые особенности, возникающие при создании методики планирования и проведения экспериментов, в целях изучения возможностей анализа человеком-оператором информации от совместной работы вибротактильного и зрительного каналов. Излагаются алгоритмические подходы обработки экспериментальных данных, в том числе алгоритм гомогенизации результатов экспериментов по различным характеристикам качества работы человека-оператора применительно к группам испытуемых. На основе полученных экспериментальных данных проводится анализ возможностей решения задач оператором при использовании зрительного и тактильного каналов поступления информации совместно и порознь.*
Ключевые слова: *сенсорная информация, вибротактильное воздействие, планирование эксперимента, дисперсионный анализ.*

FEATURES OF PLANNING AND PROCESSING THE RESULTS OF ACTIVE EXPERIMENTAL STUDIES OF BIOMECHANICAL SYSTEMS ON THE EXAMPLE OF THE ANALYSIS OF THE INTERACTION OF VISUAL AND VIBROTACTILE CHANNELS OF SENSORY INFORMATION TRANSMISSION

© I.N. Statnikov, G.I. Firsov
Mechanical Engineering Research Institute the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
firsovgi@mail.ru

Abstract*. Some features that arise when creating a methodology for planning and conducting experiments are considered in order to study the possibilities of analyzing information from the joint work of vibrotactile and visual channels by a human operator. Algorithmic approaches to processing experimental data are described, including an algorithm for homogenizing the results of experiments on various characteristics of the quality of human operator work in relation to groups of subjects. Based on the experimental data obtained, the analysis of the possibilities of solving problems by the operator when using visual and tactile channels of information receipt together and separately is carried out.*
Key words: *sensory information, vibrotactile impact, experiment planning, dispersion analysis.*

Выполнение исследования такой сложной биомеханической системы как человек-оператор, действующего в экстремальной ситуации, может проводиться как в условиях пассивного (например, при оценке качества поддержания вертикальной позы тела человека [1-4]), так и активного эксперимента, при котором на человека-оператора оказываются различные воздействия. Одним из подобных исследований является анализ взаимодействия зрительного и вибротактильного афферентных каналов передачи сенсорной информации, который представляют большой интерес как с точки зрения медицинских [5], реабилитационных [6], спортивных [7] и психодиагностических [8] приложений, так и в задачах синтеза современных эргатических систем "человек - машина - среда" [9], в которых человек берет все или часть функций по управлению системой.

Это приводит к двум, относительно автономным по практическому исполнению, но в немалой степени влияющим друг на друга по результатам, этапам исследования А и Б. Заметим, что такое разделение на этапы и есть пример планирования экспериментов в широком смысле, как момент правильной (экономной) организации экспериментальных исследований. Рассмотрим содержание этих этапов:

А: Разработка критериев качества информационного вибротактильного канала “внешняя среда - оператор”; построение рационального по множеству критериев такога канала; определение условий и рациональных способов адаптации оператора к такому каналу.

Б: Разработка множества критериев качества многоканальной (смешанной) системы; определение условий и рациональных способов адаптации оператора к информационному вибротактильному каналу и к подсистеме управления системой; рациональный синтез всей такой системы по множеству критериев.

Успешному проведению обоих этапов способствовало бы наличие какой-либо теории (пусть даже имеющей локальное применение), дающей приближенные характеристики системы и соответствующие значения ее параметров. Такой общепринятой теории на сегодняшний день, насколько известно, нет. Отдельно по множеству проблем каждого из указанных этапов имеются априорные теоретические сведения (теория информации, физиология сенсорных анализаторов, психофизика, теория систем, теория автоматического регулирования и управления, некоторые эмпирические факты и т.д.). Перечисленные предварительные сведения и составляют тот априорный теоретический минимум, на базе которого должны быть организованы экспериментальные исследования.

Такой путь - это многочисленные эксперименты, результатами которых могут быть не только чисто практические ответы, но и отдельные теоретические построения, касающиеся анализа и синтеза заданной эргатической системы [10]. Объем и достоверность экспериментов тесно увязаны между собой в количественном смысле. Так, достоверность значительно зависит от тщательного учета факторов, оказывающих влияние на работу системы (например, влажность и температура воздуха, освещенность и яркость, давление воздуха, психометрические параметры оператора, параметры технических подсистем эргатической системы и т.д.) [11].

Уже одно только количество перечисленных факторов свидетельствует о необходимости проведения огромном числе экспериментов (натурных и модельных). Например, если принять во внимание 10 вышеперечисленных факторов, каждый из которых меняет свои значения только на двух уровнях, то общее количество экспериментов составит $N = 2^{10} = 1024$. Ситуация осложняется тем, что многие факторы не поддаются контролю или точному учету (например, многие психофизиологические параметры человека). Следовательно, любой результат таких экспериментальных исследований - случайный, и его оценка носит вероятностный характер [12]. В этом случае повышение доверительной вероятности P

полученных результатов связано с еще более резким увеличением числа экспериментов N. Так, пусть результаты экспериментов по какому-либо критерию (например, частоте правильных опознаний сигнала) подчиняется нормальному распределению со средним значением частичной совокупности, равным $\bar{x}$. Тогда общее среднее значение гипотетической генеральной совокупности $\bar{x}_0$ лежит в пределах $\bar{x} \pm \Delta x$, где $\Delta x = t_{1-\alpha} S / \sqrt{N}$, S^2 - эмпирическая оценка дисперсии частичной совокупности, P = 1 - α - доверительная вероятность, $t_{1-\alpha}$ - параметр распределения Стьюдента. Если задать P = 0,99, коэффициент размаха (изменчивости) выборки $\upsilon = S/\bar{x}$ = 0,2 и при этом потребовать, чтобы $\Delta x/\bar{x}$ = 0,01, то получим, что $N = 400 t_{1-\alpha}^2$. Ориентируясь на значение $t_{1-\alpha}$ при P = 0,99 и $N \to \infty$, т.е. $t_{0,01}$ = 2,33, найдем, что с каждым испытуемым нужно проделать по $N \approx 2172$ экспериментов. Если же ужесточить требования к величине доверительной вероятности, то при тех же условиях, но для P = 0,995, получим, что $N = 400 t_{0,005}^2 = 400 \times 2,576^2 \approx 2654$. Ясно, что ни по временным, ни по материальным ресурсам такие эксперименты невозможно провести.

Второй путь (и это предлагаемая и в значительной мере реализованная методика) - это попытка уменьшить число экспериментов при сохранении доверия к их результатам за счет специальной организации исследования и разработки алгоритмов обработки информации, учитывающих конечный объем выборок. К специальной организации относится идея рандомизации [13-15] проведения экспериментов (как во времени, так и в пространстве). Например, если из десяти принятых во внимание факторов пять являются неконтролируемыми, то вовсе не обязательно проводить по 1024 экспериментов с каждым испытуемым. Необходимо рандомизировать эксперименты в оставшемся пятимерном пространстве факторов, т.е. по специальным схемам организовать случайные сочетания двух уровней каждого из пяти параметров. Рандомизация экспериментов позволит существенно уменьшить влияние остальных неконтролируемых факторов на исход экспериментов. И тогда, для каждого испытуемого - $N = 2^5 = 32$ эксперимента. При этом детальное планирование экспериментов позволяет:

а) определить объем экспериментов;

б) определить области варьирования факторов, влияющих на результаты исследования;

в) выбирать схемы экспериментов и методы обработки экспериментальных данных в каждом конкретном исследовании.

Тогда оказывается возможным использовать дисперсионный, регрессионный и другие виды статистического анализа данных. Кроме того, на основе подобного подхода к обработке результатов предварительных экспериментов, объем последующих экспериментальных исследований также сокращается.

Теперь перечислим те факты, при которых возможно использование методологии планирования экспериментов [16-18]. В данном случае необходимо знать:

- четко сформулированную каким-либо способом (например, задаются критерии пригодности конечных результатов исследования) цель работы, которая по ходу экспериментов может, конечно, уточняться (главным образом, в смысле постановки задачи);
- временные и материальные ресурсы, выделяемые для проведения исследований (ближние и дальние сроки проведения работы, количество испытуемых и их возможная оплата и т.д.);
- наличие априорных теоретических и экспериментальных сведений по существу рассматриваемой задачи;
- степень технической оснащенности экспериментальных исследований и степень автоматизации как в смысле управления экспериментом, так и в плане обработки

результатов (без последнего вообще не приходится рассчитывать на реальные успехи в исследовании).

Первичная статистическая обработка собранного экспериментального материала основывается на принципе классификации числовых значений исследуемого параметра в однородные выборки (гомогенизации). Это позволяет решить следующие вопросы:

1) получить разбиение группы испытуемых на подгруппы (вплоть до подгруппы из одного испытуемого);

2) существенно повысить статистическую достоверность моментных характеристик распределения какого-либо анализируемого параметра за счет укрупнения (гомогенизации) выборки;

3) резко сократить последующий объем экспериментов;

4) и, наконец, само по себе образование подгрупп позволяет проанализировать связь между исследуемым параметром и психофизиологическими характеристиками членов подгруппы.

При этом отметим, что идея первичной статистической обработки собранного материала строится на отказе от отбраковки так называемых ошибок (разумеется, за исключением таких, которые определяются не действиями испытуемого, например, сбои используемой аппаратуры и в измерительном тракте, непредвиденные резкие изменения окружающей среды, если этот фактор сам по себе не входит в условия эксперимента и т.д.).

Распознавание однородных совокупностей собранного статистического материала основывается на применении параметрических критериев Фишера и Стьюдента [19]. Параметрический анализ по методу Стьюдента проводится с использованием формулы

$$t = \left|\bar{x}_1 - \bar{x}_2\right| \Bigg/ \sqrt{\frac{(n_1-1)S_1^2 + (n_2-1)S_2^2}{n_1+n_2-2}\left(\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}\right)},$$

где t - расчетное значение критерия Стьюдента, $\bar{x}_1$ и $\bar{x}_2$ - выборочные средние в группах из n_1 и n_2 членов, S_1^2 и S_2^2 - соответственно выборочные дисперсии. Если $t \geq t_\alpha$ при $\nu = n_1 + n_2 - 2$, где t_α - теоретическое значение критерия Стьюдента при том же ν, то нулевая гипотеза о статистической неразличимости $\bar{x}_1$ и $\bar{x}_2$ отвергается с доверительной вероятностью $P - 1 - \alpha$, где α - уровень значимости. Основываясь на значениях статистики t, используя критерии Фишера и Стьюдента формируют группы из $H_к$ испытуемых, средние значения регистрируемых параметров у которых статистически неразличимы. Здесь $H = \sum_{к=1}^{p} H_к$, p - число групп.

Важно, что критерии Фишера и Стьюдента малочувствительны к отклонениям реального распределения случайной величины от нормального. Распознавание осуществляется на трех уровнях интегральной обработки: образование однородных выборок по исследуемому параметру для каждого испытуемого; образование однородных выборок с учетом проведенных серий экспериментов для каждого испытуемого (т.е. выявление возможной неоднородности статистического материала по времени); образование однородных выборок по каждому параметру для группы испытуемых. Этот последний уровень позволяет рассчитывать характеристики некоторого «усредненного оператора», что соответствует в психологии человеко-машинных систем понятию тотальной адаптации человека к машине. Однако весьма важным представляется и определение контингентной (групповой) адаптации испытуемых к машине, что приводит в целом к экономичным решениям задачи синтеза эргатических систем.

Разработанная методика, предназначенная для реализации такой первичной статистической обработки, основана на идее 4-х мерного информационного параллелепипеда, на осях которого определяются числовые значения следующих величин: h - номер испытуемого ($h=\overline{1,H}$); l - номер серии экспериментов ($l=\overline{1,L}$); i - номер реализации в l - той серии ($i=\overline{1,I}$); j - номер уровня (или градации) числового значения предъявляемого стимула в i-той реализации l-той серии ($j=\overline{1,J}$); в общем случае это может быть и векторная величина. Нетрудно видеть, что даже при небольших значениях I, H, L и J только по одному выходному параметру получаем значительное количество единиц числовой информации. Так, при I = 20, H = 10, L = 10 и J = 10, общее число единиц первичной числовой информации по одному выходному параметру $N_0 = I \bullet H \bullet L \bullet J = 20000$ единиц. Если же число выходных регистрируемых параметров m, то $N_0 = 20000 \bullet m$ и при m = 3 достигает 60000 единиц. Поэтому для сокращения времени счета целесообразно использование рекуррентных процедур вычисления оценок среднего и дисперсии.

Разработанная методика и соответствующее программное обеспечение использовалось при исследовании взаимосвязи вибротактильного и зрительного анализаторов. В задачи проведенного цикла исследований, выполненных на специальной установке, обеспечивающей подачу вибротактильных воздействий [20-24] на кожные рецепторы человека в сочетании с определенными световыми стимулами, входило:

1) определение возможностей и способностей испытуемых принять и усвоить вибротактильную информацию;

2) определение способностей испытуемого на основе полученной вибротактильной информации принять правильное решение о пространственной ориентации источника сигнала, расположенного вне местонахождения испытуемого;

3) определение обучаемости и устойчивости приобретенных навыков восприятия и переработки вибротактильной информации;

4) определение степени дифференциальности "вибротактильного чувствования" пространства;

5) построение математических зависимостей (моделей) надежности и обучаемости испытуемого от различных существенных факторов его функционального состояния и особенностей деятельности.

Поскольку источником информации, подаваемой на вход тактильного канала, служили колебания вибратора (вибротактильного индикатора), передаваемые на кожу и оказывающие воздействия на механорецепторы кожи человека, анализ проводился с учетом следующих факторов:

- параметров стимула: величины усилия, развиваемого вибротактильным индикатором на коже человека; длительности стимулов, передаваемых на вибротактильный индикатор; интенсивности амплитуд, выдаваемых на вибротактильный индикатор; изменения частоты вибрационных раздражений; длительности пауз между посылками сигналов на вибротактильный индикатор;
- количества вибротактильных индикаторов;
- размеров вибротактильных индикаторов, площади контакта вибротактильных индикаторов с кожей;
- вида и уровня помехи;
- места расположения вибротактильного индикатора на теле человека;
- вариантов комбинации включения вибротактильного индикатора;
- индивидуальности испытуемого.

Градации перечисленных факторов могут служить основанием для выбора вариантов кодировки сигнала. Важным фактором в смысле выбора оптимального варианта кода является та или иная комбинация включения вибротактильного индикатора при их фиксированном числе. Сюда следует отнести и такие важные факторы, как места расположения вибротактильных индикаторов на теле человека и индивидуальность испытуемого. Индивидуальность испытуемого определяется, в свою очередь, совокупностью других факторов (антропометрические данные, психологические и психофизиологические характеристики, интеллектуальный уровень и т.д.).

Анализ перечисленных факторов позволяет спланировать эксперименты с целью выявления максимальных (в определенном смысле «оптимальных) возможностей испытуемого по восприятию и переработке вибротактильной информации, определения факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на его возможности. Очевидно, что в план экспериментов могут войти только факторы, поддающиеся количественному измерению. Заметное значение приобрели факторы второго уровня воздействия: производные от некоторых параметров сигнала.

Разумеется, если значения всех факторов фиксированы, т.е. задаются волевым порядком, то само по себе планирование экспериментов отпадает и остается задача сбора и обработки требуемой статистической информации.

Основные положения по организации статистической обработки и перечень задач, решаемых на этапе А, представлены в работе [25]. На кожу испытуемого оказывалось вибротактильное воздействие, параметры которого и служили факторами для оценки “вибротактильного чувствования” испытуемого. Все эксперименты на этапе А были разбиты на три группы (табл. 1) с учетом только зрительного или вибротактильного каналов, а также при их совместной работе. В соответствии с разработанной методикой были проведены эксперименты по из учению и сравнительному анализу свойств зрительного и вибротактильного информационных каналов у 12 испытуемых. В качестве критериев оценки эффективности работы каналов принимались: частота правильного распознавания сигналов, время восприятия и переработки информации и общее время выполнения всего цикла.

Таблица 1

Группы	Содержание экспериментов
А.1	Исследование свойств обучаемости и переработки информации испытуемым только при работе зрительного канала
А.2	Исследование свойств обучаемости и переработки информации испытуемым только при работе вибротактильного канала
А.3	Исследование свойств обучаемости и переработки информации испытуемым при совместной работе вибротактильного и зрительного канала

Реализация всех трех групп экспериментов представляется логически обоснованной по следующим причинам. Во-первых, анализ результатов всех трех групп экспериментов позволит выяснить условия согласованного взаимодействия зрительного и вибротактильного каналов. Дело в том, что реально оператор работает всегда в условиях одновременного воздействия сигнала на все анализаторы (за исключением экстремальных обстоятельств), а каждый сенсорный (а, значит, информационный) канал у человека обладает своим психологическим рефрактерным периодом (это период переключения внимания оператора с обработки первого сигнала, когда уже пришел следующий). Согласованного взаимодействия

сенсорных анализаторов можно достичь только при достоверном знании и учете рефрактерных периодов. Тогда можно ожидать, что при совместной работе двух анализаторов деятельность оператора окажется эффективнее (уменьшится время принятия решения и увеличится частота правильных ответов), что особенно важно на этапе Б решения исходной задачи.

Во-вторых, эксперименты группы А.3 могут позволить количественно оценить дифференцируемость “вибротактильного чувствования” испытуемым пространства, и, вообще, подтвердить сам факт возникновения такого чувствования. Для этого в группе А.3 нужно провести такие эксперименты (после того, когда считается, что обучение закончилось). По предъявлению испытуемому какой-либо комбинации вибротактильных индикаторов, привязанной к некоей зоне пространства, необходимо опознать эту же зону с помощью светового маркера при условии, что все световые маркеры задействованы (например, лампочки).

Теперь, если правильный ответ по узнаванию комбинации вибротактильных индикаторов обозначить через $f_1(+)$, а неправильный - через $f_1(-)$, и, соответственно, правильный ответ по распознаванию зоны пространства по световому маркеру через $f_2(+)$, а неправильный - через $f_2(-)$, то возможны четыре варианта исхода одного эксперимента: $f_1(+)$ и $f_2(+)$, $f_1(+)$ и $f_2(-)$, $f_1(-)$ и $f_2(+)$, $f_1(-)$ и $f_2(-)$.

Тогда, если число пар $f_1(+)$ и $f_2(+)$ будет максимальным из общего числа экспериментов, то это будет свидетельством возникновения “вибротактильного чувствования” пространства; если максимальным окажется суммарное число пар $f_1(+)$ и $f_2(-)$, $f_1(-)$ и $f_2(+)$, то говорить о наличии факта появления такого “вибротактильного чувствования” нельзя; если же максимальным окажется число пар $f_1(-)$ и $f_2(-)$, то в этом случае нужно вернуться к анализу условий проведения экспериментов и методов обучения испытуемого.

Поскольку важным критерием качества работы испытуемого является время реакции, то в не меньшей степени исследователя интересует производная от этой величины по какому-либо фактору, т.е. скорость реагирования испытуемого. Для статистической оценки скорости реагирования необходимо в экспериментах (после обучения) дать возможность испытуемому сделать несколько попыток найти правильный ответ, если сразу этого не получилось. Конечно, число этих попыток нужно заранее ограничить некоторой величиной n^*, которая может быть уточнена экспериментальным путем.

Проблема обучения традиционно является одной из центральных в психологической науке [26]. На сегодняшний день существует много различных методик обучения и операторов, и испытуемых (в этом плане различия могут быть существенными) [8, 7, 27]. На этапе А важен акцент на том, что в экспериментах участвуют испытуемые.

Общим моментом во многих методиках обучения является признание важным изучение динамики обучения, а не только итоговых результатов. Этот же факт важен и при обучении на этапе Б исследования, где понятия “оператор” и “испытуемый” полностью являются синонимами.

Все обучение рассматривается как двуединый процесс: теоретическое и практическое. Первое связано с абстрактным изучением расположения командных кнопок на пульте управления и соответствия между каждой кнопкой и определенной, выделенной только качественно, зоной пространства (конечно, здесь возникают проблемы рациональной мнемоники в расположении кнопок на пульте управления, количества пространственных зон и их признаков типа “слева-сверху-сбоку” или каких-то других и т.д.). Практическое обучение проводится непосредственно на пульте управления.

Считается, что теоретическое обучение должно предшествовать практическому в целях повышения эффективности и достоверности последнего. Эффективность теоретического

обучения при прочих равных условиях должна быть обеспечена четкой инструкцией, в которой ясно определены формы и размеры морального и материального стимулирования испытуемого.

Естественно, что за динамикой обучения нужно следить при практической учебе. Для этого предлагается простой алгоритм. Пусть одним из выходных параметров служат значения частоты правильных ответов f_{ijhl} по распознаванию стимула (h-м испытуемым в i-ой реализации по j-му признаку в l-ой серии), которая и будет рассматриваться как критерий обученности. Пусть на (i - 1) и i-м шагах мы имеем соответствующие оценки дисперсий этих величин: $s^2_{i-1,jhl}$ и $s^2_{i,jhl}$. Тогда в качестве оценки обученности (обучения) введем величину $\varepsilon_i^{(jhl)}$, равную:

$$\varepsilon_i^{(jhl)} = \frac{s^2_{i-1,jhl}}{s^2_{i-1,jhl} + s^2_{i,jhl}}. \qquad (1)$$

Физический смысл этой величины состоит в следующем:

если $s^2_{i,jhl} >> s^2_{i-1,jhl}$, то $\varepsilon_i^{(jhl)} \to 0$, т.е. испытуемый обучается данной работе в рассматриваемой экспериментальной ситуации плохо;

если $s^2_{i,jhl} \approx s^2_{i-1,jhl}$, то $\varepsilon_i^{(jhl)} \approx 0{,}5$, т.е. можно полагать, что имеет место процесс обучения и его нужно продолжать;

если $s^2_{i,jhl} << s^2_{i-1,jhl}$, то $\varepsilon_i^{(jhl)} \to 1$, т.е. в рассматриваемой экспериментальной ситуации имеет место эффективное обучение. Иначе говоря, $0 \le \varepsilon_i^{(jhl)} \le 1$, а с точки зрения обученности удовлетворительными являются значения $\varepsilon_i^{(jhl)} \in [0{,}5;1] \subseteq [0;1]$.

Конечно, величина $\varepsilon_i^{(jhl)}$ носит выборочный характер, и для характеристики ее распределения нужно вычислить оценку математического ожидания и доверительные интервалы, что служит основой для назначения числа экспериментов.

Использование оценки $\varepsilon_i^{(jhl)}$ полезно по двум причинам. Во-первых, динамику обучения испытуемого можно проследить не только в одной серии, но и от серии к серии. В этом случае

$$\varepsilon_l^{(jl)} = \frac{s^2_{l-1,jh}}{s^2_{l-1,jh} + s^2_{l,jh}}, \qquad (2)$$

где $s^2_{l-1,jh}$ и $s^2_{l,jh}$ - оценки дисперсии по j-му признаку для h-го испытуемого в (l -1) и l-ой сериях соответственно. И, конечно, $0 \le \varepsilon_l^{(jh)} \le 1$.

Во-вторых, в случае, когда работа системы (и обучение) оцениваются по m критериям качества, то в соответствии с (1) и (2) могут быть получены оценки обучаемости испытуемых по m критериям совместно: $E_i^{(jkl)} = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} \varepsilon_{ik}^{(jhl)}$, $E_l^{(jk)} = \frac{1}{m}\sum_{k=1}^{m} \varepsilon_{lk}^{(jh)}$. В этом случае $0 \le E_i^{(jhl)} \le 1$ и $0 \le E_l^{(jh)} \le 1$.

Кроме знания динамики обучения конкретного испытуемого важен также итоговый результат обученности, который численно предлагается оценивать по значениям коэффициента размаха (вариации) выборки v. В одной серии по одному признаку и для одного испытуемого находим:

$$v_{jhl} = \sigma_I / E_I, \qquad (3)$$

где E_I - математическое ожидание случайной величины, а σ_I - ее среднеквадратичное отклонение от математического ожидания. Ясно, что в идеале $v_{jhl} \rightarrow 0$. Но при этом не безразлично, при каком значении E_I будет достигнут min v_{jhl}. Поэтому необходимо вводить пороговую величину E_I^*.

Оценка (3) удобна при экзаменовке испытуемого на предмет его обученности (готовности к участию в дальнейших экспериментах).

Вводится 5-ти бальная шкала: если при $E_I \leq E_I^*$ (а при другом критерии качества работы это условие может поменяться на противоположное) выполняется неравенство $v_{jhl} \leq v^*$, то испытуемый получает 5 баллов; если $v^* < v_{jhl} \leq 2v^*$, то испытуемый получает 4 балла; если $2v^* < v_{jhl} \leq 3v^*$, то испытуемый получает 3 балла, если $v_{jhl} > 3v^*$, то ставится 2 балла. Значения E_I^* и v^* должны уточняться экспериментальным путем. Для начала следует брать $v^* = 0{,}1$ и $E_I^* = 0{,}5$.

Критерием готовности испытуемого после экзамена служит максимальная сумма баллов. В целом оценка пригодности испытуемого к дальнейшей экспериментальной работе рассматривается как двухкритериальная: необходима максимальная сумма баллов на экзамене, но в то же время важное значение имеет качество динамического процесса обучения (желательно как можно меньше получать выбросов в кривых обучения (1) и (2), т.е. по существу должно наблюдаться стабильное увеличение скорости правильных ответов по каждому критерию.

Предлагаемые методики обучения полностью применимы и для этапа Б. В этом случае могут появиться новые критерии качества работы.

В предположении, что задачи этапа А решены, исследования на этапе Б могут вестись двумя путями.

Первый путь. При наличии математических моделей управляемого объекта и передаточной функции оператора все натурные эксперименты можно проводить с использованием математического моделирования на компьютере. В этом случае в пакетах типа Simulink. AnyLogic, Model Vision Studium (MVS), LabView, Bridgeview набираются уравнения управляемого объекта, передаточная функция оператора, функции управления, а на компьютере реализуются алгоритмы сбора и результатов экспериментов.

Анализ и синтез эргатической системы тогда нужно проводить, используя методы математической теории планирования экспериментов. Этот путь существенно сокращает временные и материальные затраты на весь этап Б и экспериментальную доводку результатов математического моделирования.

Второй путь. При наличии только математической модели управляемого объекта результаты этапа Б достигаются на основе проведения полунатурных экспериментов: математическая модель, функции управления набираются на компьютере, а отработка алгоритмов управления осуществляется экспериментальным путем на комплексе “оператор - экспериментальный стенд”.

Рассмотрим, в качестве примера, результаты цикла экспериментов с группой испытуемых. В экспериментах принимало участие до 12 человек, ранее не обученных, пригодных по медицинским показаниям к участию в экспериментах (хотя, разумеется, сами эти показания у всех испытуемых различные). Обработка экспериментальных данных носит констатирующий характер, т.е. после проведения всевозможных экспериментов с операторами (испытуемыми). Все эксперименты подразделяются по условиям их проведения:

а) световая индикация зон пространства: сферическая поверхность кабины, где проводятся испытания, разбита на J зон, в каждой из них вспыхивает лампочка; время горения и паузы между зажиганиями лампочки формируются по закону равномерно распределенных по вероятности чисел; кабина ярко освещена; лампочки тускло горят (закрашены); тишина за кабиной не соблюдалась - группа А2;
б) световая индикация зон пространства: содержание экспериментов такое же, как и в А2; кабина затемнена; лампочки горят ярко; вне кабины затемненное пространство - группа А1;
в) совместная индикация фиксированных зон пространства: световая и вибротактильная; кабина ярко освещена; лампочки горят тускло; тишина за кабиной не соблюдалась; испытуемые сидели в наушниках - группа АВ;
г) вибротактильная индикация зон пространства: каждой из J зон сферической поверхности кабины соответствует сигнал определенной кодировки, реализуемый соответствующей комбинацией вибротактильных индикаторов (датчиков), установленных на теле испытуемого; кабина ярко освещена; внекабинное пространство освещено; лампочки не горели; испытуемые одевали наушники. - группа В.
Следует иметь в виду, что по ходу исследования тактика проведения экспериментов не менялась в соответствии с получаемыми оценками.
Обработка экспериментальных данных по всем группам экспериментов проводилась по трем критериям качества работы испытуемых:
Критерий 1 - f - частота правильных ответов (или эмпирическая вероятность правильного ответа для одного испытуемого);
Критерий 2 - T_1 - время восприятия и переработки информации, с;
Критерий 3 - T_2 общее время выполнения всей работы, с.

Таблица 2

Группы экспериментов	№№ критериев	Статистические характеристики				
		$\bar{X}_{0k}$	σ_{0k}	$v_{0k} = \sigma_{0k} / \bar{X}_{0k}$	Δ_{0k}, Δ	N_{0k}
А1	1	0,9219	0,2683	0,2910	1,207; [0;1]	7200
	2	1,3930	0,8288	0,5950	3,730; [0;5,123]	6638
	3	3,2390	1,2300	0,3797	5,535; [0;8,744]	6638
А2	1	0,7301	0,4439	0,6313	1,998; [0;1]	7200
	2	6,6870	3,5650	0,5331	16,043; [0;22,80]	5257
	3	7,7550	3,5700	0,4603	16,065; [0;23,82]	5257
В	1	0,9325	0,2509	0,2691	1,130; [0;1]	2520
	2	1,2036	0,5807	0,4825	2,613; [0;3,817]	2350
	3	1,8032	0,7005	0,3885	3,152; [0,4,960]	2350
АВ	1	0,9683	0,1752	0,1810	0,788; [0,18;1]	1989
	2	1,3590	1,0560	0,7770	4,752; [0;6,111]	1926
	3	3,2630	1,4020	0,4300	6,309; [0;9,572]	1926

Результаты расчетов представлены в таблице 2, где указаны следующие статистические характеристики: $\bar{X}_{0k}$ - общее среднее значение критерия; σ_{0k} - общее среднеквадратическое отклонение; $v_{0k} = \sigma_{0k} / \bar{X}_{0k}$ - коэффициент изменчивости выборки; Δ_{0k} = 4,5σ_{0k}, Δ - ширина половины доверительного интервала при отсутствии вида функции распределения и доверительный интервал; N_{0k} - общее число единиц измерения (испытаний).

Анализ данных таблицы 2 показывает, что в среднем частота правильных ответов в группе экспериментов В больше в 1,28 раза, чем в группе А2, и всего лишь на 1% выше, чем в группе А1. Значит, при плохих условиях для работы зрительного канала информации вибротактильный канал гораздо эффективнее при выполнении заданной работы. Но еще более эффективной по этому критерию качества оказывается совместная работа двух каналов: $\bar{X}_{01}$ = 0,9683 в группе экспериментов АВ в 1,33 раза больше, чем в А2, и на 5% и 3,7% больше, чем в группах А1 и В соответственно.

На высокую эффективность в группе АВ указывает и то обстоятельство, что σ_{01} в этой группе существенно меньше, чем во всех остальных группах. Значит, даже необученным операторам совместная работа двух информационных каналов помогает безошибочнее выполнять заданную работу.

Иначе обстоит дело при анализе скорости выполнения заданной работы. Здесь по значениям $\bar{X}_{02}$ и $\bar{X}_{03}$ наилучший результат наблюдается в группе экспериментов В, что подтверждается и наименьшими значениями коэффициентов вариации: ~ 48% и ~ 39% соответственно для второго и третьего критериев качества работы. Этот результат можно объяснить тем, что использование вибротактильного канала информации при известной степени обучения происходит почти на рефлекторном уровне.

И чем проще алгоритм управления колебаний сердечника вибротактильного индикатора, тем это сравнение точнее. В этих экспериментах алгоритм управления был чрезвычайно прост: линейное изменение частоты колебаний сердечника вибротактильного индикатора в зависимости от степени приближения к распознаваемой зоне.

Следующим этапом обработки экспериментальной информации был дисперсионный анализ, позволяющий выделить и оценить отдельные факторы (фактор субъекта, фактор индицируемой зоны, фактор времени и обученности), вызывающие изменчивость средних значений анализируемых критериев качества выполнения требуемой работы испытуемыми.

При этом проверка значимости оценок дисперсий случайной величины производилась при помощи таблиц значений статистики Фишера (параметрический критерий значимости Фишера) [28].

Если вычисляемое (наблюденное) значение *F* окажется меньше табличного (при одних и тех же степенях свободы и при одном и том же уровне значимости), то не имеется оснований приписывать какое-либо значение влиянию рассматриваемого фактора на изменчивость средних значений рассматриваемой случайной величины; если же наблюденное значение *F* окажется больше табличного, то рассматриваемый фактор неслучайно влияет на изменчивость средних значений, т.е. в этом случае имеем дело с существенно неоднородной выборкой.

Анализ таблицы 3 показывает, что даже при уровне значимости p = 0,005 во всех группах экспериментов каждый из факторов *H, J и L* оказывает существенное, неслучайное влияние на каждый из рассматриваемых критериев, т.е. во всех случаях для каждого фактора $F_{эмп} > F_{0,005}$. Так с вероятностью $P \geq 1 - 0,005 = 0,995$ каждый из указанных факторов оказывает существенное влияние на анализируемые критерии (фактор субъекта (*H*), фактор индуцируемой зоны (*J*), фактор времени обученности (*L*)).

А это значит, что результаты исследований, приведенные в [29,30], приводят к вычислению значений границ доверительных интервалов (при отсутствии знания реального вида функций распределения), носящих не содержательный или непрактический характер. Так для частоты правильных ответов (k = 1) всюду получен доверительный интервал [0;1].

Разумеется, если для частоты правильных ответов принять нормальное распределение, то при p = 5% уровне значимости для всех трех групп экспериментов нижняя граница этого

доверительного интервала вырастает и примерно во всех случаях доверительный интервал сужается = [0,4;1].

Для критериев T_1 и T_2 доверительные интервалы их значений настолько широки, что лишают всякой почвы для сравнения эффективностей различных способов индикации зон пространства. Таким образом, необходимо решить задачу дефиниции однородных выборок для всех групп экспериментов и по каждому критерию качества работы испытуемых.

Таблица 3

Группа	№№ критериев	Факторы	Степени свободы		$F_{эмп}$	Теоретические значения F при различных значениях p			Примечание
			ν_1	ν_2		0,050	0,025	0,005	
AB	1	*H*	8	1980	3,578	1,940	2,190	2,740	*J*(1÷11), *L*(1,2)
		J	10	1978	2,732	1,845	2,065	2,550	*H*(1,3÷8,10,11), *L*(1,2)
		L	1	1987	9,988	3,840	5,012	7,880	*H*(1,3÷8,10,11), *J*(1÷11)
	2	*H*	8	1917	80,620	1,940	2,190	2,740	*J*(1÷11), *L*(1,2)
		J	10	1915	3,678	1,845	2,065	2,550	*H*(1,3÷8,10,11), *L*(1,2)
		L	1	1924	179,328	3,840	5,012	7,880	*H*(1,3÷8,10,11), *J*(1÷11)
	3	*H*	8	1917	53,439	1,940	2,190	2,740	*J*(1÷11), *L*(1,2)
		J	10	1915	22,683	1,845	2,065	2,550	*H*(1,3÷8,10,11), *L*(1,2)
		L	1	1924	147,162	3,840	5,012	7,880	*H*(1,3÷8,10,11), *J*(1÷11)
B	1	*H*	6	1515	16,054	2,090	2,410	3,090	*J*(1÷12), *L*(1÷3)
		J	11	2508	4,316	1,798	2,003	2,455	*H*(1,2,5÷8,11), *L*(1÷3)
		L	2	2517	23,008	2,990	3,690	5,300	*H*(1,2,5÷8,11), *J*(1÷12)
	2	*H*	6	2343	67,283	2,090	2,410	3,090	*J*(1÷12), *L*(1÷3)
		J	11	2338	6,554	1,798	2,003	2,455	*H*(1,2,5÷8,11), *L*(1÷3)
		L	2	2347	214,452	2,990	3,690	5,300	*H*(1,2,5÷8,11), *J*(1÷12)
	3	*H*	6	2343	11,317	2,090	2,410	3,090	*J*(1÷12), *L*(1÷3)
		J	11	2338	11,922	1,798	2,003	2,455	*H*(1,2,5÷8,11), *L*(1÷3)
		L	2	2347	357,723	2,990	3,690	5,300	*H*(1,2,5÷8,11), *J*(1÷12)
A1	1	*H*	5	7194	40,927	2,210	2,570	3,350	*J*(1÷30), *L*(4÷7)
		J	29	7170	12,395	1,424	1,515	1,708	*H*(1,3,6,8,10,11), *L*(4÷7)
		L	3	7196	89,743	2,600	3,120	4,280	*H*(1,3,6,8,10,11), *J*(1÷30)
	2	*H*	5	5251	25,565	2,210	2,570	3,350	*J*(1÷30), *L*(4÷7)
		J	29	5227	29,153	1,424	1,515	1,708	*H*(1,3,6,8,10,11), *L*(4÷7)
		L	3	5223	4,525	2,600	3,120	4,280	*H*(1,3,6,8,10,11), *J*(1÷30)
	3	*H*	5	5221	16,533	2,210	2,570	3,350	*J*(1÷30), *L*(4÷7)
		J	29	5227	34,785	1,424	1,515	1,708	*H*(1,3,6,8,10,11), *L*(4÷7)
		L	3	5223	9,930	2,600	3,120	4,280	*H*(1,3,6,8,10,11), *J*(1÷30)
A2	1	*H*	5	7192	20,093	2,015	2,300	2,915	*J*(1÷30), *L*(1÷3)
		J	29	7170	6,927	1,424	1,515	1,780	*H*(1,3÷8,10,12), *L*(1÷3)
		L	3	7197	199,457	2,990	3,690	5,300	*H*(1,3÷8,10,12), *J*(1÷30)
	2	*H*	5	6630	145,800	2,015	2,300	2,915	*J*(1÷30), *L*(1÷3)
		J	29	6608	24,390	1,424	1,515	1,780	*H*(1,3÷8,10,12), *L*(1÷3)
		L	3	6635	270,562	2,990	3,690	5,300	*H*(1,3÷8,10,12), *J*(1÷30)
	3	*H*	5	6630	239,314	2,015	2,300	2,915	*J*(1÷30), *L*(1÷3)
		J	29	6608	37,423	1,424	1,515	1,780	*H*(1,3÷8,10,12), *L*(1÷3)
		L	3	6635	277,451	2,990	3,690	5,300	*H*(1,3÷8,10,12), *J*(1÷30)

Ввиду сложности проведенных экспериментов (наличие человеческого фактора и многофакторность самих условий проведения экспериментов) необходимо теперь провести детальный дисперсионный анализ по каждой группе экспериментов и для каждого фактора.
По результатам проведенных исследований оказалось возможным сделать следующие выводы:
1) улучшение количественных показателей при использовании вибротактильного информационного канала может быть достигнуто по меньшей мере следующими путями:
а) подбор испытуемых по определенным индивидуальным свойствам;
б) предварительное глубокое обучение работе с использованием этого канала;
2) в экстремальных, но ограниченных условиях использование вибротактильного канала может компенсировать бездействие зрительного канала;
3) очень перспективно совместное использование двух каналов.
4) в целом ясно, что получение высокоточных результатов с высоким уровнем доверия, например, при $P \geq 0{,}995$, достигается при проведении большого количества экспериментов, что, возможно с использованием предложенных идей на математических моделях функционирования биомеханических систем.

Список литературы

1. Винарская Е.Н., Фирсов Г.И. Современные проблемы изучения механизмов полной статики человека // Вестник научно-технического развития. - 2014. - № 8(84). - С.3-14.
2. Винарская Е.Н.,. Кууз Р.А., Ронкин М.А., Фирсов Г.И. Взаимосвязь афферентного и эфферентного системного синтеза в изучении постуральной активности человека // Информатика и системы управления. - 2008. - № 2(16). - С.115-116.
3. Винарская Е.Н., Кууз Р.А., Ронкин М.А., Фирсов Г.И. Топологические аспекты афферентного и эфферентного системного синтеза в задачах изучения постуральной активности человека // Информатика и системы управления. - 2009. - № 4(22). - С.44-46.
4. Винарская Е.Н., Кууз Р.А., Ронкин М.А., Фирсов Г.И. Исследование процессов взаимодействия афферентного и эфферентного системного синтеза в постуральной активности человека // Информатика и системы управления. - 2010. - № 2(24). - С.47-49.
5. Зилов В.Е., Судаков К.В., Эпштейн О.И. Элементы информационной биологии и медицины. - М.: Изд-во Моск. гос. ун-та леса, 2000. - 248 с.
6. Kutyina D.V., Nakonechny D.G., Motailo A., Pigareva Ya.I., Kiseleva A.N., Kazantsev V.B., Gordleeva S.Yu., Kaplan A.Ya., Pimashkin A.S. Automated complex of motion control based on vibrotactile feedback for rehabilitation // Modern Tehnologies in Medicine. – 2017. - 9(4). С. 36–43.
7. Миронов В.В., Боцман О.С., Зыков А.В. и др. Обоснование системы физической подготовки курсантов высших военно-морских учебных заведений с профессионально-прикладной направленностью и экспериментальная проверка ее эффективности. – СПб.: Изд-во «Свое издательство», 2020. – 242 с.
8. Общая психодиагностика. Основы психодиагностики, немедицинской психотерапии и психологического консультирования. / Под ред. А.А.Бодалева, В.В.Столина. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. - 304 с.
9. Sheridan Th.B. Modeling Human-System Interaction: Philosophical and Methodological Considerations, with Examples. – Hoboken, New Jersey: J. Wiley and Sons, 2016. – 192 p.
10. Павлов В.В. Начала теории эргатических систем. – Киев: Наукова думка, 1975. - 240 с.

11. Иванов-Муромский К.А., Лукьянова О.Н., Черноморец В.А. и др. Психофизиология оператора в системах человек-машина. - Киев: Наук. думка, 1980. - 344 с.
12. Готтсданкер Р. Основы психологического эксперимента. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982. - 464 с.
13. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Проблемы интеллектуальной обработки информации при решении задач проектирования и идентификации динамических систем // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. AS'2011. VIII Всероссийская научно-практическая конференция. Труды. - Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2011. – С.45-51.
14. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Интерактивное структурирование пространства параметров при проектировании динамических систем // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2015. - № 1. – С.36-41.
15. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Численный подход к решению задачи рационального выбора параметров динамических систем // Вестник научно-технического развития. - 2016. - № 3(103). - С.38-53.
16. Pukelsheim F. Optimal Design of Experiments. – Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2006. - 487 p.
17. Santner Th.J., Williams B.J., Notz W.I. The Design and Analysis of Computer Experiments. - New York: Springer Science+Business Media, LLC, part of Springer Nature, 2018. - 446 p.
18. Wu C.F.J., Hamada M.S. Experiments. Planning, Analysis and Optimization. - Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2021. - 733 p.
19. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. - М.: Наука, ГРФМЛ, 1971. - 576 с.
20. Lindblom U. The Afferent Discharge Elicited by Vibrotactile Stimulation // IEEE Trans. On Man-Machine Systems. - 1970. - V.MMS-11, No.1. - P.2-5.
21. Shao Y. Tactile Sensing, Information, and Feedback via Wave Propagation. - Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2022. – 148 p.
22. Blake D.T., Hsiao S.S., Johnson K.O. Neural coding mechanisms in tactile pattern recognition: The relative contributions of slowly and rapidly adapting mechanoreceptors to perceived roughness // J. Neuroscience. – 1997. – Vol. 17. - P. 7480 – 7489.
23. Gescheider G.A., Bolanowski S.J., Verrillo R.T., Arpajian D.J., Ryan T.F. Vibrotactile intensity measured by three methods // J. Acoust. Soc. Am. – 1990. – Vol. 87. - P. 330 – 338.
24. Gescheider G.A., Wright J.H., Weber B.J., Barton W.G. Absolute thresholds in vibrotactile signal detection // Perception & Psychophysics. – 1971. – Vol. 10. - P. 413 – 417.
25. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Методика планирования экспериментальных исследований взаимодействия зрительного и вибротактильного каналов передачи сенсорной информации // Известия Таганрогского радиотехнического университета. Технические науки. – 2002. – № 5(29). – С. 5-8.
26. Хаккер В. Инженерная психология и психология труда: Психологическая структура и регуляция различных видов трудовой деятельности. - М.: Машиностроение, 1985.– 376 с.
27. Денисов В.Г., Онищенко В.Ф. Инженерная психология в авиации и космонавтике. - М.: Машиностроение, 1972. - 316 с.
28. Шеффе Г. Дисперсионный анализ. - М.: Физматгиз, 1963. – 512 с.

29. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Методика комплексного экспериментального исследования процессов восприятия и переработки вибротактильной информации человеком-оператором в экстремальных условиях // Известия Таганрогского радиотехнического университета. Технические науки.– 2006. – № 11 (66). - С.9-16.
30. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Дисперсионный анализ результатов комплексного экспериментального исследования процессов восприятия и переработки вибротактильной информации человеком-оператором в экстремальных условиях // Известия Таганрогского радиотехнического университета. Технические науки.– 2008. – № 6 (83). - С.26-30.

Дата поступления: 26 марта 2022 г.

DOI: 10.18411/vntr2022-164-4

УДК 536.2:518.355.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ СЛОЕВ МНОГОСЛОЙНОЙ ТОНКОЙ СТЕНКИ: ЧЕЛОВЕК – ТКАНЫЙ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬ

© Александр Анатольевич Шульженко[1], Михаил Борисович Модестов[1], Борис Михайлович Модестов[1], Анна Александровна Шульженко[2]
[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия
[2]Общество с ограниченной ответственностью «Экометр», Москва, Россия
aa_shulzhenko.01@mail.ru

Аннотация. *Проводилось исследование реакции человека на тепловой сигнал тканого электронагревателя. Изменения температуры отслеживались во времени и в представляющем тонкую стенку пространстве: тело человека – тканый электронагреватель – теплоизоляционный слой – внешняя среда. Новизной работы является изучение влияния на передачу реакции человека на тепловое воздействие со стороны тканого электронагревателя изменения тепловых параметров в пределах рассматриваемого пространства. Полученные в ходе натурных испытаний и математического моделирования результаты позволяют оценить граничные возможности применения исследуемого метода. Результаты работы могут представлять интерес для широкого круга специалистов, занимающихся исследованием системы терморегуляции человека, физиологией.*
Ключевые слова: *тканый электронагреватель, терморегуляция человека, тепловая система, тонкая стенка.*

SIMULATION OF PROCESSES AT DIFFERENT THERMAL PARAMETERS OF THE LAYERS OF A MULTILAYER THIN WALL: A MAN - A WOVEN ELECTRIC HEATER

© A.A.Shul'zhenko[1], M.B.Modestov[1], B.M.Modestov[1], An.A.Shul'zhenko[2]
[1]Institute of machine science n. a. A. A. Blagonravova Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
[2]"Ecometer" Limited Liability Company, Moscow, Russia
aa_shulzhenko.01@mail.ru

Annotation. *A study was made of the human response to the thermal signal of a woven electric heater. Temperature changes were tracked in time and in space representing a thin wall: the human body - a woven electric heater - a heat-insulating layer - the external environment. The novelty of the work is the study of the transfer of a person's reaction to thermal exposure from a woven electric heater within the thermal system: the human body - the gap between the human body and the heater - a woven electric heater - a heat-insulating layer - the external environment. The results*

obtained in the course of full-scale tests and mathematical modeling make it possible to estimate the limiting possibility of using the method under study. The results of the work may be of interest to a wide range of specialists involved in the study of the human thermoregulation system.
Keywords: *woven electric heater, human thermoregulation, thermal system, thin wall.*

Широкое распространение тканых электронагревателей стало возможным благодаря их высокоэластичным свойствам и способности обеспечить требуемый уровень обогрева контактным способом, то есть непосредственно на поверхности тела человека, а не через теплоноситель. Данные свойства способствуют возможности их использования не только в технике, а и в медицине.

Особенно важно, что контактный способ позволяет осуществлять, как прецизионный нагрев, так и отслеживать обратную реакцию человека на тепловое воздействие [1].

Ценно и то обстоятельство, что с помощью контактного способа воздействия тканых электронагревателей на биологические объекты, возможно получение информации неинвазивным методом.

Как правило, процессы, происходящие при контактном обогреве, происходят в пространстве с очень маленькими расстояниями между тепловыми слоями (мм и доли мм), что делает затруднительным осуществление натурных экспериментов по исследованию распространения сигнала. Связано это с тем, что габариты выносных щупов измерительных устройств превышают или соизмеримы с этими линейными размерами, что приводит к внесению существенной дополнительной погрешности при получении количественной информации. Поэтому, целесообразно проведение исследований не только путем натурных испытаний, а и путем математического эксперимента, позволяющего при учете физических параметров воздействующего сигнала и системы, в которой происходит распространение этого сигнала, получить представления о характере тепловых процессов в этой системе.

Будем рассматривать тепловую систему в виде: тело человека – промежуток между телом человека и тканым электронагревателем – тканый электронагреватель – внешний теплоизоляционный слой – внешняя окружающая среда.

В ходе исследования определим, каким образом изменения в данной тепловой системе: при различной теплоотдаче в тело человека (что происходит при включении дополнительных механизмов терморегуляции человека), при параметрах промежутка между телом человека и тканым электронагревателем, при параметрах внешнего теплоизоляционного слоя на поверхности тканого электронагревателя и расстояний в промежутке между телом человека и тканым электронагревателем, влияют на возможности измерения реакции тела человека на тепловой сигнал. А также определим наиболее удобное расположение измерителей температур в пределах тепловой системы при измерениях различных реакций человека.

Математическая постановка такой задачи была проведена в [2].

В ходе проведения исследований будем использовать разработанную на основе сформулированной задачи программу [3].

Решение этой задачи при условии сбалансированных тепловых параметров системы, то есть, обладающей небольшими теплоемкостями и малыми массами в области промежутка между телом человека и нагревателем, внешнего изоляционного слоя и нагревателя, а также достаточно большой теплопроводностью этих элементов системы, показано на рис. 1.

На этом рисунке хорошо видно, что во временном интервале от 0 до 0,4 температура под воздействием нагревателя нарастает плавно, до уровня 33ºС. На этом уровне температур возникает потовыделение. Далее, идут колебания температуры, связанные с потовыделением [2]. Эти колебания продолжаются от уровня температуры 33ºС до конца времени теплового

воздействии со стороны нагревателя. При достижении уровня температур, превышающих 38ºС (время 0,6), наблюдается дополнительный подъем температуры [4], возникающий за счет генерации тепла телом человека и дающий команду терморецепторам кровеносных сосудов на перераспределение крови в организме за счет сужения сосудов «ядра» и расширения сосудов «оболочки» тела; увеличения объёмной скорости кожного кровотока; увеличения объёма циркулирующей крови в подкожных кровеносных сосудах и т.д. [5 - 7]. За счет этих изменений происходит рост теплоотдачи в теле человека, приводящий к падению температуры.

Следует отметить, что все эти явления при подобранных тепловых параметрах хорошо отражаются практически во всем пространстве тепловой системы, в том числе и в области тканого электронагревателя.

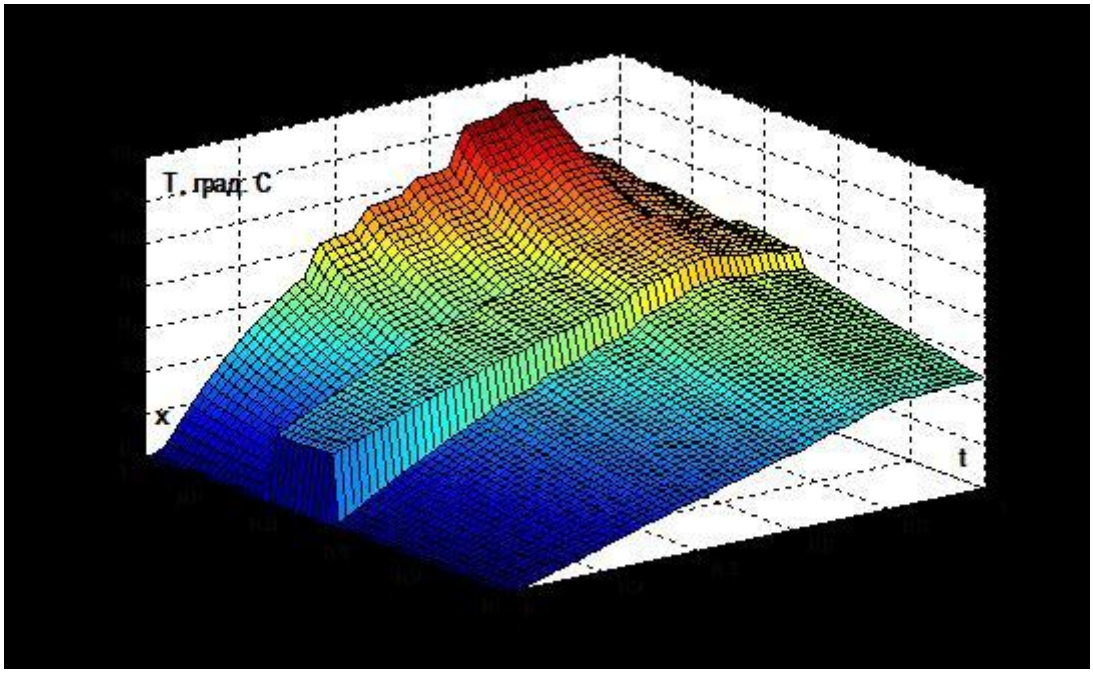


Рис. 1. Характер изменения температуры в области тепловой системы при одновременном потовыделении и других температурных колебаниях у человека, вызванных воздействием теплового сигнала на человека, при низкой теплоемкости и удельной массе: в промежутке между телом человека и тканым электронагревателем, в области самого нагревателя и внешнего теплоизоляционного слоя тканого электронагревателя.

Теперь изменим тепловые параметры в промежутке между телом человека и тканым электронагревателем – увеличим теплоемкость и массу. Используя разработанную программу, получаем результат, показанный на рис. 2.

Как видим, с ростом, теплоемкости и массы веществ, находящихся в промежутке, наблюдаемая обратная реакция человека на тепловой сигнал тканого электронагревателя в виде температурных изменений, вызываемых: потовыделением, генерацией тепла и другими проявлениями, - смещается в сторону тела человека.

Одновременно, амплитуда температурных изменений падает. Причем, падает довольно существенно, и в области нахождения тканого электронагревателя практически пропадает.

Очень интересная картина наблюдается при сохранении всех параметров, как и в случае, показанном на рис. 1, но при более высоком коэффициенте теплоотдачи в тело человека (рис. 3).

Как видно на рис. 3, эффект, связанный с потовыделением, практически полностью исчезает, а эффект, возникающий при генерации тепла телом человека и дальнейшим снижении температуры, остается без изменений.

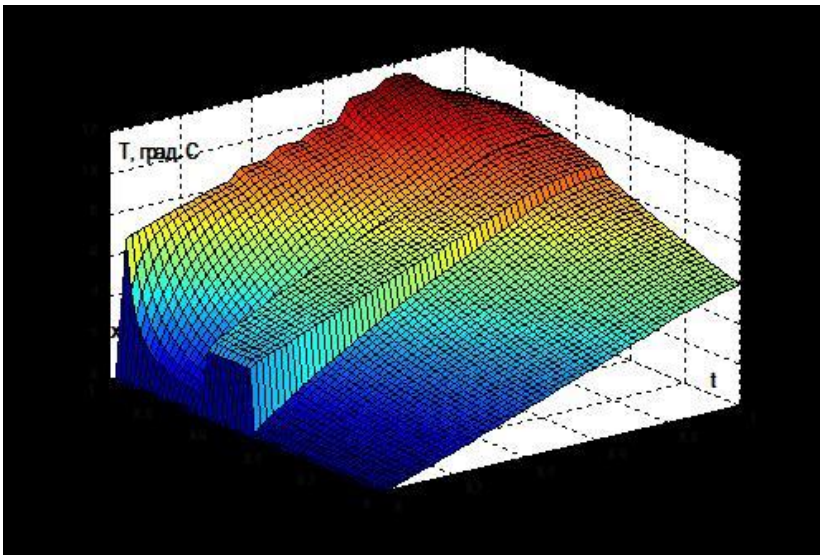


Рис. 2. Характер изменения температуры в области тепловой системы при одновременном потовыделении и других температурных колебаниях тела, вызванных воздействием теплового сигнала на человека, при высокой теплоемкости и удельной массе в промежутке между телом человека и тканым электронагревателем, при этом, в области самого электронагревателя и внешнего теплоизоляционного слоя тканого электронагревателя теплоемкость, удельная масса и теплопроводность остались такими же, как и при проведении опыта, результаты которого изображены на рис.1.

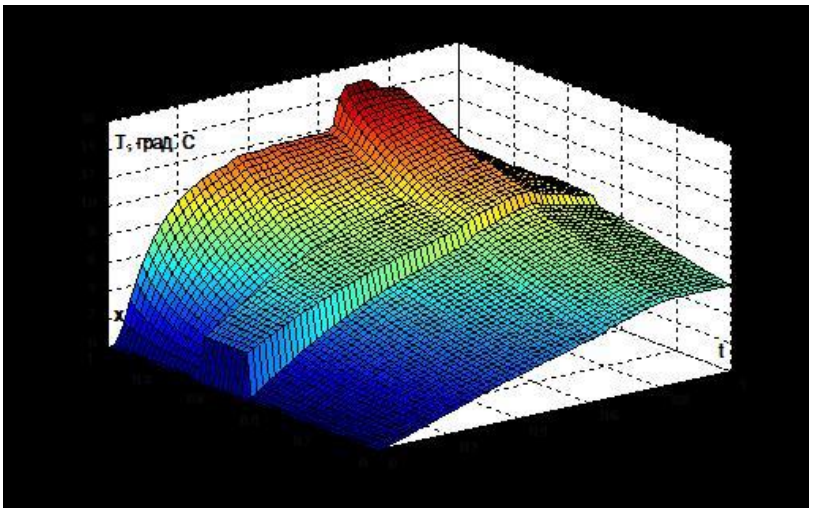


Рис. 3. Характер изменения температуры в области тепловой системы при одновременном потовыделении и других температурных колебаниях тела, вызванных воздействием теплового сигнала на человека, при более высокой теплоотдаче в тело человека, при этом, в области промежутка между телом человека и тканым электронагревателем, самого электронагревателя и внешнего теплоизоляционного слоя тканого электронагревателя теплоемкость, удельная масса и теплопроводность остались такими же, как и проведении опыта, результаты которого изображены на рис.1.

Близкая картина к результатам, приведенным на рис. 2, наблюдается и при изменениях тепловых характеристик теплоизоляционного слоя на внешней поверхности тканого электронагревателя. С ростом его массы и теплоемкости наблюдается снижение амплитуды тепловой реакции тела человека и ее смещение в область нахождения тела человека. В области нахождения тканого электронагревателя динамичные изменения температуры за счет потовыделения и генерации тепла телом человека отсутствуют (рис. 4).

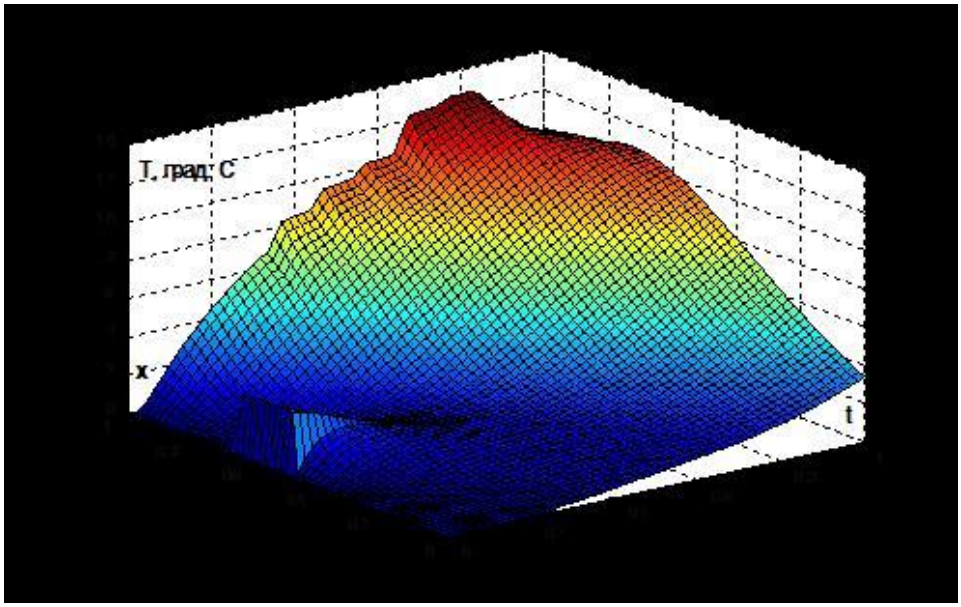


Рис. 4. Характер изменения температуры в области тепловой системы при одновременном потовыделении и других температурных колебаниях тела, вызванных воздействием теплового сигнала на человека, при низкой теплоемкости и удельной массе: в промежутке между телом человека и тканым электронагревателем, в области самого нагревателя и при высокой теплоемкости и массе материала внешнего теплоизоляционного слоя тканого электронагревателя.

Для изучения поведения тепловых сигналов – реакции тела человека на воздействие тканого электронагревателя проведем следующий натурный эксперимент.

Поместим между телом человека и тканым электронагревателем три тканые прокладки. В промежутках между ткаными прокладками, а также между последней прокладкой и тканым электронагревателем, установим термопары.

Включим тканый электронагреватель и будем фиксировать температуру термопар через каждые две минуты. Результаты испытаний показаны на рис. 5, где хорошо видно, что с ростом расстояния от поверхности тела человека уровень сигнала-реакции со стороны тела человека на тепловое воздействие тканого электронагревателя уменьшается. Очень важно, что при создании теплового слоя с помощью тканой прокладки между телом человека и термопарой эффекты, связанные с потовыделением и другими явлениями, не пропадают.

В дополнение к этим испытаниям используем результаты ранее проведенных испытаний, когда термопара находилась между непосредственно телом человека (прямо на его поверхности) и тканым электронагревателем [2, 4]. В этом случае, были зафиксированы только сигналы обратной реакции на тепловое воздействие со стороны тканого электронагревателя в виде генерации температуры телом человека и дальнейшего снижения

температуры, связанного с ростом теплоотдачи в поверхностных областях тела человека, а реакции тела человека, связанной с потовыделением, зафиксировано не было.

Так как по мере удаления термопар от тела человека существенно растет суммарная теплоемкость и масса прокладок, расположенных в промежутке. Результаты натурных испытаний также и полностью подтверждают результаты математических экспериментов, приведенных на рис. 1 и 2.

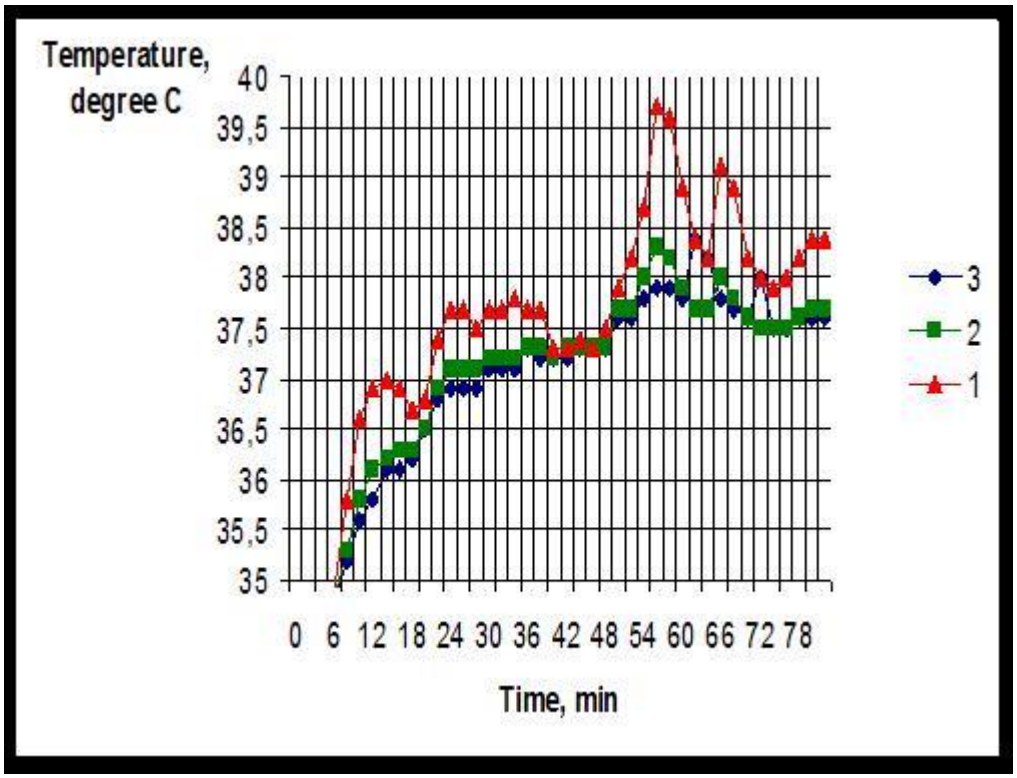


Рис. 5. Экспериментальные данные о характере изменения температуры при потовыделении и других температурных колебаниях человека, вызванных воздействием теплового сигнала в промежутке между телом человека и тканым электронагревателем на разных расстояниях от тела человека: 1 – через токую тканевую прокладку от поверхности тела человека, 2 – на некотором расстоянии (через две тканевые прокладки) от тела человека и одну тканевую прокладку от тканого электронагревателя, 3 – через три тканевые прокладки от поверхности тела человека и непосредственно на тканом электронагревателе.

Выводы.

Согласно проведенному моделированию тепловые параметры системы: тело человека – промежуток между телом человека и тканым электронагревателем – тканый электронагреватель – теплоизоляционный слой на внешней поверхности тканого электронагревателя – внешняя среда, - должны быть согласованы. В противном случае, динамично изменяющиеся сигналы, вызванные обратной реакцией человека на тепловое воздействие тканого электронагревателя, смещаются в область тела человека.

Но не только смещение происходит при рассогласовании тепловых параметров. Одновременно уменьшаются уровни сигналов, что при значительном рассогласовании тепловых параметров приводит сначала к затруднению, а затем и к полной невозможности фиксирования сигналов тепловой реакции человека.

С увеличением расстояния от поверхности тела человека в промежутке между телом человека и тканым электронагревателем уровень регистрируемого сигнала-реакции человека на тепловое воздействие уменьшается. Поэтому измерения реакций человека на тепловое воздействие тканого электронагревателя при температурах более 38ºС наиболее удобно производить в областях наиболее близко расположенной к телу человека.

Воздействие тканого электронагревателя на тело человека контактным способом также требует максимального приближения нагревателя к телу человека, то есть уменьшения промежутка между телом человека и тканым электронагревателем. Однако, необходимо отметить, что отсутствие промежутка между телом человека и тканым электронагревателем приводит к невозможности фиксации тепловых процессов, связанных с потовыделением.

Таким образом, для проведения исследования более полной картины реакции человека на тепловое воздействие тканого электронагревателя, с учетом потовыделения, необходимо одновременно максимально приближать тканый электронагреватель к телу, но обязательно сохранять наличие небольшого промежутка.

Следует отметить, что результаты натурных испытаний и математического моделирования взаимно дополняют друг друга и обеспечивают более достоверную картину тепловых процессов, происходящих в тепловой системе, находящейся на поверхности тела человека, при контактном воздействии тканого электронагревателя.

Список литературы

1. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Тканые электронагревательные элементы и примеры их применения// Вестник научно-технического развития. – 2017. - №7. – С. 30-40.
2. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Моделирование тепловых процессов нагревательной системе// Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2021. - № 2. - С. 116-124.
3. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Программа моделирования тепловых процессов в тонкой многослойной стенке при переменных граничных условиях. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022611599, М., 2022.
4. Shul’zhenko A.A., Modestov M.B. Temperature response of a person to a heat signal. Editors Zhengbing Hu, Sergey Petoukhov, Matthew He Advances in Artificial Systems for Medicine and Education book series (AISC, volume 1126) (The Fourth International Conference of Artificial Intelligence, Medical Engineering, Education (AIMII 2020), P.149-158.
5. Morrison S.F., Nakamura K. Central neural pathways for thermoregulation. Front Biosci. Landmark Ed. 2011. jan 1;16: P. 74-104.
6. Hensel H. Thermoreception and temperature regulation. – London Academic Press. Monographs of the Physiological Society, 1981. - No. 38. - 321 p.
7. Евтушенко А.А. Функциональные изменения активности генов термочувствительных TRP ионных каналов при температурных воздействиях на организм в норме и при артериальной гипертензии. Диссертация … Новосибирск. НИИФФМ. 2016. 160 с.

Дата поступления: 30 марта 2022 г.