

УДК 687.157:[612.53+612.135]

М.В. РОДИЧЕВА, А.В. АБРАМОВ, Ю.И. ЛОКТИОНОВА, А.И. ЖЕРЕБЦОВА

## РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ КРОВИ И ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ОЦЕНКЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОДЕЖДЫ

**Аннотация.** В традиционных исследованиях теплового состояния человека не учитывается изменение микроциркуляции крови, которая играет существенную роль в терморегуляции организма. В работе показана возможность применения результатов исследования параметров микроциркуляции крови при оценке теплового состояния человека. В процессе экспериментальных исследований сопоставлялись результаты регистрации перфузии крови и температуры пододежного пространства при различных рабочих позах и видах нагрузки. Результаты исследований позволили установить прямую корреляцию между изменением температуры пододежного пространства и величиной микроциркуляции крови, что позволяет судить о возможности оценки теплового состояния человека с учетом параметров микроциркуляции крови в поверхностных слоях кожи.

**Ключевые слова:** тепловое состояние человека, вентилируемая одежда, физическая нагрузка, термометрия, лазерная доплеровская флоуметрия, микроциркуляция крови.

### Введение.

Современные методы оценки теплового состояния человека основаны на представлении организма человека в виде открытой термодинамической системы непрерывно вырабатывающей тепло. Тепловая энергия переносится от «ядра» тела к его «оболочке» и рассеивается в окружающую среду [1, 2].

Ведущую роль в процессе переноса тепла между «ядром» и «оболочкой» тела играет кровоток, а вазомоторные реакции выступают в роли доминирующих механизмов терморегуляции [3]. В первую очередь на изменение факторов окружающей среды реагирует микроциркуляторное русло. В то же время, микроциркуляция крови недостаточно полно учитывается при математическом моделировании и экспериментальных исследованиях.

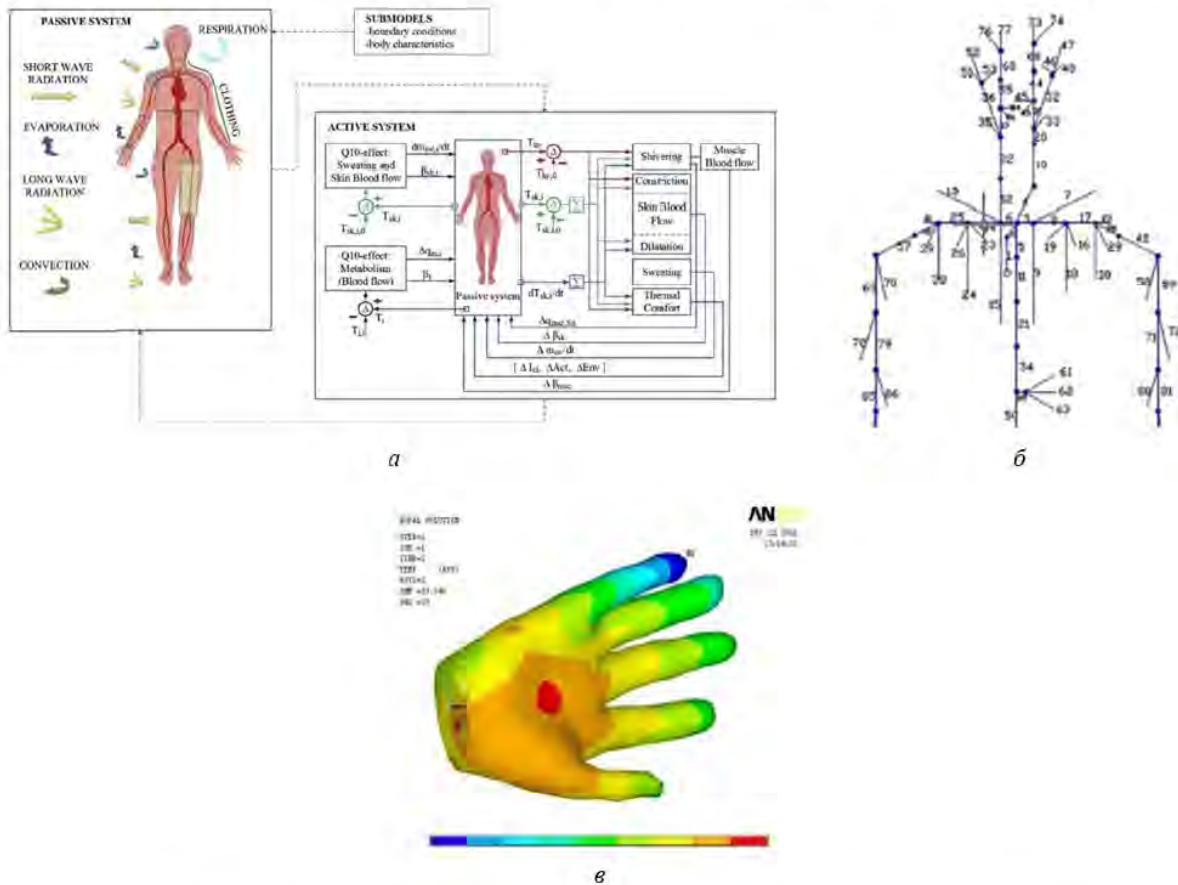
Основой современного численного моделирования тепловых состояний человека являются математическая модель D. Fiala (рисунок 1, а), согласно которой все системы организма разделены на «пассивную» и «активную» [1]. «Пассивная» система рассеивает тепло в окружающую среду, элементы «активной» регулируют интенсивность выработки тепла и его перенос к поверхности тела.

При составлении численных моделей теплового состояния человека кровеносная система представляется в виде сети сообщающихся трубок различного диаметра (например для головы и верхней части туловища — рисунок 1, б) [4]. Течение крови в трубках описывается уравнением Пуазейля.

Механизмы терморегуляции в численных моделях теплового состояния человека воспроизводятся за счет изменения диаметра трубок и интенсивности конвективного переноса крови. Коэффициенты вазомоторных реакций принимаются согласно результатам R. Gordon, полученным в 1976 году, которые почти не учитывают параметры микроциркуляции крови [5].

В числе основных результатов математического моделирования – распределение температурного поля на поверхности тела (например, для кисти — рисунок 1, в). Проверка модели осуществляется путем сопоставления расчетных результатов с экспериментальными.

В процессе эксперимента охлаждающее (нагревающее) воздействие моделируется в климатических камерах или с помощью технологии «Air Sleeve» (рисунок 2). В экспериментальных исследованиях дополнительно измеряются: метаболические тепловыделения; температуры «ядра» и «оболочки» тела; интенсивность потоотделений [6].



**Рисунок 1 – Современные математические модели терморегуляции организма человека:**  
 а) схема модели D. Fiala; б) схема узлов кровотока в модели M. Sallum;  
 в) результаты решения математической модели теплового состояния человека на примере температурного поля поверхности кисти по модели R. McGuffin [6]

Как видно, параметры микроциркуляции крови в исследованиях теплового состояния человека учитываются косвенно – за счет оценки температурного поля на поверхности тела. В то же время система терморегуляции человека является достаточно инерционной и изменения традиционных физиологических показателей (средневзвешенная температура кожи (СВТК), частота сердечных сокращений (ЧСС) и др.) регистрируются через несколько минут после начала охлаждающего (нагревающего) воздействия. Это затрудняет оценку теплового состояния человека при нестационарном теплообмене.



**Рисунок 2 – Моделирование охлаждающего воздействия на поверхности элемента тела по технологии «Air sleeve»**

Для прямой или косвенной оценки микроциркуляции крови в настоящее время применяется несколько диагностических методов. Среди наиболее распространенных в клинической практике можно выделить ультразвуковую доплерографию (в том числе дуплексную), реовазографию, компьютерную томографическую и магнитно-резонансную ангиографию, транскутанную оксиметрию, капиллярскопию [7]. Несмотря на разнообразие имеющихся технологий, их применение в исследованиях теплового состояния человека при охлаждающем или нагревающим воздействии, может быть весьма затруднительным.

Огромным потенциалом для проведения подобного вида исследований обладает лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ). Данный метод неинвазивной оптической

диагностики системы микроциркуляции крови основан на зондировании ткани лазерным излучением и последующем анализе рассеянного и отраженного от движущихся эритроцитов излучения [8]. Результатом измерений в ЛДФ является численное выражение перфузии тканей кровью — показатель микроциркуляции, измеряемый в перфузионных единицах (пф.ед.). В первом приближении данная величина прямо пропорциональна концентрации эритроцитов в зондируемом объеме и их средней скорости. С помощью ЛДФ оценивают функциональное состояние микроциркуляторного русла организма и вклад различных ритмов колебаний кровотока в конечный сигнал [9].

Принципиально новые возможности для проведения ЛДФ-измерений открыло недавнее появление новых сверхкомпактных одномодовых энергоэффективных VCSEL-лазеров [10]. С появлением портативных носимых устройств ЛДФ стало возможным проведение долговременного мониторинга микроциркуляции, а также исследование динамики изменения перфузии при различных функциональных пробах. Применение распределенной системы носимых лазерных доплеровских анализаторов также кажется перспективным в области оценки состояния микроциркуляции при моделировании различных тепловых состояний человека.

Целью настоящей работы явилось изучение возможности совместного применения метода лазерной доплеровской флоуметрии и метода оценки температуры пододежного пространства для прогнозирования теплового состояния человека на примере комплекта спецодежды для работников тепличных хозяйств.

#### **Материалы и методы исследования.**

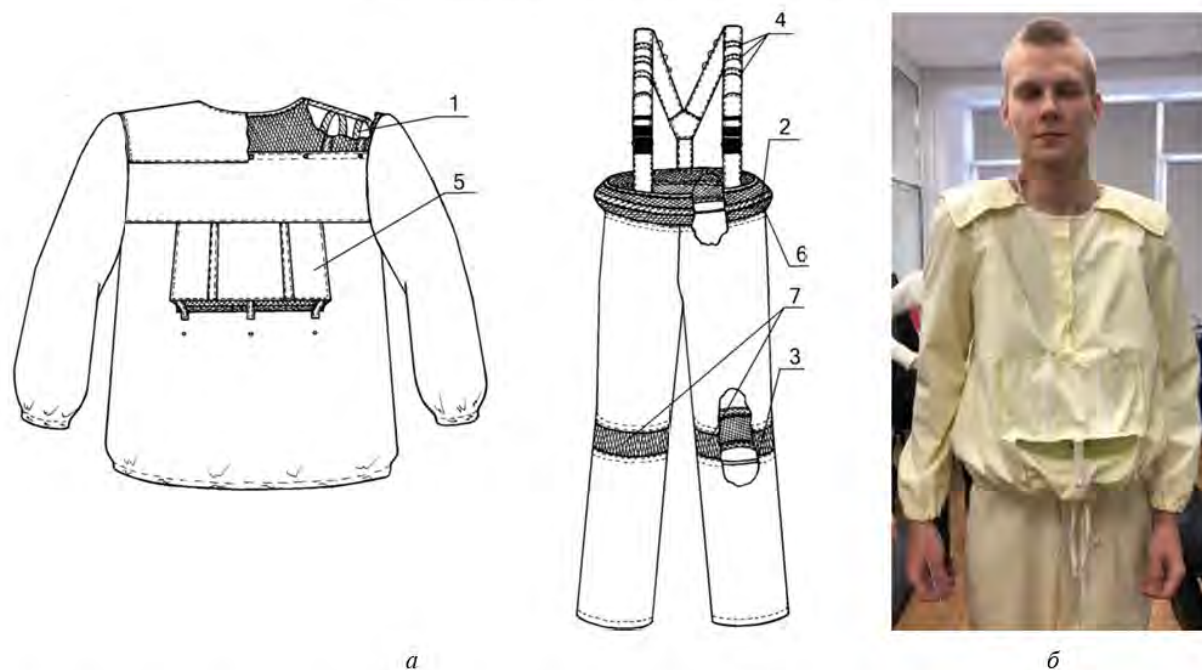
Существует прямая корреляция между тепловым состоянием человека и параметрами пододежного пространства (температура, величины концентрации водяного пара и углекислого газа). Человек может регулировать свое тепловое состояние за счет влияния на параметры пододежного пространства. Одним из способов решения этой задачи является использование вентилируемой одежды. Такие образцы содержат в своей конструкции каркасные и вентиляционные элементы. Система каркасов создает зазор между костюмом и телом, что обеспечивает возможность движения воздуха под одеждой. Открывание и закрывание вентиляционных элементов позволяет регулировать процесс поступления воздуха под одежду, что в свою очередь изменяет состояние пододежного микроклимата и, как следствие, тепловое состояние организма.

Принципы проектирования вентилируемой одежды развиваются в Орловском государственном университете имени И.С. Тургенева на протяжении нескольких лет [11]. На их основе разработаны многочисленные конструкции, например комплект для работников тепличных хозяйств (рисунок 3 а). Внешний вид комплекта представлен на рисунке 3 б.

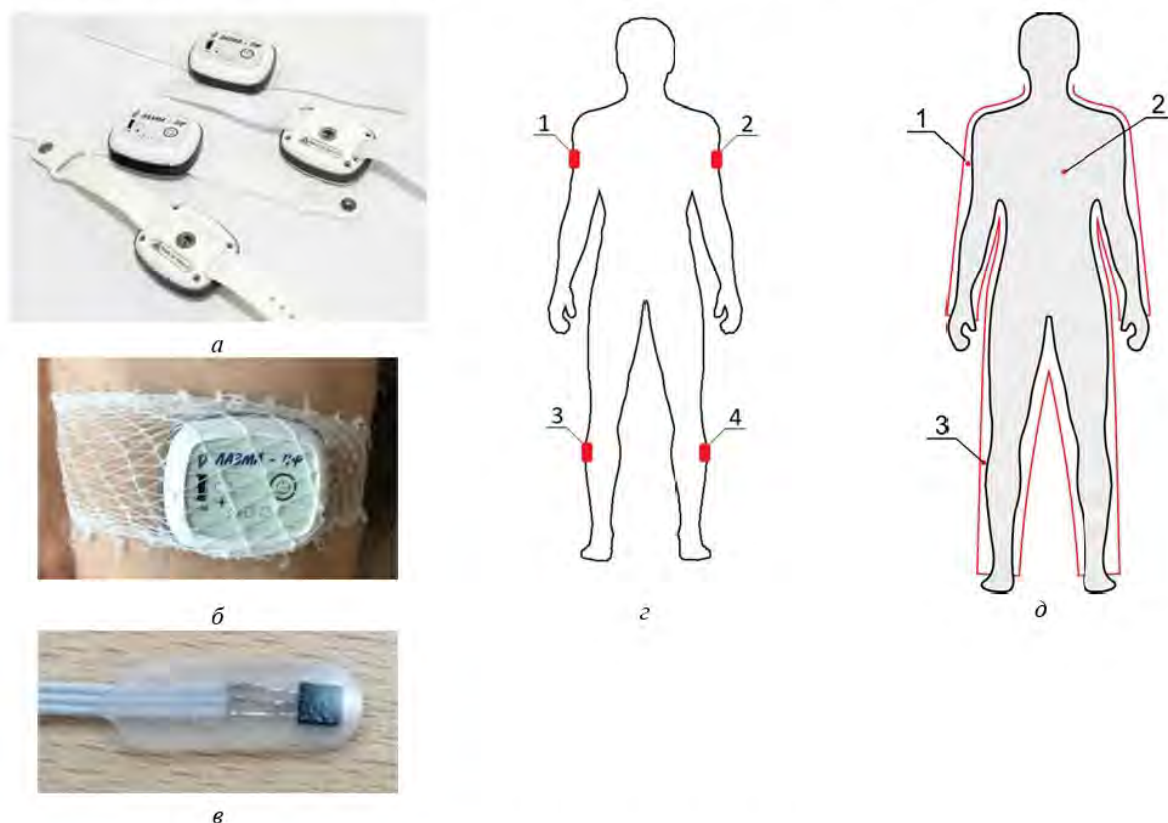
Каркасные элементы в изделиях расположены на конструктивных уровнях плеча, бедер, колена (поз. 1–4), вентиляционные элементы — на конструктивных уровнях груди, бедер, колена (поз. 5–7). Как показывают результаты исследований, проведенных на элементах пакетов вентилируемой одежды, изменение теплоотдачи может составлять 20–35 % [12].

В процессе эксперимента проводилась оценка параметров микроциркуляции крови и температуры воздуха пододежного пространства при различных видах физической активности испытуемого. Испытуемым являлся здоровый мужчина в возрасте 21 года, без вредных привычек и диагностированных хронических заболеваний.

Для регистрации микроциркуляции крови использовалась распределенная система лазерных доплеровских анализаторов, состоящая из 4-х приборов «ЛАЗМА ПФ» (ООО НПП «ЛАЗМА», г. Москва) с длиной волны лазерного излучения 850 нм (рисунок 4, а). Носимые устройства фиксировались на поверхности тела с помощью сетчатых трубчатых бинтов (рисунок 4, б) и располагались симметрично справа и слева. В качестве зон исследования были выбраны внешняя поверхность плеча, а также внешняя поверхность верхней трети голени (рисунок 4, г).



**Рисунок 3 – Одежда для работников тепличных хозяйств:** а) технический эскиз элементов одежды (1–4 – каркасные элементы, соответственно: на линии плеч, на линии талии, на линии колена, по верхней части туловища; 5–7 – вентиляционные элементы, соответственно: на линии груди, на линии талии, на линии колена); б) испытуемый в комплекте вентилируемой одежды



**Рисунок 4 – Измерительное оборудование: лазерные доплеровские анализаторы:** а) внешний вид; б) способ фиксации на теле; в) датчики температуры: в) внешний вид; д) схема расположения в пододежном пространстве (1–3 – порядковые номера датчиков)

Для измерения температуры воздуха пододежного пространства использовались первичные преобразователи авторской конструкции (рисунок 4, в), которые закреплялись на внутренней поверхности одежды таким образом, чтобы чувствительный элемент находился в воздухе между одеждой и телом человека. Преобразователи размещались в трех точках — на рукаве и брючине над лазерными доплеровскими анализаторами, а также на полочке куртки на уровне груди (рисунок 4, д).

Параметры микроциркуляции крови и температуры воздуха под одеждой измерялись с частотой 20 и 1 Гц соответственно. Показания перфузии крови с устройств 1 и 2, 3 и 4 усреднялись, таким образом оценивался средний уровень перфузии в исследуемых областях плеч и голеней. Динамика температуры воздуха под одеждой оценивалась путем усреднения показаний преобразователей температуры, установленных в пододежном пространстве на всех трех уровнях. Одновременно с инструментальными измерениями в процессе эксперимента проводилась оценка субъективных ощущений испытуемого.

В первой фазе эксперимента испытуемый находился в рабочих позах «сидя» и «стоя». Регистрация перфузии и температуры воздуха под одеждой проводилась на протяжении всего времени первой фазы. Во второй фазе эксперимента исследовалась динамика теплового состояния испытуемого в условиях физической нагрузки по следующему протоколу: в течение первых 3 минут испытуемый находился в рабочей позе «стоя», после чего в течение 40 секунд совершал 20 приседаний, а затем отдыхал от физической нагрузки в течение 7 минут. Параметры перфузии регистрировались на первом и третьем этапах эксперимента, температуры воздуха пододежного пространства — на втором и третьем этапах.

#### Результаты и обсуждение.

В рабочей позе «сидя» температура воздуха под одеждой остается стабильной (рисунок 5, а). На уровне груди с плеча ее значение незначительно снижается, что вызвано уменьшением тепловыделений. Рост температуры наблюдается только на уровне голени, что связано с деформацией воздушной прослойки. Рисунок 5, б демонстрирует тенденцию роста перфузии с течением времени, что может быть обусловлено дилатацией сосудов кожи под действием местных факторов регуляции (аксон-рефлекс) в условиях изоляции пододежного пространства от внешней среды. Локальное увеличение показателя микроциркуляции в районе 90–100 сек. от начала эксперимента предположительно связано с ответом микроциркуляторного русла на акт глубокого вдоха.

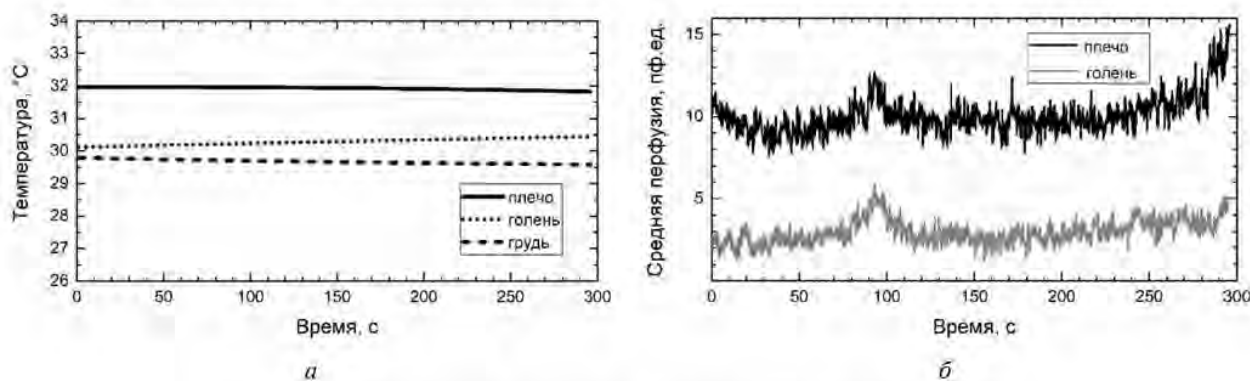


Рисунок 5 – Динамика температуры пододежного пространства (а) и средней тканевой перфузии (б) в положении сидя

Среднее значение температуры пододежного пространства составляет  $t_{в-п} = 30,6$  °С, среднее значение перфузии в области плеча и голени — 10,3 и 3,9 пф.ед. соответственно. Величина  $t_{в-п}$  немного ниже оптимальных величин, не смотря на это испытуемый оценивает свои теплоощущения на комфортном уровне.

В рабочей позе «стоя», за счет интенсификации движения воздуха, температура под одеждой на уровнях груди и колена снижается, после чего начинает возрастать из-за роста

теплопродукции испытуемого (рисунок 6, а). На уровне плеча температура увеличивается на протяжении всей фазы эксперимента, что связано с накоплением теплого воздуха в верхней части комплекта. За счет организации воздушной прослойки величина  $t_{в-п}$  снижается на  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  по сравнению с положением «сидя». Среднее значение перфузии в области плеча составило 8,8 пф.ед., в области верхней трети голени — 3,6 пф.ед. (рисунок 6, б). Субъективные теплоощущения испытуемого оставались на комфортном уровне.

Как видно, снижение температуры пододежного пространства на  $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  вызвало снижение микроциркуляции на 1,5 и 0,3 пф.ед. соответственно. Сохранение субъективных ощущений испытуемого свидетельствует о незначительном изменении условий теплообмена, при этом оценка традиционных показателей не позволит выявить существенных изменений теплового состояния.

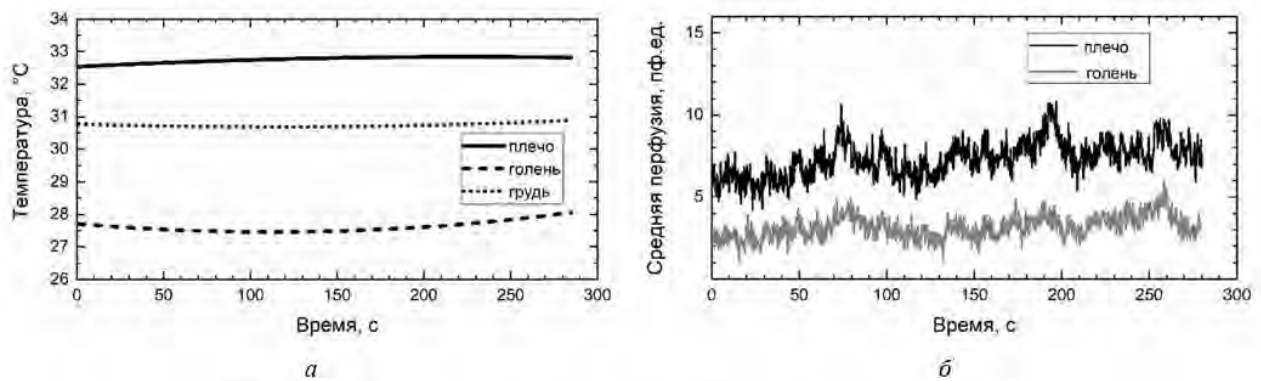


Рисунок 6 – Динамика температуры пододежного пространства (а) и средней тканевой перфузии (б) в положении стоя

В условиях физической нагрузки при закрытых вентиляционных элементах наблюдалось перераспределение воздуха в пододежном пространстве, за счет чего температура воздуха под одеждой на уровне груди и плеча снижалась, на уровне колена — возрастала (рисунок 7, а). За счет воздухообмена между пододежным пространством наблюдалось снижение величины  $t_{в-п}$  с  $30,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  в начальный момент приложения нагрузки до  $29,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  в начальный момент фазы отдыха. Величина микроциркуляции за это же время снизилась на 0,3 пф.ед. в области плеча и возросла на 0,8 пф.ед., в области верхней трети голени (рисунок 7, б).

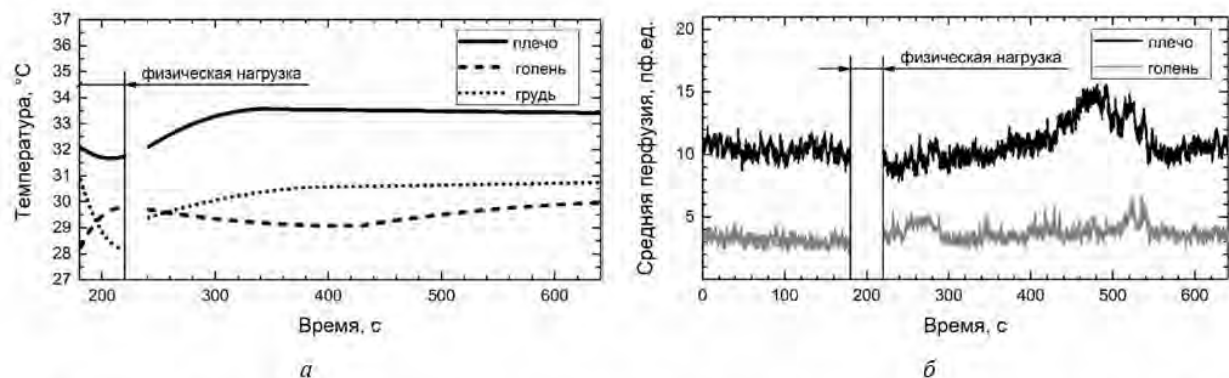


Рисунок 7 – Динамика температуры пододежного пространства (а) и средней тканевой перфузии (б) при применении физической нагрузки и в процессе отдыха при закрытых вентиляционных элементах

После снятия физической нагрузки и до конца испытания величина  $t_{в-п}$  повысилась на  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до значения  $31,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Среднее значение перфузии на уровне плеча возросло на 1,3 пф.ед., на уровне голени осталось стабильным (наблюдаемое снижение не превышало погрешность изменения). Такая реакция обусловлена интенсификацией кротовака в связи

адаптацией микроциркуляторного русла к физической активности и, соответственно, повышенному потреблению кислорода. Сниженная теплоотдача в окружающую среду вследствие слабой конвекции при закрытых вентиляционных элементах также способствовало росту перфузии.

Динамика температуры воздуха в пододежном пространстве в условия физической нагрузки при открытых вентиляционных элементах (рисунок 8, а) аналогична наблюдаемой выше. Различия между ними носят количественный характер и связаны с более интенсивным теплосъемом с поверхности тела человека. Величина  $t_{в-п}$  в начале физической нагрузки составляла 31,1 °С, на момент окончания — 30,7 °С. Среднее значение перфузии при этом возросло на 0,4 пф.ед. в области плеча и на 1,9 пф.ед. в области верхней трети голени (рисунок 8, б).

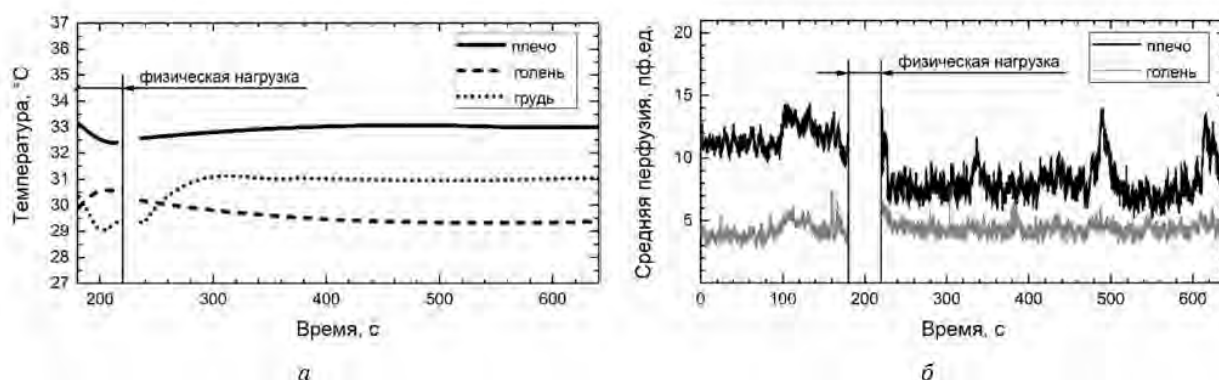


Рисунок 8 – Динамика температуры пододежного пространства (а) и средней тканевой перфузии (б) при приложении физической нагрузки и в процессе отдыха при открытых вентиляционных элементах

В процессе отдыха после приложенной нагрузки величина температуры пододежного пространства возвратилась к значению 31,1 °С. Среднее значение перфузии в процессе отдыха после физической нагрузки существенно снизилось по сравнению с базовыми измерениями: с 10,7 до 8,6 пф.ед. в области плеча и с 5,8 до 4,6 пф.ед. в области голени. Можно предположить, что более интенсивный теплосъем с верхней части тела способствует снижению микроциркуляции и компенсирует интенсификацию кровотока после физической нагрузки.

#### Выводы.

Полученные данные иллюстрируют корреляцию между динамикой микроциркуляции крови и температурой пододежного пространства (рисунок 9). При изменении рабочей позы наблюдается снижение как температуры пододежного пространства, так и средней перфузии в исследуемых областях.

В условиях физической нагрузки при закрытых вентиляционных элементах наблюдается повышение температуры воздуха под одеждой и средней перфузии крови, измеренной в области плеча, что связано с особенностью перераспределения теплового и холодного воздуха под одеждой. В условиях физической нагрузки при открытых вентиляционных элементах плавное снижение температуры воздуха в пододежном пространстве приводит к росту средней перфузии крови как в области плеча, так и голени, а восстановление температуры до исходных значений напротив — к снижению величины перфузии. Это, предположительно, связано с тем, что более интенсивный теплосъем с верхней части тела способствует снижению микроциркуляции и компенсирует интенсификацию кровотока после физической нагрузки.

Таким образом, оценка микроциркуляции крови при проведении физиологических исследований позволит отслеживать изменение теплового состояния человека даже при незначительном изменении условий теплообмена между организмом и окружающей средой. Однако для выработки конкретных рекомендаций и методик необходимо существенно расширить объем экспериментальных данных.

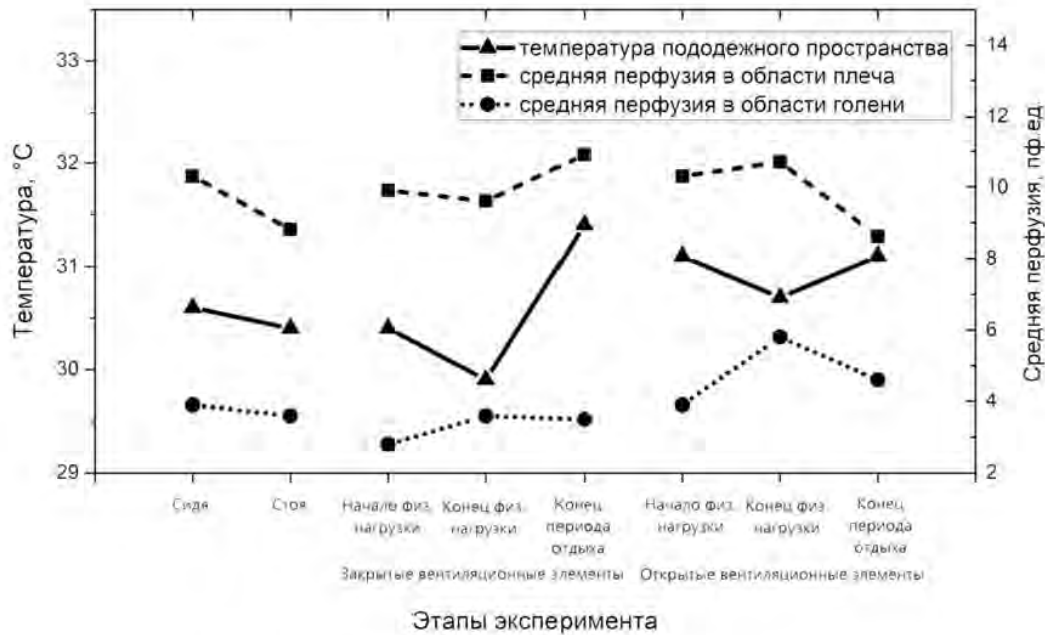


Рисунок 9 – Обобщённые данные эксперимента

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-3400.2018.8.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фиала, Д.А. computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system [Text] / D. Fiala, K.J. Lomas, M. Stolrer // Journal of Applied Physiology. – 1999. – Vol. 87. – № 5. – P. 1957–1972. – ISSN 8750–7587.
2. Минами, В. Ю. Study on human physiological models for hot environments [Text] / Y. Minami, R. Ooka, T. Sakoi, K. Tsuzuki, S. Sawasaki // Sixth International Thermal Manikin and Modelling Meeting (6I3M). – (Hong Kong, 2006). – P. 89–97.
3. Жеребцова, А.И. Аналитический обзор математических моделей взаимосвязи параметров кровоснабжения и кожной температуры [Текст] / А.И. Жеребцова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 5(313). – С. 104–113. – ISSN 2073–7408.
4. Саломов, М. А. New transient bioheat model of the human body and its integration to clothing models [Text] // International Journal of Thermal Sciences. – 2007. – Vol. 46. – № 4. – P. 371–384. – ISSN 1290–0729.
5. Гордон, А. Г. Mathematical model of the human temperature regulatory system – Transient cold exposure response [Text] / R.G. Gordon, R.B. Roemer, S.M. Horvath // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 1976. – Vol. 23. – № 6. – P. 434–444.
6. Фарингтон, В. Р. Use of a thermal manikin to evaluate human thermoregulatory responses in transient, non-uniform, thermal environments. SAE Paper No. 2004-01-2345. [Text] / R.B. Farrington, J.P. Rugh, D. Bharathan, R. Burke // Proceedings of the 34th International Conference on Environmental Systems (ICES). – (Colorado Springs, Colorado, 19–22 July 2004). – Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers. – 2004. – 9 pp.
7. Дэли, С. М. Go with the flow: a review of methods and advancements in blood flow imaging [text] / s.m. Daly, m.j. Leahy // journal of biophotonics. – 2013. – vol. 6. – № 3. – p. 217–255. – issn 1864–063x.
8. Фредриксон, М. И. Model-based quantitative laser Doppler flowmetry in skin [Text] / I. Fredriksson, M. Larsson, T. Strömberg // Journal of Biomedical Optics. – 2010. – Vol. 15. – № 5. – P. 057002. – ISSN 1083–3668.
9. Стефановская А. Г. Wavelet analysis of oscillations in the peripheral blood circulation measured by laser doppler technique [text] / a. Stefanovska, m. Bracic, h.d. Kvermmo // iee transactions on biomedical engineering. – 1999. – vol. 46. – № 10. – p. 1230–1239. – issn 0018–9294.
10. Жеребцов, Е.А. Novel wearable-cs-el-based blood perfusion sensor [text] / e. Zherebtsov, s. Sokolovski, v. Sidorov, i. Rafailov, a. Dunaev, e. Rafailov // 2018 international conference laser optics (iclo). – (saint petersburg, russia, 4–8 june 2018). – p. 564–564.



11. Родичева, М. К. Биотехнические основы проектирования одежды для защиты от неблагоприятных температур [текст] / М.В. Родичева, А.В. Абрамов, А.В. Уваров. – Орел: госуниверситет–унпк, 2014. – 137 с.

12. Родичева, М. А. Расчет параметров естественной вентиляции при разработке средств индивидуальной защиты [Текст] // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – № 3(287). – С. 120–124. – ISSN 2073–7408.

**Родичева Маргарита Всеволодовна**

ОГУ имени И.С. Тургенева  
Кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой индустрии моды  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95  
Тел.: +7 (920) 287–93–32  
E-mail: rodicheva.unpk@gmail.com

**Абрамов Антон Вячеславович**

ОГУ имени И.С. Тургенева  
Доктор технических наук, доцент,  
доцент кафедры техносферной безопасности  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95  
Тел.: +7 (961) 627–88–88  
E-mail: ant-lin88@mail.ru

**Локтионова Юлия Игоревна**

ОГУ имени И.С. Тургенева  
Студент кафедры приборостроения,  
метрологии и сертификации  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95  
Тел.: +7 (4862) 41–98–37  
E-mail: julya-loktionova@mail.ru

**Жеребцова Ангелина Ивановна**

ОГУ имени И.С. Тургенева  
Кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
научно-технологического центра биомедицинской фотоники  
302026, г. Орел, ул. Комсомольская, 95  
Тел.: +7 (4862) 41–98–37  
E-mail: angelina.zherebtsova@yandex.ru

---

M.V. RODICHEVA, A.V. ABRAMOV, YU.I. LOKTIONOVA, A.I. ZHEREBTSOVA

**DEVELOPMENT METHODS RESEARCH MICROCIRCULATION BLOOD  
AND TERMAL STATES PERSON EVALUTION OPRATIONAL  
EFFICIENCY CLOTHES**

**Abstract.** *Traditional studies of the thermal state of a person do not take into account the changes in the blood microcirculation, which plays a significant role in the thermoregulation of the body. The paper has shown the possibility of applying the results of the study of blood microcirculation parameters in assessing the thermal state of a person. In the course of the experimental studies, the results of the registration of blood perfusion and temperature of under clothes space with different working positions and types of workload were compared. The research results allowed establishing a direct correlation between changes of the temperature of the under clothes space and the value of blood microcirculation, which offers the opportunity to assess the thermal state of a person taking into account the parameters of blood microcirculation in the surface layers of the skin.*

**Keywords:** *human thermal state, ventilated clothing, physical activity, thermometry, laser Doppler flowmetry, blood microcirculation.*

**BIBLIOGRAPHY**

1. Fiala, D. A. computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system [Text] / D. Fiala, K.J. Lomas, M. Stohrer // *Journal of Applied Physiology*. – 1999. – Vol. 87. – № 5. – P. 1957–1972. – ISSN 8750–7587.

2. Minami, Y. Study on human physiological models for hot environments [Text] / Y. Minami, R. Ooka, T. Sakoi, K. Tsuzuki, S. Sawasaki // *Sixth International Thermal Manikin and Modelling Meeting (6I3M)*. – (Hong Kong, 2006). – P. 89–97.

3. Zherebtsova, A.I. Analytical review of mathematical models of relationship between blood flow and skin temperature parameters [Text] / A.I. Zherebtsova // *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. – 2015. – № 5(313). – P. 104–113. – ISSN 2073–7408.

4. Salloum, M. A new transient bioheat model of the human body and its integration to clothing models [Text] // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2007. – Vol. 46. – № 4. – P. 371–384. – ISSN 1290–0729.

5. Gordon, R.G. A mathematical model of the human temperature regulatory system – Transient cold exposure response [Text] / R.G. Gordon, R.B. Roemer, S.M. Horvath // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 1976. – Vol. 23. – № 6. – P. 434–444.

6. Farrington, R.B. Use of a thermal manikin to evaluate human thermoregulatory responses in transient, non-uniform, thermal environments. SAE Paper No. 2004-01-2345. [Text] / R.B. Farrington, J.P. Rugh, D. Bharathan, R. Burke // Proceedings of the 34th International Conference on Environmental Systems (ICES). – (Colorado Springs, Colorado, 19–22 July 2004). – Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers. – 2004. – 9 pp.

7. Daly, S.M. Go with the flow: A review of methods and advancements in blood flow imaging [Text] / S.M. Daly, M.J. Leahy // Journal of Biophotonics. – 2013. – Vol. 6. – № 3. – P. 217–255. – ISSN 1864–063X.

8. Fredriksson, I. Model-based quantitative laser Doppler flowmetry in skin [Text] / I. Fredriksson, M. Larsson, T. Strömberg // Journal of Biomedical Optics. – 2010. – Vol. 15. – № 5. – P. 057002. – ISSN 1083–3668.

9. Stefanovska, A. Wavelet analysis of oscillations in the peripheral blood circulation measured by laser Doppler technique [Text] / A. Stefanovska, M. Bracic, H.D. Kvervmo // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 1999. – Vol. 46. – № 10. – P. 1230–1239. – ISSN 0018–9294.

10. Zherebtsov, E. Novel wearablevcsl-based blood perfusion sensor [Text] / E. Zherebtsov, S. Sokolovski, V. Sidorov, I. Rafailov, A. Dunaev, E. Rafailov // 2018 International Conference Laser Optics (ICLO). – (Saint Petersburg, Russia, 4–8 June 2018). – P. 564–564.

11. Rodicheva M.V. Biotechnical bases of designing clothes for protection against adverse temperatures / M.V. Rodicheva, A.V. Abramov, A.V. Uvarov. – Orel State University–ESPC, 2014. – 137 p.

12. Rodicheva M.V. Calculation of natural ventilation parameters in the development of personal protective equipment / M.V. Rodicheva, A.V. Abramov, E.M. Agashkov, T.I. Belova // Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology. – 2011. – № 3(287). – P. 120–124. – ISSN 2073–7408.

**Rodicheva Margarita Vsevolodovna**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
Candidate of Technical Sciences,  
Head of the Fashion Industry Department  
302026, Orel, 95 Komsomolskaya St.  
Tel.: +7 (920) 287–93–32  
E-mail: rodicheva.unpk@gmail.com

**Abramov Anton Vyacheslavovich**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
Doctor of Technical Sciences,  
Associate Professor of the Technosphere Safety Department  
302026, Orel, 95 Komsomolskaya St.  
Tel.: +7 (961) 627–88–88  
E-mail: ant-lin88@mail.ru

**Loktionova Yulia Igorevna**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
Student of the Instrument Engineering,  
Metrology and Certification Department  
302026, Orel, 95 Komsomolskaya St.  
Tel.: +7 (4862) 41–98–37  
E-mail: julya-loktionova@mail.ru

**Zherebtsova Angelina Ivanovna**

Orel State University named after I.S. Turgenev  
Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow  
of the Research and Development Center of Biomedical Photonics  
302026, Orel, 95 Komsomolskaya St.  
Tel.: +7 (4862) 41–98–37  
E-mail: angelina.zherebtsova@yandex.ru