

УДК 677.017.2/7

Сравнительный анализ методов измерения скорости пули для баллистических исследований тканей для бронежилетов

**Адамян А. В., асп.,
Гречухин А. П., д.т.н., проф.,
Сокова Г. Г., д.т.н., проф.,
Куликов А. В., к.т.н., доц.**

Костромской государственный
университет, г. Кострома,
Российская Федерация

Реферат. Для исследования баллистических свойств тканей необходим оперативный и надежный способ для проведения натурального эксперимента. Одним из показателей, который необходимо фиксировать при таких исследованиях – скорости пули. В работе выполнен сравнительный анализ трёх методов измерения скорости пули с целью определения их применимости при испытаниях баллистических тканей и элементов бронежилетов. Рассматривались вибрационный метод, метод на основе электромагнитной индукции и оптический метод. Вибрационный подход с использованием датчиков SW-420 и микроконтроллера Arduino продемонстрировал недостаточную чувствительность и высокую зависимость от внешних вибрационных и акустических помех, что делает его непригодным для определения остаточной скорости пули после прохождения защитного материала. Метод электромагнитной индукции показал более стабильный сигнал, однако его эффективность существенно ограничивается материалом и калибром снаряда, а также уровнем электромагнитных помех, что снижает точность при оценке защитных свойств тканевых и композитных структур.

Наиболее эффективным оказался оптический метод, реализованный в виде измерительного модуля с массивом инфракрасных излучателей и фотодиодов. Устройство позволяет регистрировать скорость пули после взаимодействия с образцом баллистической ткани, обеспечивая субмикросекундное время отклика и устойчивость к внешним воздействиям. Это даёт возможность количественно оценивать степень снижения кинетической энергии снаряда и определять эффективность защитных материалов. Полученные результаты подтверждают, что оптические хронографы являются предпочтительным инструментом для лабораторных и сертификационных испытаний бронежилетов и баллистических тканей.

Ключевые слова: цифровизация, конкурентоспособность, цифровая экономика, высшее образование, оценка цифровизации университета.

Специальные текстильные материалы, выработанные из высокомодульных нитей, имеющих сложное многослойное строение, чрезвычайно востребованы в различных сферах, в том числе, используются для изготовления средств индивидуальной баллистической защиты. Материалы для баллистической защиты требуют особенно ответственного проектирования и оценки их качества, поскольку от этого зависят жизни людей. Поэтому большое значение имеют исследования в области баллистики, которые требуют высокой точности при регистрации скорости движения пуль и других малогабаритных снарядов. Настоящая работа направлена на изучение способов измерения скорости пули и поиска метода пригодного для проведения баллистических исследований тканей для бронежилетов.

От скорости движения пуль и других малогабаритных снарядов зависят результаты испытаний оружия, оценка характеристик боеприпасов, а также прикладные задачи в спортивной стрельбе и криминалистике. Существующие методы измерения скорости обладают различной степенью точности и устойчивости к внешним факторам, что обуславливает необходимость их сравнительного анализа. В данной работе измерение скорости пули рассматривается в контексте испытаний баллистических тканей и бронежилетов. Измерение остаточной скорости пули после прохождения через защитный материал является важным критерием оценки его энергии торможения и защитных свойств.

Целью данных исследований являлось сопоставление вибрационного, электромагнитного и оптического подходов к определению скорости пули с выявлением их преимуществ и ограничений.

Метод на основе вибрационных датчиков. Первым рассмотренным способом измерения скорости пули стал метод, основанный на применении вибрационных датчиков. Концептуально он предполагал использование двух датчиков типа SW-420, подключённых к микроконтроллеру Arduino. Датчики размещались на фиксированном расстоянии друг от друга, и в момент пролёта пули предполагалось регистрировать колебания, вызванные ударной волной или механическими вибрациями, возникающими при её прохождении вблизи чувствительных элементов.

Принцип измерений заключался в фиксации времени между последовательными срабатываниями двух датчиков; скорость пули затем определялась как отношение пройденного между датчиками расстояния к зафиксированному времени пролёта.

Однако практическая реализация выявила существенные ограничения данного подхода. В частности, сенсоры SW-420 обладают относительно низкой чувствительностью и не рассчитаны на регистрацию событий с микросекундной длительностью. Пуля, движущаяся со скоростью порядка сотен метров в секунду, проходит контрольный участок за доли миллисекунды, тогда как время отклика датчиков вибрации существенно выше. В результате срабатывания датчиков носили нерегулярный и хаотичный характер, что не позволяло по-

лучить достоверные данные. Дополнительным недостатком являлась высокая зависимость результата от внешних факторов: механических шумов, вибраций и акустических помех.

Таким образом, метод на основе вибрационных датчиков оказался неприменимым для точного и стабильного измерения скорости высокоскоростных объектов, хотя мог бы использоваться в условиях, где допускается измерение более медленных процессов или грубая оценка времени пролёта. Кроме того, данный метод не позволяет корректно регистрировать изменение скорости пули после взаимодействия с баллистической тканью, что является ключевым параметром при испытаниях защитных материалов.

Метод на основе электромагнитной индукции. В качестве альтернативы был реализован метод, основанный на явлении электромагнитной индукции. Его принцип заключается в том, что при пролёте пули через катушку индуктивности происходит возмущение электромагнитного поля, что приводит к изменению индуктивного сопротивления и наведению электрического сигнала. В экспериментальной установке катушка размещалась на траектории движения пули и подключалась к измерительной схеме, которая фиксировала изменения в сигнале.

Предполагалось, что момент пересечения пули с катушкой можно использовать в качестве временной метки, а при применении двух катушек, расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга, вычислять скорость пролёта по разнице этих временных отметок.

Тем не менее, на практике этот метод также показал ограниченную эффективность. Проблема заключалась в том, что величина индуцированного сигнала сильно зависела от материала пули, её формы и скорости. Немагнитные и малогабаритные объекты практически не вызывали заметных изменений в поле катушки, что затрудняло их регистрацию. Кроме того, высокочастотные шумы и электромагнитные помехи, возникающие в реальных условиях, существенно снижали точность измерений.

Эксперименты продемонстрировали, что метод электромагнитной индукции более универсален по сравнению с вибрационным подходом, однако также не обеспечивает необходимой точности при работе с высокоскоростными снарядами. Его использование оправдано лишь для специализированных задач, связанных с объектами, имеющими выраженные электромагнитные свойства (например, крупные металлические тела при относительно невысоких скоростях). В условиях испытаний баллистических тканей данный метод также непрактичен, так как остаточная скорость пули после прохождения материала может быть ниже и сопровождаться меньшей изменчивостью электромагнитного поля, что дополнительно снижает точность регистрации.

Оптический метод измерения скорости пули. Одним из наиболее перспективных подходов к измерению скорости высокоскоростных тел является использование оптического баллистического хронографа. В основе данного метода лежит принцип прерывания светового потока пуль при пролёте через систему оптических рамок, расположенных на фиксированном расстоянии друг от друга. В момент прохождения объекта через первую рамку микроконтроллер фиксирует начало отсчёта времени, а при срабатывании второй рамки происходит остановка таймера. После этого скорость определяется как отношение прой-

денного расстояния к затраченному времени. Преимущество оптического метода состоит в том, что он позволяет точно измерять как исходную скорость пули, так и её скорость после пересечения барьерного слоя (например, слоя баллистической ткани или композитного материала). Это делает оптические хронографы подходящими для сертификационных и исследовательских испытаний бронежилетов.

Конструкция и компоненты. В экспериментальной схеме исследуемый образец баллистического материала размещался перед измерительным модулем в единой интегрированной конструкции. Оптический модуль представлял собой жёстко закреплённый блок двух оптических рамок с фиксированным расстоянием между ними (500 мм). При проведении испытаний образец устанавливался на стойке перед первой рамкой на расстоянии не более 50–100 мм, чтобы минимизировать влияние деформации и аэродинамики на отсечку скорости. После возможного пробития образца оптические датчики фиксировали остаточную скорость пролетающего снаряда по времени между срабатываниями первой и второй рамок. Каждая рамка включала массив излучателей и массив фотодатчиков. В качестве источников света использовались инфракрасные светодиоды TSHF5410 ($\lambda = 890$ нм), а в качестве приёмников – фотодиоды LTR-323DB, работающие в фотопроводящем (обратносмещённом) режиме. Данное решение обеспечило высокую чувствительность и субмикросекундное время отклика, что является критически важным для регистрации пролёта малогабаритных снарядов, например, пули длиной 5 мм, движущейся со скоростью порядка 1000 м/с. В этом случае длительность перекрытия оптического луча составляет всего 5 мкс, что недостижимо при использовании традиционных фоторезисторов или фототранзисторов.

Сигналы фотодиодов подавались на компараторы LM339, которые формировали чёткие цифровые импульсы, исключающие шумовые составляющие. Контроллер Arduino, работающий с частотой выборки 2 МГц и разрешением таймера 0,5 мкс, позволял проводить измерения с высокой точностью. Для минимизации влияния внешнего освещения использовались инфракрасные источники и схемы автоматической нормализации уровня освещённости.

Оптимизация оптической системы. Особое внимание было уделено геометрии расположения светодиодов и фотодиодов. С помощью САПР была рассчитана конфигурация, исключающая возможность пролёта даже малокалиберной пули (например, калибра 0,177) без пересечения хотя бы одного оптического луча. В результате каждая рамка содержала массив из восьми излучателей и восьми приёмников, формирующих зону контроля размером 135 × 85 мм. Такое решение обеспечило надёжную регистрацию даже при неидеальном позиционировании оружия относительно установки.

Разработанный хронограф продемонстрировал следующие ключевые достоинства:

1. Высокая скорость отклика сенсоров, обеспечивающая регистрацию событий длительностью менее 1 мкс.
2. Устойчивость к шумам и вибрационным воздействиям.
3. Возможность измерения скоростей до 1000 м/с, включая сверхзвуковой диапазон.

4. Относительная простота реализации и доступность элементной базы.
5. Масштабируемость конструкции для работы с различными типами боеприпасов.

Выводы

1. Проведённый сравнительный анализ показал, что вибрационный и электромагнитный методы не соответствуют требованиям к современным измерительным системам в области баллистики. Их применение ограничено низкой чувствительностью, высокой зависимостью от внешних факторов и нестабильностью получаемых сигналов, что исключает возможность использования данных подходов для точного измерения скорости высокоскоростных объектов.

2. Наибольшую эффективность продемонстрировал оптический метод, основанный на применении инфракрасных излучателей и фотодиодов в обратносмещённом режиме. Данная система обеспечивает высокую точность, стабильность и устойчивость к внешним воздействиям, а также возможность измерения скоростей до 1000 м/с, включая сверхзвуковой диапазон.

3. Результаты проверенных исследований позволяют судить, что оптический метод может служить инструментом в лабораторных испытаниях баллистических тканей, бронежилетов и других средств индивидуальной защиты, где требуется точное определение остаточной скорости пули для оценки класса защиты материала.

Список использованных источников

1. Zhang, L., Li, J., Xu, H. Design of an optical ballistic chronograph for high-speed projectile measurement // *Sensors*. 2022. – Vol. 22, – No. 14. – P. 5273. DOI: 10.3390/s22145273. (Scopus/WoS)
2. Singh, R., Kumar, P. Advances in ballistic measurement techniques: A review // *Measurement*. 2021. – Vol. 183. – P. 109822. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109822. (Scopus/WoS)
3. Chen, Y., Zhao, W., Wang, D. Electromagnetic methods for projectile velocity detection under noisy conditions // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023. – Vol. 72. – P. 4500311. DOI: 10.1109/TIM.2023.4500311. (Scopus/WoS)
4. Marino J., Torres B., Rivera R. Near-IR gate sensors for ultra-fast ballistic detection // *Applied Optics*. 2021. Vol. 60, No. 20. P. 5667–5675. DOI: 10.1364/AO.429876. (Scopus/WoS)
5. Wang, L., He, X. High-speed photodiode matrix for microsecond object detection // *Optics and Lasers in Engineering*. 2021. – Vol. 147. – P. 106719. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2021.106719. (Scopus/WoS)
6. Hassan, M., Silva, F. High-speed chronography techniques for ballistic applications // *Defence Technology*. 2020. – Vol. 16, – No. 3. – P. 437–447. DOI: 10.1016/j.dt.2019.04.007. (Scopus/WoS)
7. Oliveira, C., Santos, P., Gomes, L. Optical beam interruption method for projectile velocity measurement // *Journal of Applied Instrumentation*. 2022. – Vol. 5, – No. 3. – P. 45–54.

8. Ivanov, A., Petrov, D., Kuznetsov, M. Оптические методы регистрации движения высокоскоростных объектов // Измерительная техника. – 2024. – № 7. – С. 15–22.
9. Sokolov, P., Artemiev, A. Современные измерительные модули для испытаний бронежилетов // Технология легкой промышленности. – 2024. – № 2. – С. 33–41.
10. Kuterbekov, G., Akilbekov, A., Shaimerdenova, Z. Ballistic resistance of multilayer aramid fabric systems // Polymer Testing. – 2022. – Vol. 114. – P. 107697. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2022.107697. (Scopus/WoS)
11. Kim, D., Park, S. Ballistic performance evaluation of UHMWPE composite fabrics // Composites Part B. 2021. – Vol. 224. – P. 109202. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109202. (Scopus/WoS)
12. Rahman, K., Ahmed, S., Basu, D. Measurement of projectile deceleration in protective composite panels // Materials & Design. 2023. – Vol. 225. – P. 111527. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.111527. (Scopus/WoS)
13. Li, X., Zhou, H., Song, J. Impact energy dissipation in multilayer ballistic textiles // Composite Structures. 2023. – Vol. 319. – P. 117052. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.117052. (Scopus/WoS)
14. Torres, J., Morales, E., Diaz, N. Smart ballistic test ranges using optical sensing arrays // IEEE Sensors Journal. 2023. – Vol. 23, – No. 9. – P. 11234–11243. DOI: 10.1109/JSEN.2023.3267131. (Scopus/WoS)
15. Wu, P., Zhao, B., Lin, F. Fiber-optic sensors for high-speed impact detection // Sensors and Actuators A. 2020. – Vol. 314. – P. 112259. DOI: 10.1016/j.sna.2020.112259. (Scopus/WoS)
16. Brown, T., Evans, J., Walker, S. Electromagnetic interference suppression in velocity measurement systems // Measurement Science and Technology. 2020. – Vol. 31, – No. 8. – P. 085004. DOI: 10.1088/1361-6501/ab7c31. (Scopus/WoS)

УДК 677.03

Особенности определения показателя «микронейр» при оценке линейной плотности короткоштапельных волокон с наличием внутренней полости

Пашин Е. Л., д.т.н., проф.

Костромская государственная
сельскохозяйственная академия,
г. Кострома,
Российская Федерация

Реферат. Дано объяснение причин снижения точности при определении линейной плотности волокон льняного котонина по воздухопроницаемости в виде показателя «микронейр» при использовании импортной измерительной системы фирмы USTER по методу HVI. В условиях случайного по времени начала уборки стеблей льна, а также при случайной доле в общей волокнистой массе