

УДК 681.2;620.1

ДОРАБОТКА МЕТОДИК ТЕПЛОВИЗИОННОГО КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Представлені окремі методи діагностики біологічних об'єктів за допомогою ІЧ-радіометрії. Розглянуті проблеми, що виникають при розшифровці і деталізації отриманих термограм поверхні людського тіла. Сформульовані практичні рекомендації, що дозволяють ідентифікувати термоаномалії і зіставити їх з результатами медичних обстежень

Ключові слова: ІЧ-радіометрія, термограма, термоаномалії поверхні людського тіла

Представлены отдельные методы диагностики биологических объектов, посредством ИК-радиометрии. Рассмотрены проблемы, возникающие при расшифровке и детализации полученных термограмм поверхности человеческого тела. Даны практические рекомендации, позволяющие идентифицировать термоаномалии и сопоставить их с результатами медицинских обследований

Ключевые слова: ИК-радиометрия, термограмма, термоаномалии поверхности человеческого тела

Е.М. Прохоренко

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник*
Контактный тел.: (057) 764-42-95, 067-994-95-87, 050-239-10-09
E-mail: fort-58@mail.ru

О.Е. Брюховецкая

Инженер*
Контактный тел.: (057) 700-41-11

В.Ф. Клепиков

Доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент
НАН Украины, директор ИЭРТ НАН Украины*
Контактный тел.: (057) 700-41-11

В.В. Литвиненко

Доктор технических наук, старший научный сотрудник,
заместитель директора ИЭРТ НАН Украины*

А.И. Морозов

Кандидат технических наук, доцент**

Ю.А. Приходько

Кандидат психологических наук, начальник медико-санитарной части**

Л.В. Аладышева

Кандидат медицинских наук, директор***

В.В. Бандурян

Инженер***

А.А. Захарченко

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Национальный научный центр
Харьковский физико-технический институт
ул. Академическая, 1, г. Харьков, Украина, 61108

*Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины
ул. Гуданова, 13, г. Харьков, Украина, 61002

**Национальный университет гражданской защиты Украины
ул. Чернышевского, 76, г. Харьков, Украина, 61002

***ООО "Научно-исследовательский институт
профилактической медицины"
ул. Гуданова, 14, г. Харьков, Украина, 61002

Введение

Одной из важнейших и универсальных характеристик биологической активности человека есть температура. Человеческий организм можно рассматривать как сложную самосогласованную и сбалансированную систему. Следовательно, температурная реакция, аномальное отклонение температуры, изменение температурного поля на поверхности человеческого тела являются самыми первыми симптомами практически для любого заболевания. Измерения температуры всего тела человека, детализация аномальных температурных зон дают возможность распознать не только характер заболевания, но и тяжесть заболевания. Наиболее эффективным способом регистрации температуры является метод инфракрасной (ИК) термографии (ИК-радиометрии) [1]. К преимуществам ИК-термографии следует отнести: а) безвредность для человека, так как обследуемые не подвергаются никаким воздействиям, б) дистанционность. Кроме этого к преимуществам следует отнести высокую производительность и оперативность тепловизионного метода по сравнению с традиционными методами диагностики состояния здоровья, возможность прогнозирования и выявления заболеваний на ранних стадиях развития. Все это делает тепловизионные методы незаменимыми при диагностике и лечении заболеваний, а также при проведении профилактической работы [2].

Однако в настоящее время существуют определенные трудности для широкого внедрения в медицинскую практику методов ИК-диагностики. Нет единого нормативного документа, который бы устанавливал стандарты проведения ИК-термографии. Необходимо проведение систематических исследований для наработки массивов статистических материалов, устанавливающих соответствие наблюдаемых термоаномалий с множеством реальных заболеваний и воспалительных процессов. Поэтому задача идентификации особенностей теплового поля является важной и актуальной. Для её решения необходим детальный анализ термоизображений, учет режимов съемки, разработка новых и использование уже существующих программных средств, изучение и понимание процессов образования термоаномалий. В данной работе мы также рассмотрим возможности метода ИК-диагностики при проведении массовых медицинских обследований.

Принципы и направления развития термографии биологических объектов

Использование технологий дистанционной ИК-радиометрии позволяет развить методики тепловизионного контроля человеческого тела. Теоретические основы медицинской компьютерной термографии подробно изложены в различных исследованиях (см. например, [2-4]). Основой данного метода является регистрация потока теплового излучения с поверхности обследуемого объекта. Полученные термоизображения (термограммы) в дальнейшем подлежат детальному анализу.

Спектральную энергетическую светимость человеческого тела можно описать при помощи формулы Планка:

$$W_v = \frac{8\pi h v^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}, \quad (1)$$

где ν - частота, $h=6,626 \cdot 10^{-27}$ эрг·с - постоянная Планка, $k=1,3807 \cdot 10^{-16}$ эрг/К - постоянная Больцмана, T - температура в градусах Кельвина.

Проинтегрировав выражение (1) по всему интервалу частот от $\nu=0$ до $\nu=\infty$, получим выражение для полной энергетической светимости (закон Стефана-Больцмана) в виде:

$$W(T) = \epsilon(T) \delta_b T^4, \quad (2)$$

где $\epsilon(T)$ - излучательная способность тела, $\delta_b = 5,6686 \cdot 10^{-12}$ Вт/(см²·К⁴) - постоянная Стефана-Больцмана. Значение $W(T)$ и фиксируется тепловизором. При рассмотрении выражений для теплового потока будем учитывать, что температура человеческого тела составляет 310К. Для человека излучательная способность $\epsilon(T)$ находится в интервале 0,99-0,98. Площадь тела человека составляет около двух квадратных метров. Подставив эти данные в выражение (2) получим, что интегральная мощность излучения человека составляет 900Вт. Эта величина достаточно велика и позволяет проводить термографические обследования, которые дают возможность выявить аномальное изменение радиационной температуры. При создании термографической аппаратуры также нужно учитывать, что человеческое тело излучает основную мощность в диапазоне длин волн 8...12 мкм [3].

В настоящее время основными направлениями действий медицины являются такие: а) профилактика; б) диагностика; в) лечение; г) реабилитация. Тепловидение прочно завоевало свое положение, как дополнительный инструментальный, во всех этих сферах [2]. Исходя из практических наработок, ИК-радиометрия активно применяется в решении задач по проблемам [2-4]:

1. онкология (опухоли молочных желез, щитовидной железы, лимфатических узлов, кожи, костей и т.д.);
2. общая хирургия (острая воспалительная патология брюшной полости, конечностей);
3. ангиология (различные заболевания магистральных артерий и вен);
4. травматология и ортопедия, в том числе гнойная остеология и комбустиология (сколиозы, неосложненные и осложненные переломы позвоночника, деформирующие артрозы крупных суставов, остеомиелиты длинных трубчатых костей на этапах лечения, ожоговые поражения, ранняя диагностика глубины ожогового поражения и т.д.);
5. неврология (патология периферических нервов конечностей, неврологические синдромы остеохондроза различных отделов позвоночника);
6. реконструктивно-восстановительная хирургия (диагностика жизнеспособности пересаженных и реимплантированных сегментов, трансплантатов, филатовского стебля);
7. артрология (заболевания крупных и мелких суставов конечностей различного генеза);
8. оториноларингология (воспалительные заболевания придаточных пазух);
9. эндокринология (заболевания щитовидной железы, сосудистые и невральные осложнения сахарного диабета);
10. гинеко-

логия (контроль состояния плода); 11. стоматология; 12. офтальмология, и так далее.

Использование тепловизионных методик возможно, как на поликлиническом, так и на госпитальном уровне. На поликлиническом уровне решаются следующие задачи:

1. скрининг-диагностика (экспресс анализ температуры);
2. диагностика клинических синдромов неврологической, нейрохирургической, травматологической, ортопедической, ангиологической патологий;
3. определение степени активности протекания процесса;
4. контроль динамики патологических процессов.

Задачи, решаемые, на госпитальном уровне:

1. уточнение диагностики клинических синдромов, нозологии патологического процесса за счет применения различных провоцирующих проб;
2. контроль за динамикой патологического процесса, эффективностью проводимого лечения;
3. уточнение локализации и границ очагов патологии;
4. уточнение диагностики в ходе оперативного вмешательства;
5. оценка степени блокады болевой чувствительности при различных видах анестезиологического воздействия;
6. прогноз характера течения патологических процессов.

Как видно, область применения тепловидения очень широка. И это с учетом того, что мы останавливались лишь на тех исследованиях, в развитии которых уже проделана значительная работа и получены определенные результаты, представленные в публикациях, диссертационных работах, защищены патентами.

Постановка эксперимента

Следует заострить внимание на главном аспекте всей работы по улучшению проведения диагностики посредством ИК-радиометрии, отработки методологии, разработки конкретных методик, автоматизация дешифровки полученных результатов направлена на выполнение единственной главной задачи – улучшение здоровья человека. Основными задачами, которые решались в ходе нашего эксперимента, были – разработка методологии ИК-радиометрии, отработка методик тепловизионных обследований, выяснение степени влияния определенных факторов на полученные результаты, дальнейшая доработка таблицы соответствия определенных температурных аномалий (областей с повышенной или пониженной температурой), конкретным заболеваниям. Экспериментальное тепловизионное обследование было проведено во время обязательной медицинской комиссии абитуриентов Национального университета гражданской защиты (НУГЗ) Украины. Сотрудниками ИЭРТ НАН Украины были выполнены тепловизионные съемки, дан анализ физической картины всех процессов. Также, совместно с сотрудниками ННЦ ХФТИ НАНУ была уточнена компьютерная модель и получено численное решение уравнений теплопереноса. Объяснение, медицинскую интерпретацию полученных результатов провели специалисты НИИ профилактической медицины совместно со специалистами НУГЗ Украины. В качестве измерителя поля ИК-излучения объектов контроля использовался тепловизор Р 6800 производства LAND Instruments International Ltd. на основе не-

охлаждаемой болометрической матрицы (320×240) элементов, со следующими основными техническими характеристиками тепловизора: спектральный диапазон 7,5 – 14 мкм; температурная чувствительность (при 30°C) 0.08°C; пространственное разрешение 1,3 мрад; поле зрения составляет 23° × 17°; диапазон измеряемых температур от – 20°C до +1500°C (опционно).

Тепловизионная съемка проводилась скрининговым (экспресс) методом, в пассивном режиме. Под пассивным термографическим контролем подразумевается фиксация только собственного теплового излучения человека в отличие от активной термографии, которая производится с дополнительным подсвечиванием обследуемого человека при помощи специальных ИК-источников. Проверялась верхняя часть тела. Для контроля, первоначально делалось два снимка верхней части тела: спереди и со спины. Для активации всех процессов, обследуемые абитуриенты, подвергались физическим нагрузкам (по десять приседаний). После этого производились следующие два снимка. Таким образом, было обследовано более 600 человек. Анализ термоизображений проводился в три этапа.

На первом этапе посредством “аврал-сигнала” выделялись абитуриенты с температурой тела выходящей за установленные границы. На тепловизоре фиксируется контрольная точка 37,7°C и в случае её превышения срабатывает сигнал. Это обычная практика выявления лиц с повышенной температурой для большого числа реципиентов. В нашем случае абитуриентов с повышенной температурой не было. Параллельно, для контроля, проводилось измерение температуры ртутными термометрами.

На втором этапе проводилась автоматизированная обработка материалов тепловизионной съемки. Машинным способом выявлялись различные “особые точки”. Поиск термоаномальных точек и областей осуществлялся путем последовательного наложения и вычитания, двух термограмм (“спокойной” и “активной”). Начальная термограмма (точка “спокойствия”) использовалась в качестве “опорной”. Вторая термограмма («активная») снималась после применения нагрузки. Посредством этих операций удалось повысить температурное разрешение необходимое при анализе структуры термоаномалий. В режиме машинной обработки производилась фильтрация термоаномалий, локализация высокотемпературных точек, выявление ложных нарушений и фиксация их местоположения.

Основной задачей третьего этапа являлась детализация выделенных особенностей, привязка их к конкретным заболеваниям и нарушениям, сопоставление интенсивности температурного поля и формы термоаномалий с их причиной. Также важными аспектами проведенной работы являлись решение вопросов доработки, как общих положений, так и частных деталей методики проведения термографических съемок. Выработка и усовершенствование отдельных практических приемов и рекомендаций применения ИК-радиометрии.

Обработка результатов

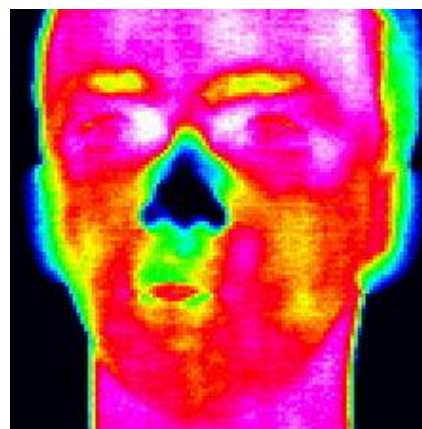
Исходя из выражения (2), измеренная температура зависит от полной энергетической светимости тела W

и коэффициента излучения ϵ . В свою очередь эти параметры зависят от таких факторов как: состояние поверхности излучения, солнечная радиация, состояние окружающего температурного фона. Следовательно, при проведении тепловизионной съемки, на термограммах будут проявляться не только реальные изменения теплового поля, но и различные температурные наводки [5]. Для решения проблемы ложных температурных аномалий необходимо: во-первых, идентификация их в качестве ложных; во-вторых, возможность изоляции и устранения аномалий. Для этих целей существуют определенные методы. В частности при тепловизионной съемке поверхности человеческого тела неизбежно появляются тепловые пятна, являющиеся отражением различных внешних тепловых источников. В данном случае целесообразно использовать метод последовательной съемки объекта под разными углами. Термоаномалии, которые подвижны и перемещаются по поверхности обследуемого объекта при изменении угла наблюдения, являются ложными сигналами, и нет необходимости их учитывать. Учет солнечной радиации решается посредством экранирования помещения, в котором проводится видеосъемка. Еще одно условие, способствующее упрощению автоматической обработки, следует из температурного интервала в котором может находиться человеческое тело (от 35,5°C до 41°C). Следовательно, любые области на термограммах, в которых температурное поле имеет отличные значения, являются ложными. Важной особенностью, позволяющей значительно увеличить скорость аппаратной обработки термограмм и добиться высокой точности идентификации тепловых аномалий является, то, что на поверхности человеческого тела в двух граничащих участках невозможно получить резкие скачки температур. Задав соответствующие граничные условия, получаем еще один фактор, который дает возможность идентификации ложных аномалий. Значительное ускорение машинной обработки полученных термограмм дает использование в расчетах не только температурного поля, но и градиента температур. При анализе градиентного поля появляется возможность изучения особых точек и их окрестностей. Под особыми подразумеваются области с резкими скачками температур или большими её значениями. Значительно упрощает обработку полученных термограмм учет условия осевой термоасимметрии. Суть его заключается в том, что относительно средней линии человека распределение температур симметрично. В медицине этот факт хорошо известен, и в нашем случае является важным параметром для диагностики и прогнозирования протекания заболеваний.

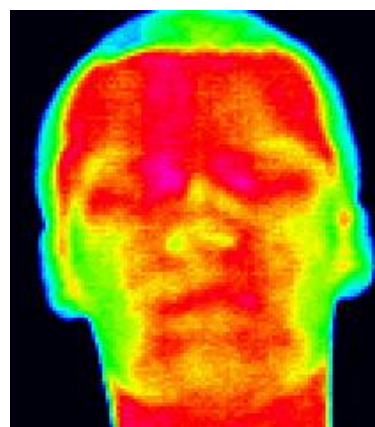
Одним из заболеваний, которое может быть быстро и точно определено при помощи ИК-термографии, есть воспаление тройничного нерва. Термоасимметрия, в период приступа или после него, достигает величины $\Delta(T) = 1,34^\circ\text{C}$. В нашем случае, проверкой, не было выявлено лиц с данным заболеванием.

Однако при обследовании получены результаты, касающиеся травматологии. Так по результатам проверки термограмм обнаружено три абитуриента с характерными тепловыми отклонениями. У всех их наблюдалась пониженная температура в области носа. Термограмма лица одного из них приведена на рис.1а.

На рис.1б приведена термограмма здорового абитуриента. На термограмме рис.1а четко просматривается резко выраженное тепловое пятно. Температура носа ниже, чем температура прилегающих тканей лица. Это может происходить только при недостаточном снабжении кровью тканей носа. Такое возможно или в случае сужения кровеносных сосудов или при их пережатии. Дальнейшее обследование хирургом всех трех абитуриентов с аномальным отклонением температуры, показало, что все они ранее имели перелом спинки носа.



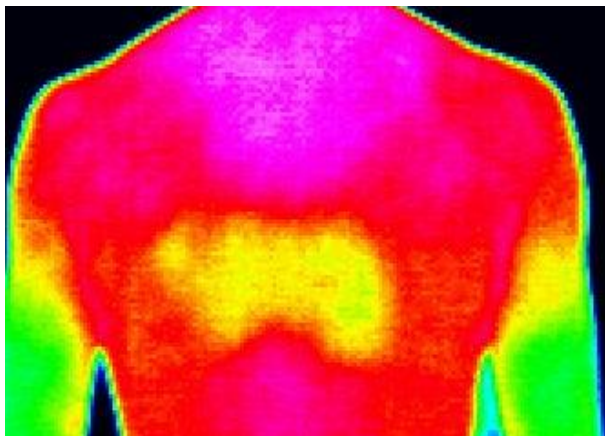
а



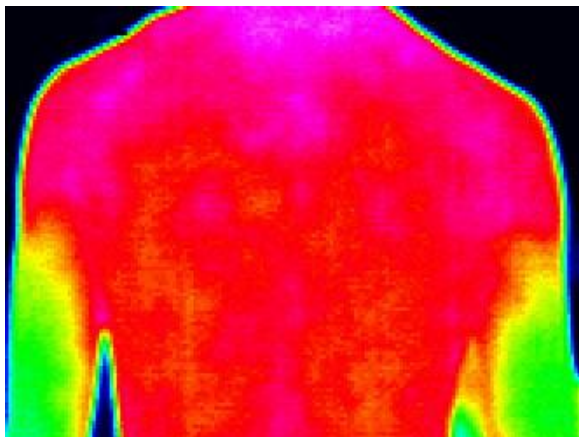
б

Рис. 1. Термограммы поверхности лица: а) с аномальной температурой; б) без паталогий

Как отмечалось выше, серьезное влияние на точность полученных результатов оказывает величина ϵ (коэффициент излучения), которая сильно зависит от состояния поверхности кожи человека. Так, наличие на коже повреждений, неоднородностей, обильного волосяного покрова и т.п. вносит искажение в точность измерения температуры. Необходимо строго контролировать присутствие на поверхности кожи влаги (вода, пот), так как тонкий водяной слой может создавать зеркальную поверхность, отражающую падающее ИК-излучение. Влага, также, хуже пропускает тепловую энергию. Поэтому увлажненные места будут иметь более низкую температуру. Пример термоаномалии такого типа приведен на рис.2.



а



б

Рис.2. Тепловые изображения спины: а) при наличии “холодного” пятна, б) отсутствие следа

На рис.2а наблюдаем изменение температурного поля в лопаточной области. Для проверки, является ли тепловое пятно истинным или это наводка, было проведено несколько снимков под разными углами. На всех полученных термограммах тепловое пятно присутствовало. Следовательно, предположение о наводке можно исключить. Контроль абсолютного значения температур показал пониженную температуру в данной области по сравнению с остальной поверхностью. Вторым признаком, вызывающим дополнительное внимание – есть наличие симметрии. Как первое условие, так и второе, не являются характерными для большинства заболеваний. Следующим было предположение о влажной пленке на поверхности кожи. Как только пот был удален, исчезло и тепловое пятно. Термограмма спины в этом случае представлена на рис.2б. Таким образом, причиной появления термоаномалии была пленка влаги на теле.

На основании приведенных примеров можно судить об эффективности использования тепловизионной техники в медицинских целях при проведении регулярных и массовых обследований. Необходимо отметить важность соблюдения методик проведения процесса тепловизионной съемки. Вся работа должна проводиться планоно и регулярно. Первоначально создается картотека первичных снимков. На втором этапе проведение тепловизионной съемки вторично. Основная задача третьего этапа – изучение и анализ полученных термограмм. При

этом необходимо отделить тепловые аномалии, которые отвечают за нарушения, от ложных. С этой целью используют различные, как технологические, так и расчетные приемы и методики. К ним относятся: съемка под различными углами, специальные приемы, учет внешних факторов и т.д. При компьютерной обработке, для распознавания соответствия обнаруженных термоаномалий реальным заболеваниям, применяется дифференцирование сигнала и последующее сравнение результатов с базовым снимком. Проводится учет резких скачков температурного поля, градиента температур. Следующий этап – сопоставление выделенных тепловых аномалий определенным реальным заболеваниям, нарушениям и т.д. Контроль правильности поставленного диагноза проверяется при помощи других медицинских диагностических методов. Завершается работа созданием базы тепловизионных снимков различных нарушений, которая необходима для дальнейшей работы.

Выводы

С целью метрологической сертификации методики медицинской ИК-радиометрии подготовлены практические рекомендации, позволяющие без снижения качества не только существенно увеличить скорость обследования, количество пациентов, но и повысить точность, пространственное разрешение. Конкретизированы параметры ограничивающие реальные термомодефекты. Апробирована математическая модель анализа термограмм поверхности кожи человека, позволяющая значительно ускорить обработку результатов и выделение ложных термоаномалий. Приведены примеры характерных термоизображений соответствующих, как реальным нарушениям, так и ложным наводкам, которые использовались при создании баз данных термограмм различных заболеваний.

Литература

1. Прохоренко, Е. М. Тепловизионная диагностика для контроля противотеплового оборудования [Текст] / Е. М. Прохоренко, В. Ф. Клепиков, В. В. Колесникова, В. В. Литвиненко, А. И. Морозов. // Восточно Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – №2(50). – С.65-68.
2. Шушарин, А.Г. Медицинское тепловидение – современные возможности метода [Электронный ресурс] / А. Г. Шушарин, В. В. Морозов, М. П. Половинка // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – №4. – Режим доступа до журн.: <http://www.science-education.ru/98-4726>
3. Diakides, N. A. Infrared imaging in Medicine [Текст] / N. A. Diakides, J. D. Bronzino J. – CRC Press, 2007. – 448 p.
4. Розенфельд, Л. Г. Дистанционная инфракрасная термография как современный неинвазивный метод диагностики заболеваний [Текст] / Л. Г. Розенфельд, А. В. Самохин, Е. Ф. Венгер и др. // Укр. мед. часопис. – 2008. – № 6 (68) – С. 92–97.
5. Minkina, W. Infrared Thermography - Errors and Uncertainties [Текст] / W. Minkina, S. Dudzik. – John Wiley & Sons, 2009. – 200 p.

Abstract

The article suggests the technique of diagnosis of biological objects by means of infrared radiometry. The principles of thermal imaging techniques for diagnosis of thermal fields on the surface of the body were considered. A solution of the equations of heat transfer from the depth to the surface of biological objects is given. The efficiency of the thermal imaging examinations at rapid control was shown. The main factors, influencing the distortion of the results were studied. A technique for damages calculation was worked out. The basic algorithms for computer processing of the results were singled out. There is an examination of problems of layings, false thermoanomalies, thermal spots, which appear at the transcript of obtained thermograms. In the course of the examination, the effects of preliminary loading on the results were studied. A theoretical model of the influence of off-site sources of infrared radiation on the test results was suggested. This model was tested and tried-out in practice. The disorders in the life activity of studied objects were discovered. The various diseases were revealed by the method of infrared radiometry. Main examples of typical thermoimages, corresponding to real disorders, as well as false layings, were given. These data were used to create the databases of thermograms of various diseases. The research is a subject of concern for practical usage at the thermal control of the human body

Keywords: infrared radiometry, thermogram, thermoanomalies, surface of the human body

Розглянуто деякі закономірності електризації гранул ВР у процесі заряджання свердловин і шпурів гранулярними ВР. При цьому врахована кристалічна будова гранул та її вплив на процес руйнування. Показано, що роботи сил тертя достатньо для руйнування гранул та їх електризації

Ключові слова: гранула, диполь, енергія дисоціації, поляризаційна сила, електризація

Рассмотрены некоторые закономерности электризации гранул ВВ в процессе заряджания скважин и шпуров гранулярными ВВ. При этом учтено кристаллическое строение гранул и его влияние на процесс разрушения. Показано, что работы сил трения достаточно для разрушения гранул и их электризации

Ключевые слова: гранула, диполь, энергия диссоциации, поляризационная сила, электризация

УДК 621.88.087(03)

О НЕКОТОРЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ПРИ ЗАРЯЖАНИИ СКВАЖИН И ШПУРОВ ГРАНУЛЯРНЫМИ ВЗРЫВЧАТЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

А. А. Гурин

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой*
Контактный тел.: (0564) 64-01-40

Ю. А. Гурин

Кандидат технических наук, доцент*

И. С. Радченко

Кандидат физико-математических наук, доцент**
Контактный тел.: (0564) 71-87-31, 067-271-46-90

И. Б. Степанкина

Старший преподаватель**
Контактный тел.: (0564) 71-70-97, 097-599-83-47
E-mail: irischca.s@mail.ru

*Кафедра рудничной аэрологии и охраны труда
**Кафедра теоретической и прикладной механики

Криворожский национальный университет
ул. XXII Партсъезда, 11, г. Кривой Рог, Украина, 50027

1. Проблема и ее связь с научными и прикладными задачами

К основным процессам, которые приводят к образованию заряда на частицах пыли, относятся прямая

ионизация, статическая электризация, столкновение с ионами или ионными кластерами (в присутствии внешнего электрического поля или без него), а также ионизация частицы электромагнитным излучением (ультрафиолетовым, видимым или гамма-излучени-