

Использование минеральных добавок в функциональном текстиле

В. Т. Липик

Наньянский технологический университет, Сингапур

Аннотация. Разработка текстиля с минеральными добавками имеет актуальный потенциал применения. Такие ткани могут использоваться для улучшения кровообращения у людей с хроническими заболеваниями, облегчения мышечной боли, поддержки послеоперационного восстановления. В спорте и повседневной жизни текстиль с позитивным влиянием на кровоснабжение помогает ускорить восстановление, улучшить снабжение мышц кислородом и снизить риск травм. Цель исследования заключалась в оценке воздействия тканей с добавками гематита, охры и графена на организм человека как в состоянии покоя, так и при физических нагрузках, а также в изучении их потенциала для применения в спортивной одежде. В работе было исследовано влияние добавок графена, охры и гематита к полипропиленовой ткани на ряд биологических параметров волонтеров в состоянии покоя и при выполнении физических упражнений. Смещение полимера с добавками, взятыми в количестве 2 % массовых, было сделано путем компаундирования с последующим получением нити и одежды. Предполагаемое воздействие на волонтеров основано на эмиссии добавками инфракрасного излучения. В состоянии покоя одежда с охрой и гематитом замедлила снижение интенсивности кровотока на 15–20 % по сравнению с одеждой сравнения. При выполнении упражнений у волонтеров, одетых в одежду с охрой или гематитом, увеличилась интенсивность кровотока в 2–2,5 раза чем в одежде-образце. При этом зафиксирована шестикратная разница в увеличении диаметра локтевой артерии при воздействии добавок гематита и охры по сравнению с экспериментом, где использовалась одежда сравнения.

Ключевые слова: функциональная нить, неорганические добавки, эмиссия, инфракрасное излучение, интенсификация кровообращения.

Информация о статье: поступила 20 ноября 2024 года.

Статья подготовлена по материалам доклада Международной научно-технической конференции «Инновации в текстиле, одежде, обуви (ICTAI-2024)», которая состоялась 20–21 ноября 2024 года в учреждении образования «Витебский государственный технологический университет» (Республика Беларусь).

Application of mineral additives in functional textiles

Vitali T. Lipik

Nanyang Technological University, Singapore

Abstract. The development of textiles with mineral additives holds significant potential for real-world applications. Such fabrics can enhance blood circulation in individuals with chronic conditions, alleviate muscle pain, and support postoperative recovery. In sports and daily life, textiles with positive effects on blood flow can accelerate recovery, improve muscle oxygenation, and reduce the risk of injuries. This study aimed to evaluate the effects of fabrics containing hematite, ochre, and graphene additives on human physiological parameters both at rest and during exercise, as well as to explore their potential for sportswear applications. The additives were incorporated into polypropylene at 2 % by weight through compounding, followed by the production of yarn and fabrics. The expected effects are based on the infrared radiation emitted by the additives. At rest, garments with ochre and hematite reduced the decline in blood flow intensity by 15–20 % compared to reference apparel. During exercise on an indoor bicycle, blood flow intensity in volunteers wearing apparel with ochre or hematite increased by 2 to 2.5 times compared to reference garments. Additionally, the diameter of the elbow artery expanded sixfold more under the influence of hematite and ochre compared to reference or placebo garments.

Keywords: functional yarn, inorganic additives, emission, infrared radiation, intensification of blood circulation.

Article info: received November 20, 2024.

The article summarizes the research materials presented at the International Scientific and Technical Conference "International Conference on Textile and Apparel Innovation" (ICTAI-2024), held on November 20–21, 2024 at Vitebsk State Technological University (Republic of Belarus).

Введение

В последнее время в производстве текстиля выделилось направление, связанное с добавкой в волокно неорганических веществ, минералов, биокерамики, благородных металлов способных излучать инфракрасные лучи в дальней области спектра. Одежда с добавками излучающими инфракрасный (ИК) спектр оказывает положительные эффекты на тело человека [Leung, 2015]. Эти свойства тканей особенно привлекательно выглядят для применения в изделиях, используемых в медицине и спорте [Libanog, 2022].

При исследовании влияния ИК на организм человека установлены следующие положительные эффекты. Наиболее часто обнаруживаемое влияние тканей с ИК – это термоэффекты, увеличение кровотока [Molina, 2016], влияние на массу тела [Luis Augusto and Munin, 2011; Luis Augusto and Munin, 2013], уменьшение боли и улучшение качества сна [Silva et al., 2009]. Улучшение кровообращения помогает снизить болевые ощущения [Santos E Campos, 2017], быстрее удалить гематомы, поддержать терморегуляцию тела [Zuo, 2023]. Помимо этого, эти текстильные изделия показывают перспективы ускорения восстановления у спортсменов или людей, проходящих физиотерапию.

По сравнению с традиционными медицинскими решениями текстильные изделия обладают уникальными преимуществами. Во-первых, одежда может обеспечивать длительный терапевтический эффект, поскольку ее носят в течение длительного времени, часто 8–10 часов и более. Более того, эти текстильные изделия распределяют свое воздействие по всему телу, что не имеет себе равных среди большинства медицинских устройств, которые обычно воздействуют на локализованные области.

Другое преимущество заключается в неинвазивной природе одежды. В отличие от лекарств, которые подразумевают прием внутрь химических веществ, способных иметь долгосрочные побочные эффекты, терапевтический текстиль работает снаружи, сводя к минимуму риски токсичности или побочных реакций. Это делает его особенно привлекательным для долгосрочного исполь-

зования или для людей с чувствительностью к традиционным методам лечения.

Применение тканей с ИК в области спорта показало улучшение производительности, скорейшее восстановление и уменьшение болезненности мышц после тренировки [Loturco et al., 2016; Nunes et al., 2020] и снижение потребления кислорода во время тренировки при выполнении упражнений низкой интенсивности. Одновременно со снижением потребления кислорода, одежда, создающая излучение в длинноволновом диапазоне, логично повышает эффективность использования кислорода клетками человека [Worobets, Skolnik and Stefanshyn, 2015].

В качестве биокерамики, излучающей инфракрасное излучение, в основном используются неорганические оксиды, такие как Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , TiO_2 и ZnO и др. Нередко в качестве добавки используют природные минералы: мейфан, нефрит, турмалин, слюда [Vatansever and Hamblin, 2012]. Помимо неорганических оксидов необходимо отметить добавку в текстиль углеродных материалов, а в частности графена, который имеет хорошую теплопроводность и хорошо отражает инфракрасное излучение.

Существуют промышленные производства тканей с функциональными неорганическими добавками, фокусирующиеся на двух областях: спорт и медицина. Компания Celliant использует смеси оксидов титана, кремния и алюминия для отражения ИК излучения обратно к телу человека, что приводит к улучшению снабжения тканей кислородом [celliant.com]. Продукты компании Celliant признаны FDA медицинским оборудованием. Корейская компания Ventex Co Ltd добавляет в пряжу более 30 неорганических добавок обладающих различным эффектом на тело человека [ventexkorea.com]. Их продукты с торговыми марками Megaheat и Powerkler обладают способностью улавливать тепло от человеческого тела и возвращать ИК излучение обратно, что повышает скорость кровотока на 11,2 %. Компания Underarmour выпускает коллекцию одежды Recover™ с минеральными добавками ускоряющими восстановление после занятий спортом [underarmour.com]. В 2020 году компа-

ния получила патент на данную разработку, согласно которому в пряжу либо в принт добавляют кремний, карбид циркония, оксид алюминия и другие материалы (Patent US10563349B2). Не только оксиды и минералы используются как добавка к пряжам. Японская компания Biofase Co Ltd добавляет в пряжу наночастицы платины для улучшения синтеза коллагена с положительным влиянием на кожу человека.

Актуальность разработок текстиля с минеральными добавками и области применения огромны. Его можно использовать для лечения хронических заболеваний, таких как плохое кровообращение у больных диабетом, для облегчения мышечной боли или даже для поддержки послеоперационного восстановления. Для пожилых людей этот текстиль может играть важную роль в поддержании здоровья сосудов и предотвращении осложнений, таких как тромбоз глубоких вен. Помимо медицинского применения, ткани с положительным влиянием на систему кровоснабжения человека будут успешно применяться в повседневной жизни и в спорте для ускорения восстановления после тренировок, для предварительного разогрева мышц, позволяющего снизить вероятность травм, для улучшения снабжения мышц кислородом, что приводит к росту спортивных показателей и меньшей утомляемости в любительском спорте. В данной работе приведены результаты разработки тканей с тремя видами добавок – гематита, охры и графена, целью которых являлось определения их влияния на тело человека в состоянии покоя и при выполнении физических упражнений. Исследования были ориентированы на последующее возможное применение подобных функциональных тканей в спортивной одежде.

Методы и материалы

Полипропилен для изготовления пряжи закуплен у нидерландской компании LuondellBasel. Графен получен от сингапурской компании 2DM Materials Pte Ltd. Минеральные добавки – красная охра и гематит в виде измельченной руды, были куплены у сингапурской компании Joo Huat Trading Pte Ltd.

Минералы проходили стадию дробления на дисковом измельчителе 150 Lab Pulverizer компании Ganzhou Li Ang Machinery Pte Ltd с последующим измельчением в шаровой мельнице мокрого помола компании ELE модели ESW-1.0. Средний размер частиц после помола составлял 1,90 мкм, с диаметром D_{90} = 2,93 мкм для гематита и соответственно 1,72 мкм с диаметром D_{90} = 2,48 мкм для красной охры. Сушка частиц после

помола проводилась в распылительной сушилке компании Xiamen Ollital Technology Co. Ltd. Температура горячего воздуха для сушки составляла 270 °С.

Полученные пудры гематита и красной охры исследовали с использованием рентгеноструктурного анализа с определением составов на приборе Shimadzu XRD-6000. Определенные составы гематита: SiO_2 – 2,64 %, Fe_2O_3 – 83,98 %, Al_2O_3 – 1,87 %, CaO – 5,75 %, P_2O_5 – 5,39 %; охры: SiO_2 – 14,51 %, Fe_2O_3 – 69,34 %, Al_2O_3 – 10,98 %, CaO – 1,94 %, TiO_2 – 1,71 %.

Приготовление нити и полотна с функциональными добавками

Компаундирование полимера с функциональными добавками производили на экструдере-компаундере фирмы Wuhan Ruiming (Китай). Целевое содержание добавок в полипропилене составляло 2 % массовых.

Нить производилась на лабораторном экструзионном модуле компании FET (Великобритания) с червяком диаметром 25 мм; соотношением длины к диаметру – 30. Скорость вращения червяка составляла 20 оборотов в минуту. Температуры приемной зоны полимерных гранул и четырех зон нагрева экструдера составляли 200, 210, 220, 220 и 240 градусов. Температура полимерного насоса – 250 градусов, а воротника фильеры – 240 градусов. Для изготовления нити использовали фильеру с 48 отверстиями с диаметром отверстий 0,4 мм, что позволяло при вышеприведенных параметрах экструзионного модуля получать нить с линейной плотностью 75 денье [8,33 текс].

Трикотажное полотно производилось на циркулярной машине компании Heifei AT250 Lab Knitter Anytester Китай с калибром 24, диаметром барабана 40 см.

Содержание гематита и охры в тканях проверили с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии на приборе компании Jeol модель JSM 7600F. Элементное содержание компонентов добавок хорошо видно для обеих тканей (рисунок 2).

Метод FESEM-EDX не является количественным, а сами волокна достаточно трудный объект для такого анализа. Но данный результат позволяет заключить, что добавки присутствуют в конечном продукте.

Эмиссия тканей в диапазоне 4–15 мкм, что максимально приближено к диапазону эмиссии человеческого тела, была измерена при 34 °С с использованием тестера Far Infrared Emissivity Analysis System (HOTTECH EMS302M, Тайвань).



Рисунок 1 – Нити и трикотажные полотна:

1А – образец сравнения – полипропилен без добавок; 1Б – полипропилен с графеном;
1С – полипропилен с гематитом; 1Д – полипропилен с красной охрой

Figure 1 – Yarns and knitted fabrics:

1A – reference – polypropylene without additives; 1B – polypropylene with graphene;
1C – polypropylene with hematite; 1D – polypropylene with red ochre

Эфюзивность пленок при 24 °С была измерена при помощи измерителя тепловой эфюзивности Thermtest (Канада). Эфюзивность представляет собой скорость, с которой материал поглощает тепло. При низких значениях эфюзивности материал ощущается теплым на ощупь, при высоких значениях – холодным. Эфюзивность определялась по стандарту ASTM D7984-16.

Испытания на волонтерах

Испытания одежды с добавками на волонтерах проводились на факультете спорта Национально-

го Института Образования Сингапура, согласно протоколу, утвержденному комитетом по биоэтике IRB 2022-747 Investigation of the effect of functional apparels on the blood flow during exercise (Nanyang Technological University). Протокол включал две стадии исследования: влияние функциональных тканей на показатели волонтеров в состоянии покоя и во время выполнения физических упражнений, что является стандартом в такого типа исследованиях (Leung, 2013).

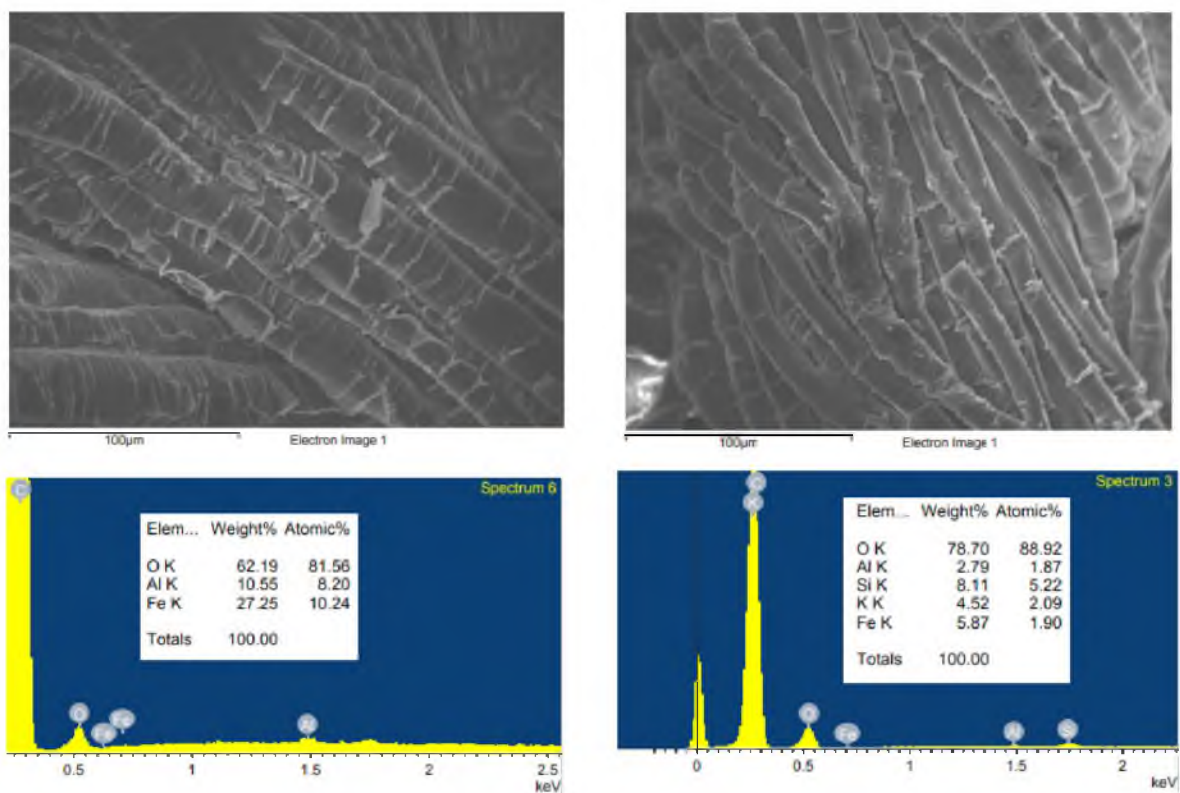


Рисунок 2 – Содержание элементов в тканях с добавками гематита (слева) и охры (справа)
Figure 2 – Content of chemical elements in fabrics with additives hematite (left) and ochre (right)

В состоянии покоя волонтеры проходили десятиминутную стадию адаптации в положении сидя, после чего выполнялись измерения исходных показателей организма человека. Затем волонтер менял одежду на образец с функциональными добавками или образец плацебо и находился в состоянии лежа 30 минут. В течении этих 30 минут постоянно измерялись средняя температура тела и показатели метаболизма. После окончания опыта, как и перед опытом, у волонтеров измеряли давление, диаметр локтевой артерии и скорость кровотока в ней.

При выполнении упражнений волонтеры проходили адаптацию в течении 10 минут, на протяжении которых выполнялась разминка. После этого у волонтеров измеряли вес, давление, диаметр локтевой артерии и величину кровотока в ней. При выполнении упражнения на велотренажере волонтеры поддерживали постоянный пульс 130 ударов в минуту. На протяжении выполнения

упражнений выполнялось постоянное измерение частоты сердечных сокращений, средней температуры тела и показателей метаболизма. Фотографии проведения двух частей эксперимента приведены на рисунке 3.

Для каждого образца ткани и для образца плацебо все измерения проводились на 14 волонтерах в состоянии покоя и на 18 волонтерах при выполнении упражнений. Возраст волонтеров составлял 21–30 лет. Волонтеры подбирались не курящие и не имеющие хронических заболеваний, с индексом массы тела, находящимся в пределах 20–24.

Измерение скорости кровотока и диаметра локтевой артерии проводили ультразвуковым прибором Mindray M7. Измерение средней температуры тела проводили по стандарту ISO 9886:2004 Ergonomics – Evaluation of thermal strain by physiological measurement по 8 точкам с использованием беспроводных сенсоров с памятью iButton 700 DS1925L-F5 компании Mouser Electronics.



Рисунок 3 – Исследование влияния функциональной ткани на волонтерах в состоянии покоя (слева); и при выполнении упражнений на велотренажере (справа)
 Figure 3 – Study of the effect of functional fabrics on volunteers at resting condition (left); and during exercise on the stationary bicycle (right)

Измерение метаболизма волонтеров, концентрацию кислорода и углекислого газа проводили на оборудовании компании Biopack (USA). Для измерения частоты сердечных сокращений использовали нагрудный пояс Polar.

Результаты и обсуждения

Эмиссия тканей с добавками

Эмиссия в длинноволновом инфракрасном диапазоне базового образца и образцов тканей с добавками минеральных пудр показаны на рисунке 4.

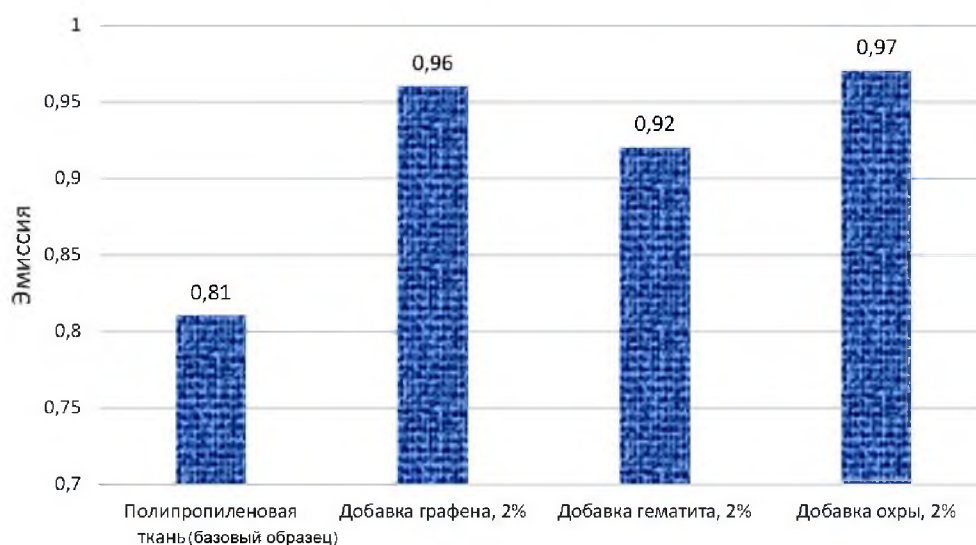


Рисунок 4 – Эмиссия тканей в диапазоне волн 4–15 мкм по соотношению к эмиссии черного тела
 Figure 4 – IR emission of fabric samples at 4–15 μm wavelength range relative to blackbody emission

Полипропиленовая ткань сравнения имела молочный цвет полимера и, как и ожидалось, не показала высокую эмиссию по причине невысокой способности поглощать тепло. Все добавки существенно увеличили эмиссию материала, при этом графен и охра показали высшую эффективность.

Полипропилен относят к охлаждающим тканям по причине гидрофобности и хорошего отведения влаги, и большой теплоемкостью [Abada, 2022]. Помимо этого, полипропилен более прозрачен для ИК излучения по сравнению с полиэфиром и нейлоном. Все эти свойства оказали влияние на значение эфюзивности образцов, полученных на базе полипропилена. Значение эфюзивности ткани сравнения и тканей с внедренными добавками приведены на рисунке 5.

Чистый полипропилен имеет более высокую эфюзивность, по сравнению с композитами, в которые добавили графен и минеральные добавки. То есть все добавки сдвинули эфюзивность полипропилена в зону более теплого тактильного ощущения, что ожидаемо, поскольку все добавки показали высокую способность задерживать и эммитировать тепло.

Влияние тканей с функциональными добавками на волонтеров в состоянии покоя

Изменение и процент изменения физиологических параметров волонтеров, испытывающих ткани с добавками в состоянии покоя приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что ткани с добавками не позволили опуститься систолическому давлению волонтеров, находящихся в состоянии покоя, как в случае с тканью сравнения. Одновременно ткани с добавками незначительно увеличили диастолическое давление. Изменение диаметра локтевой артерии более заметно. За 30 минут покоя интенсивность кровотока волонтеров замедлилась и диаметр артерии сократился, что видно на примере волонтеров испытывающих ткань сравнения. Ткани с добавкой гематита и охры оказали положительный активирующий эффект на систему кровоснабжения волонтеров, в результате чего диаметр локтевой артерии даже увеличился по сравнению с начальной точкой измерения. Такой же тренд мы видим и для показателя скорости кровотока. Он уменьшился во всех случаях за 30 минут покоя, но ткани с охрой и гематитом показали не такое быстрое уменьшение кровотока по сравнению с тканью сравнения и тканью с графеном.

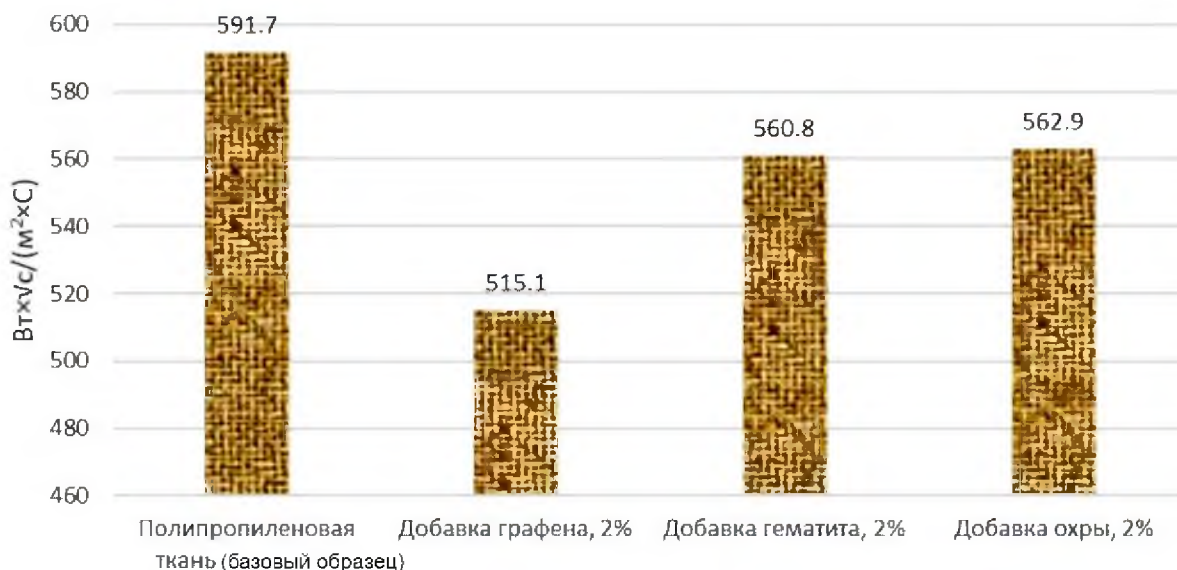


Рисунок 5 – Эфюзивность исследуемых образцов
Figure 5 – Effusivity of studied fabric samples

Таблица 1 – Изменение параметров тела волонтеров под влиянием тканей с разными добавками в состоянии покоя

Table 1 – Changes in volunteers' body physiological parameters under the influence of fabrics with different additives at resting condition

Изменение измеряемого параметра	Ткань из чистого полипропилена		Ткань с добавкой 2 % графена		Ткань с добавкой 2 % гематита		Ткань с добавкой 2 % охры	
	Δ	%	Δ	%	Δ	%	Δ	%
Систолическое давление, мм.рт.ст.	- 3,9	- 3,54	- 3,4	- 3,11	- 1,1	- 1,02	- 1,0	- 0,92
Диастолическое давление, мм.рт.ст.	+ 0,1	+ 0,14	+ 0,5	+ 0,62	+ 1,2	+ 1,73	+ 1,2	+ 1,73
Диаметр локтевой артерии, мм	- 0,6	- 1,61	- 0,5	- 1,32	+ 0,1	+ 0,26	+ 0,3	+ 0,80
Скорость кровотока, мл/мин	-61,7	-54,2	-58,4	-58,01	-32,8	-37,35	-44,4	-42,07
Температура груди, °С	+ 1,09	+ 3,62	+ 1,1	+ 3,64	+ 1,27	+ 4,12	+ 1,60	+ 5,04
Температура спины, °С	+ 2,09	+ 6,20	+ 2,01	+ 6,03	+ 2,42	+ 7,41	+ 2,52	+ 7,78

Влияние тканей с функциональными добавками на волонтеров при выполнении упражнений

При выполнении упражнений было измерено больше физиологических параметров по сравнению с экспериментом, где волонтеры находились в состоянии покоя (таблица 2).

Последние четыре параметра в таблице 2 приведены на время окончания эксперимента, а остальные измерения отражают разницу между начальным состоянием организма волонтеров и состоянием после выполнения упражнений в течение 30 минут.

Среди всех измеренных параметров наибольшие отличия видны в диаметре локтевой артерии и скорости кровотока, где охра и гематит показали наибольший прирост. По воздействию гематита на организм волонтеров необходимо отметить наибольшую потерю массы тела, наибольшее увеличение температуры тела, наибольшее увеличение скорости кровотока, наименьшее падение концентрации глюкозы в крови и наибольшее окисление жиров. Несмотря на схожесть элементного состава гематита и охры, воздействие охры на организм человека при выполнении физических упражнений несколько иное. Очевидно, что охра привела к сдвигу метаболизма на подавляющее использование глюкозы. Именно при

исследовании влияния ткани с добавкой охры получено наибольшее падение концентрации глюкозы и увеличение количества лактата (продукта распада глюкозы) в крови, а также наибольшее содержание углекислого газа в выдыхаемом воздухе.

Ткань с графеном по измеренным показателям заняла промежуточное положение между тканью сравнения и тканями с минералами, выделившись от других исследуемых образцов лишь самым низким значением температуры тела волонтеров. Можно предположить, что добавка графена увеличила теплопроводность ткани, что способствовало лучшему отводу тепла.

Выводы

Использование тканей с введением в них неорганических материалов, способных отражать или эмитировать энергию человеческому телу в инфракрасном диапазоне, оказывает положительный эффект человеческому организму как в состоянии покоя, так и при выполнении физической активности. Добавка 2 % массовых гематита и охры к тканям, из которой была пошита одежда для волонтеров, улучшила кровоснабжение волонтеров как в состоянии покоя, так и при выполнении упражнений, увеличив диаметр кровеносных сосудов и интенсивность кровотока. При выполнении физических

Таблица 2 – Изменение параметров тела волонтеров под влиянием тканей с разными добавками при выполнении физических упражнений

Table 2 – Changes in volunteers' body physiological parameters under the influence of fabrics with different additives during physical exercise

Измеряемый параметр	Ткань из чистого полипропилена	Ткань с добавкой 2 % графена	Ткань с добавкой 2 % гематита	Ткань с добавкой 2 % охры
Изменение массы тела, г	- 353,7	- 389	- 401,9	- 377,8
Изменение концентрации глюкозы, ммоль/л	- 0,74	- 0,68	- 0,49	- 0,98
Изменение концентрации молочной кислоты, ммоль/л	+ 4,61	+ 4,92	+ 4,91	+ 5,11
Изменение диаметра локтевой артерии, мм	+ 0,3	+ 1,0	+ 1,7	+ 1,8
Изменение скорости кровотока, % превышение от изначального значения	+ 108,2	+ 128	+ 149,6	+ 127,5
Изменение средней температуры кожи, °С	+ 0,61	+ 0,45	+ 0,82	+ 0,47
Потребление кислорода (VO ₂), мл/(кг·мин)	27,0	27,5	26,5	29,3
Выделение углекислого газа (VCO ₂), мл/(кг·мин)	32,7	33,0	33,7	34,8
Окисление углеводов, г/мин	62,7	63,7	68,5	65,1
Окисление жиров, г/мин	9,3	9,5	11,7	9,14

упражнений на протяжении 30 минут добавка гематита увеличила скорость кровотока волонтеров на 146 %, тогда как одежда сравнения показала увеличение данного параметра на 108 %. Добавка графена и охры не привели к такому перегреву тела волонтеров во время выполнения упражнений, какой показала одежда сравнения. Температура волонтеров выполняющих упражнения в одежде с графеном и охрой выросла на 25 % меньше по сравнению с показателем, полученным при исследовании одежды сравнения.

Предполагается, что добавка неорганических веществ, способных эммитировать инфракрасный свет, затрагивает клеточный метаболизм. Это заметно по измеряемым макропараметрам, но достоверное утверждение возможно лишь при проведении более глубоких исследований.

Наиболее очевидный положительный эффект неорганических добавок, улучшающих кровоснабжение, может быть использован при изготовлении спортивной одежды и тканей, применяемых в медицине.

Работа выполнялась по гранту Министерства образования Сингапура – TIER 1 RT06/2021.

REFERENCES

- Abada, D., Maalouf, C., Sotehi, O., Rouag-Saffidine, D., Polidori, G., Boudjabi, A.F. and Derghout, Z. (2022). Performance evaluation of fabrics for evaporative cooling application. *Energy and Buildings*, vol. 266, DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112120.
- Blakely, K.S., Under Armour Inc. (2020). Apparel with heat retention layer and method of making the same. *United States. Pat. US10563349B2*.
- Celliant, (2024). [Online], Available from: <https://celliant.com>, [Accessed: 18.07.2024].
- Conrado, L.A. and Munin, E. (2013). Reductions in Body Measurements Promoted by a Garment Containing Ceramic Nanoparticles. *J. Cosmet. Dermatol.*, vol. 12, pp. 18–24.
- Conrado, L.A. and Munin, E. (2011). Reduction in Body Measurements after Use of a Garment Made with Synthetic Fibers Embedded with Ceramic Nanoparticles. *J. Cosmet. Dermatol.*, vol. 10, pp. 30–35. DOI: 10.1111/j.1473-2165.2010.00537.x.
- Leung, T.K. (2015). In vitro and in vivo studies of the biological effects of bioceramic (a material of emitting high performance far-infrared ray) irradiation. *Chinese Journal of Physiology*, vol. 58, no. 3, pp. 147–155. DOI: 10.4077/CJP.2015.BAD294.
- Leung, T.K., Kuo, C.H., Lee, C.M., Kan, N.W. and Hou, C.W. (2013). Physiological effects of bioceramic material: harvard step, resting metabolic rate and treadmill running assessments. *Chinese Journal of Physiology*, vol. 56, no. 6, pp. 334–340. DOI: 10.4077/CJP.2013.BAB132.
- Libanori, A., Chen, G., Zhao, X., Zhou, Y. and Chen, J. (2022). Smart textiles for personalized healthcare. *Nature Electronics*, vol. 5, pp. 142–156. DOI: 10.1038/s41928-022-00723-z.
- Loturco, I., Abad, C., Nakamura, F.Y., Ramos, S.P., Kobal, R., Gil, S., Pereira, L.A., Burini, F., Roschel, H., Ugrinowitsch, C. and Tricoli, V. (2016). Effects of Far Infrared Rays Emitting Clothing on Recovery after an Intense Plyometric Exercise Bout Applied to Elite Soccer Players: A Randomized Double-Blind Placebo-Controlled Trial. *Biol. Sport*, vol. 33(3), pp. 277–283. DOI: 10.5604/20831862.1208479.
- Molina, J. (2016). Graphene-Based Fabrics and Their Applications. *RSC Advances*, vol. 72, pp. 68261–68291.
- Nunes, R., Cidral-Filho, F., Flores, L., Nakamura, F., Rodriguez, H., Bobinski, F., Sousa, A., Petronilho, F., Gainski Danielski, L., Martins, M., Martins, D. and Guglielmo, L.G. (2020). Effects of Far-Infrared Emitting Ceramic Materials on Recovery During 2-Week Preseason of Elite Futsal Players. *J. Strength Cond. Res.*, vol. 34, pp. 235–248. DOI: 10.1519/JSC.0000000000002733.
- Santos E Campos, M.A., Garcia Pinillos, F. and Latorre Roman, P.A. (2017). Reduction in pain after use of bioceramic undershirt for patients with Fibromyalgia. *Alternative Therapies in Health and Medicine*, vol. 23, no. 5, pp. 18–22.
- Silva, T., Moreira, G., Quadros, A., Pradella-Hallinan, M., Tufik, S. and Oliveira, A. (2009). Effects of the Use of MIG3 Bioceramics Fabrics Use – Long Infrared Emitter – in Pain, Intolerance to Cold and Periodic Limb Movements in Post-Polio Syndrome. *Arq. Neuropsiquiatr.*, vol. 67, pp. 1049–1053. DOI: 10.1590/S0004-282X2009000600016.
- Under Armour, (2020). *Put recovery at the top of your list*, [Online], Available from: <https://about.underarmour.com/en/stories/2020/10/put-recovery-at-the-top-of-your-list.html>, [Accessed: 18.07.2024].
- Vatanserver, F. and Hamblin, M.R. (2012). Far infrared radiation (FIR): its biological effects and medical applications. *Photonics laser Medicine*, vol. 4, pp. 255–266. DOI: 10.1515/plm-2012-0034.
- Ventex, (1999). [Online], Available from: <https://ventexkorea.com>, [Accessed: 18.07.2024].
- Worobets, J.T., Skolnik, E.R. and Stefanshyn, D.J. (2015). Apparel with far infrared radiation for decreasing athlete's oxygen consumption during submaximal exercise. *Research Journal of Textile and Apparel*, vol. 19, no. 3, pp. 52–57. DOI: 10.1108/RJTA-19-03-2015-B007.
- Zuo, X., Zhang, X., Qu, L. and Miao, J. (2023). Smart Fibers and Textiles for Personal Thermal Management in Emerging Wearable Applications. *Advanced Material Technology*, vol. 8, no. 6. DOI: 10.1002/admt.202201137.

Информация об авторах

Information about the authors

Липик Виталий Тадеушевич

Кандидат технических наук, ассистент профессора,
факультет материаловедения и инженеринга, Наньян-
ский технологический университет, Сингапур.
E-mail: vitali@ntu.edu.sg

Vitali T Lipik

Candidate of Sciences (in Engineering), Adjunct
Assistant Professor at School of Material Science and
Engineering, Nanyang Technological University, Singapore.
E-mail: vitali@ntu.edu.sg