

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ ЭНЕРГОЕМКИХ ВЕЩЕСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОРСКИХ ИОНИЗАЦИОННЫХ ДАТЧИКОВ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.Ю. Ганигин
В.В. Киященко
А.А. Акопян
Г.В. Шмырин
М.В. Теняков
Д.В. Веревкин
М.С. Гречухина

ganigin.s.yu@yandex.ru
vv.kiyashchenko@gmail.com
anzakopyan@yandex.ru
gleb.shmyrin@mail.ru
maximtenykov@gmail.com
mukum@bk.ru
mariya_grechukhina@mail.ru

СамГТУ, г. Самара, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрено применение ионизационных датчиков для измерения скорости детонации энергоемких веществ и создания цифровых моделей на основе полученных данных. Приведены принципы работы и экспериментальная установка для измерений скорости детонации. Получены результаты измерений скорости детонации различных веществ, подтверждающие точность и значимость данного метода исследования. Описан принцип создания цифровых моделей на основе данных о скорости детонации и составе вещества с помощью математического анализа и статистики. Полученные данные о скорости детонации использованы при создании цифровой модели энергоемкого вещества для оптимизации его свойств. Приведены выводы и перспективы дальнейших исследований, включая разработку более точных и чувствительных датчиков, расширение набора параметров для измерений и углубления взаимодействия между компонентами вещества на молекулярном уровне. Результаты исследования могут быть применены в различных отраслях промышленности, науке и технологиях, для прогнозирования и управления свойствами энергоемких веществ, а также для обеспечения их безопасности

Ключевые слова

Ионизационные датчики, скорость детонации, энергоемкие вещества, цифровые модели, математический анализ, прогнозирование свойств

и эффективности. Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением возможностей ионизационных датчиков для измерения скорости детонации энергоемких веществ

Поступила 01.08.2023

Принята 25.06.2024

© Автор(ы), 2024

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания (тема № АААА-А12-2110800012-0)

Введение. Энергоемкие вещества являются существенными компонентами современной промышленности и науки и используются в различных областях, включая военную, медицинскую, космическую промышленность и научные исследования. Возможность их применения имеет потенциал для технологических прорывов и повышения качества жизни. Тем не менее использование энергоемких веществ требует особой осторожности в силу возможных негативных последствий для окружающей среды и безопасности людей. В связи с этим исследования энергоемких веществ имеют важное значение для их безопасного использования, а также разработки новых материалов повышенной безопасности и эффективности. В рамках настоящей работы выполнены исследования цифровых моделей энергоемких веществ.

Процесс создания цифровой модели энергоемкого вещества включает в себя:

- проектирование безопасных химических процессов;
- разработку новых материалов и компонентов для взрывобезопасных систем;
- планирование промышленных операций;
- улучшение понимания свойств вещества.

В процесс создания входит несколько объемных исследований:

- определение химического состава вещества с использованием методов химического анализа;
- расчет энергетических характеристик вещества (энергии образования газов и мощности детонации); эти данные можно получить путем анализа химических реакций, происходящих во время детонации, и экспериментальных измерений скорости детонации;
- создание математической модели, описывающей процесс детонации;
- использование полученной модели для создания цифровой модели вещества; цифровая модель может быть разработана с помощью программных средств, таких как MATLAB или Python, или представлена в виде трехмерной модели;

– проверка точности цифровой модели путем сопоставления скоростей детонации, полученных экспериментально и с использованием математической модели.

В настоящей работе описано исследование, направленное на измерение одного из ключевых параметров, влияющих на свойства энергоемких веществ, в частности, на скорость детонации. Исследованы возможности применения авторских ионизационных датчиков для измерения скорости детонации энергоемких веществ.

В результате обзора предыдущих исследований определено, что измерение скорости детонации является важным параметром для понимания и управления свойствами энергоемких веществ. Существует множество методов измерения скорости детонации, например, на основе оптических волокон, с помощью пьезодатчиков, рефлектометрии и ионизационных датчиков [1–4].

В частности, в [5] показано, что метод ионизационной диагностики может быть использован для измерения скорости детонации энергоемких веществ с высокой точностью и надежностью. В результате исследования [6] выявлено, что цифровые модели, основанные на данных о скорости детонации и составе, могут быть использованы для предсказания поведения детонационных волн в различных условиях. Эти исследования проведены с помощью численного моделирования детонационных волн, проверка — с использованием экспериментальных данных. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения цифровых моделей на основе данных о скорости детонации энергоемких веществ, составе для оптимизации процессов, связанных с их использованием, и повышении безопасности.

Исследования подтверждают значимость измерения скорости детонации и применения цифровых моделей на основе данных о скорости детонации и составе для управления свойствами энергоемких веществ.

Цель настоящей работы — определение эффективности применения авторских ионизационных датчиков для измерения скорости детонации энергоемких веществ и создания цифровых моделей на основе полученных данных. В ходе исследования использованы ионизационные датчики для измерения скорости детонации энергоемких веществ, включая взрывчатые вещества на основе тринитротолуола и гексогена.

Полученные цифровые модели позволяют более точно предсказывать поведение детонационных волн в различных условиях и оптимизировать процессы, связанные с использованием энергоемких веществ. Таким обра-

зом, использование ионизационных датчиков для измерения скорости детонации и создания цифровых моделей на основе полученных данных является эффективным способом управления свойствами энергоемких веществ.

Приведем подробное описание экспериментальной установки, методики измерения скорости детонации, анализа полученных данных и планирования создания цифровых моделей на основе полученных данных.

Методика измерения скорости детонации. Для измерения скорости детонации использована методика, основанная на применении ионизационных датчиков [7, 8]. Эта методика является одной из наиболее точных и удобных. Ионизационные датчики работают на основе эффекта ионизации газа во время прохождения волны детонации через детектор. В результате ионизации возникает электрический ток, который можно измерить и использовать для определения скорости детонации. В методике использован ионизационный датчик ступенчатого типа (рис. 1) [9].



Рис. 1. Ионизационный датчик ступенчатого типа

Датчик представляет собой тонкий слой диэлектрика со слоем металлизации определенной формы (рис. 2), который вставляется в заряд энергоемкого вещества.

При прохождении волны детонации через заряд ионизация газа происходит через датчик, создавая условия для протекания тока, который можно зафиксировать. Для получения более точных данных используют несколько контактов, расположенных на определенном расстоянии друг от друга (рис. 3).

Следовательно, можно получить данные о скорости детонации на разных этапах прохождения волны детонации через заряд. Полученные данные используются для создания цифровой модели энергоемкого вещества [10], которая позволяет оптимизировать его свойства.

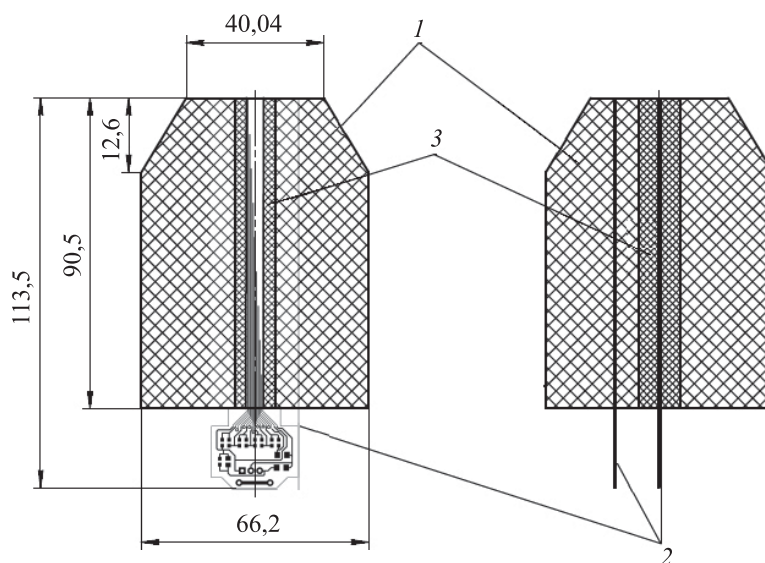


Рис. 2. Расположение ионизационных датчиков (2) в заряде энергоемкого вещества (1, 3)

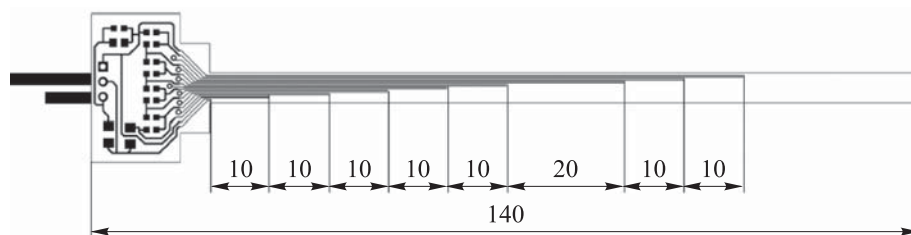


Рис. 3. Расположение контактов

Принципы работы датчиков и установки. Датчики, используемые для измерения скорости детонации, основаны на принципе ионизации газов [11, 12]. Когда происходит детонация взрывчатого вещества, выделяются газы, содержащие ионы, которые могут обнаружить ионизационные датчики. Датчик включает в себя электроды, между которыми проходит электрический ток. Когда ионы проходят через электрическое поле датчика, они обеспечивают протекание тока. Фиксирование изменения напряжения позволяет определить наличие ионизации и скорость прохождения детонации. Чувствительные элементы датчика расположены на равном расстоянии, что обеспечивает удобство обработки.

Для измерения скорости детонации необходима экспериментальная установка, которая включает в себя ионизационные датчики, взрывное устройство и площадку для проведения взрывных работ. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 4.

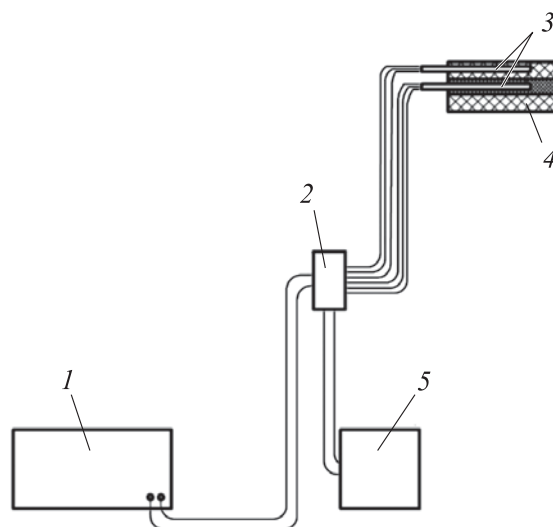


Рис. 4. Схема экспериментальной установки:

1 — осциллограф; 2 — коммутатор; 3 — ионизационные датчики;
4 — заряд; 5 — аккумулятор

Для проведения эксперимента датчики сначала устанавливают внутри заряда. Взрывчатое вещество инициируется, когда детонация достигает датчиков, они регистрируют наличие и перемещение облака ионизированных газов. Скачки напряжения при прохождении ионизированных газов позволяют измерить скорость детонации.

Расстояние между реперными точками известно, что позволяет при определении времени прихода ионизированных газов к этим реперным точкам рассчитать на каждом участке датчика скорость детонации:

$$V_{Di} = \frac{l_i}{t_{i+1} - t_i},$$

где l_i — расстояние между соседними реперными точками; $t_{i+1} - t_i$ — разность времени прихода детонационной волны к соседним реперным точкам.

Для определения времени прихода ионизированных газов к реперным точкам необходимо найти время начала фронтов импульсов на полученных осциллограммах.

Временем начала фронта импульса считается время, при котором уровень сигнала достигает 10 % размаха импульса. Размах импульса определяется как разность верхнего и нижнего уровней сигнала (рис. 5).

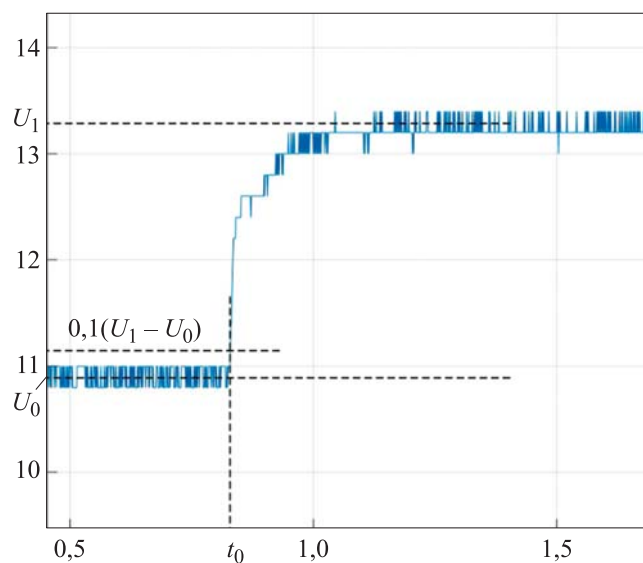


Рис. 5. Определение времени начала фронта импульса

Погрешность расчета скорости детонации зависит от погрешностей Δl_i и Δt_i измерения расстояния между реперными точками и времени прихода ионизированных газов к реперным точкам:

$$\Delta V_{Di} = \frac{\Delta l_i}{\Delta t_{i+1} - \Delta t_i}.$$

После проведения эксперимента полученные данные анализируются и на их основе строится цифровая модель энергоемкого вещества. Эта модель может использоваться для управления свойствами вещества и его производством.

В результате исследования, проведенного с помощью ионизационных датчиков, установленных на равном расстоянии друг от друга вдоль среды, в которой происходила детонация, получены данные о скорости детонации двух образцов энергоемких веществ. Каждый образец измерен десять раз, и результаты усреднены. Установлено, что скорость детонации различалась для разных веществ. Средняя скорость детонации для каждого образца энергоемкого вещества и соответствующая стандартная погрешность ее определения приведены в таблице.

Полученные данные о скорости детонации приведены в виде графиков зависимостей напряжения от времени (рис. 6) для каждого исследуемого энергоемкого вещества. Графики позволяют проанализировать динамику процесса детонации и выявить особенности поведения каждого вещества.

Средняя скорость детонации и стандартная погрешность ее определения

Номер образца энергоемкого вещества	Средняя скорость детонации, м/с	Стандартная погрешность, м/с
1	2000	50
2	1800	40

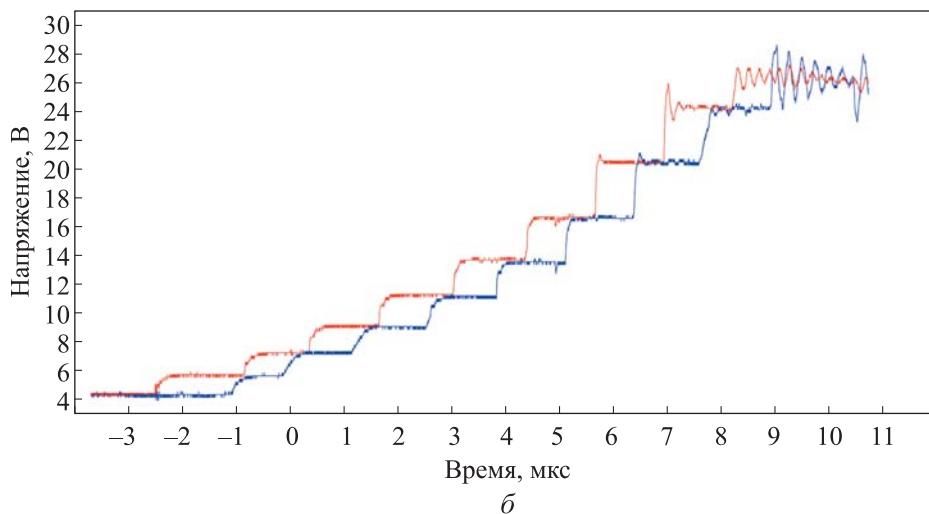
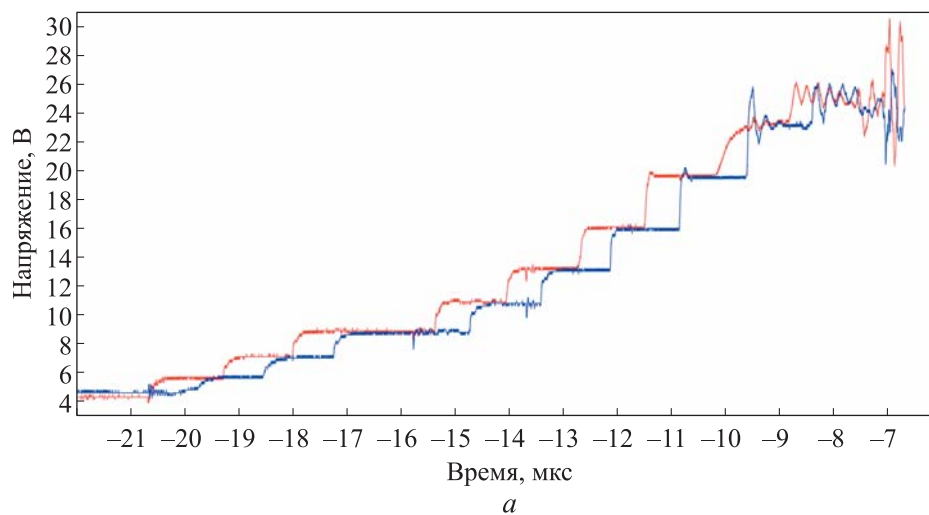


Рис. 6. Графики зависимостей напряжения от времени для каждого исследуемого энергоемкого вещества:

a, б — эксперименты № 1 и № 10 (ионизационные датчики)

Ступенчатая диаграмма свидетельствует о наличии в исследуемом веществе ионизации. Каждый скачок напряжения на диаграмме — это достижение ионизированными газами реперной точки датчика. Как было

отмечено ранее, расстояние между реперными точками известно, это позволяет при анализе результатов определить скорость детонации. Осцилляции в конце графиков служат признаком обрыва измерительной линии и появляются при уничтожении датчика.

Сигнал, получаемый с датчиков в составе измерительной системы, обрабатывается с помощью специального алгоритма. Графическое представление исходного сигнала $y(i)$ приведено на рис. 7, а.

Дальнейшие действия по обработке сигнала включают в себя следующие этапы.

Этап 1. Дифференцирование сигнала (рис. 7, б):

$$dy_i = \frac{y_i - y_{i-1}}{\Delta t},$$

где Δt — длительность одного такта.

Этап 2. Сравнение дифференцированного сигнала с пороговым значением, которое выше уровня шумов квантования, и переход в нормированный вид (рис. 7, в), т. е. если $dy_i > \text{const}$, то $dy_i = 1$, иначе $dy_i = 0$.

Этап 3. При $dy_i = 1$ фиксация времени $t_j = i \Delta t$ и введение задержки по входу на N тактов, характерной для минимально возможной задержки ионизационной волны между ступенями датчика (порядка 1 мкс для датчика, токопроводящие дорожки которого расположены вдоль нормали фронта распространения детонационной волны): $dy_{i+n} = 0$ при $n = 1, 2, 3, \dots, N$.

Этап 4. Продолжение считывания значения dy_i при $n > N$.

Этап 5. Повторение этапов 3 и 4 $M - 1$ раз, где M — число ступеней в ионизационном датчике.

Этап 6. Нахождение интервалов между импульсами $T_j = t_{j+1} - t_j$.

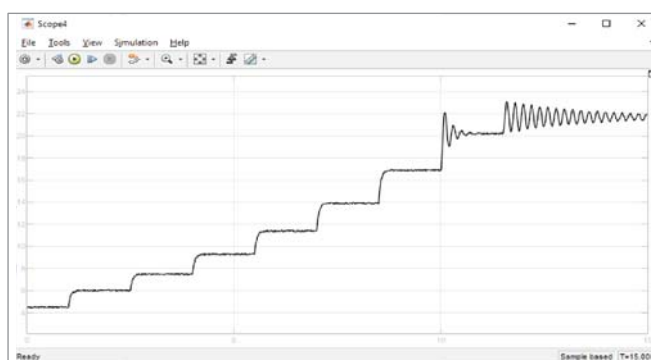
Этап 7. Определение скорости распространения детонационной волны

$$V_M = \frac{d_M}{T_j},$$

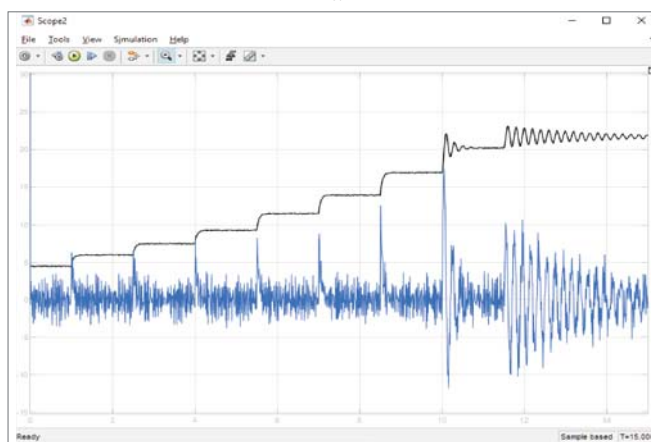
где d_M — разность длин двух соседних ступеней датчика.

Фрагменты блок-схемы алгоритма приведены на рис. 8.

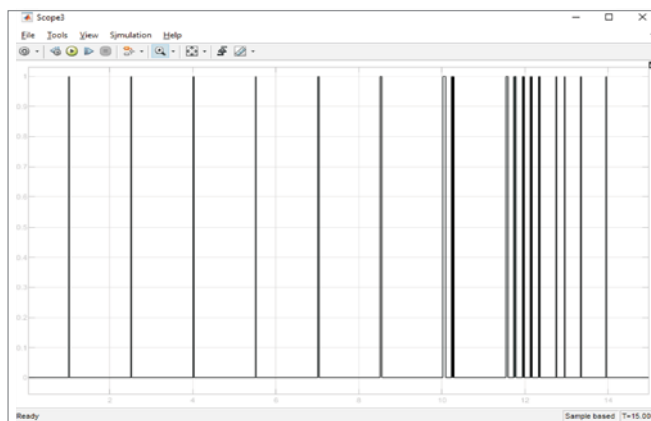
При реализации алгоритма (см. рис. 8) решается задача определения скорости ионизационной волны в датчике, имеющем конструкцию, приведенную на рис. 1. Решение заключается в определении временных интервалов замыкания пар проводников в ступенях датчика, имеющих разную фиксированную длину.



a



б



в

Рис. 7. Графическое представление исходного сигнала в среде MATLAB (*a*); дискретный (*б*) и нормированный (*в*) сигналы после прохождения через блок сравнения с пороговым значением в среде MATLAB

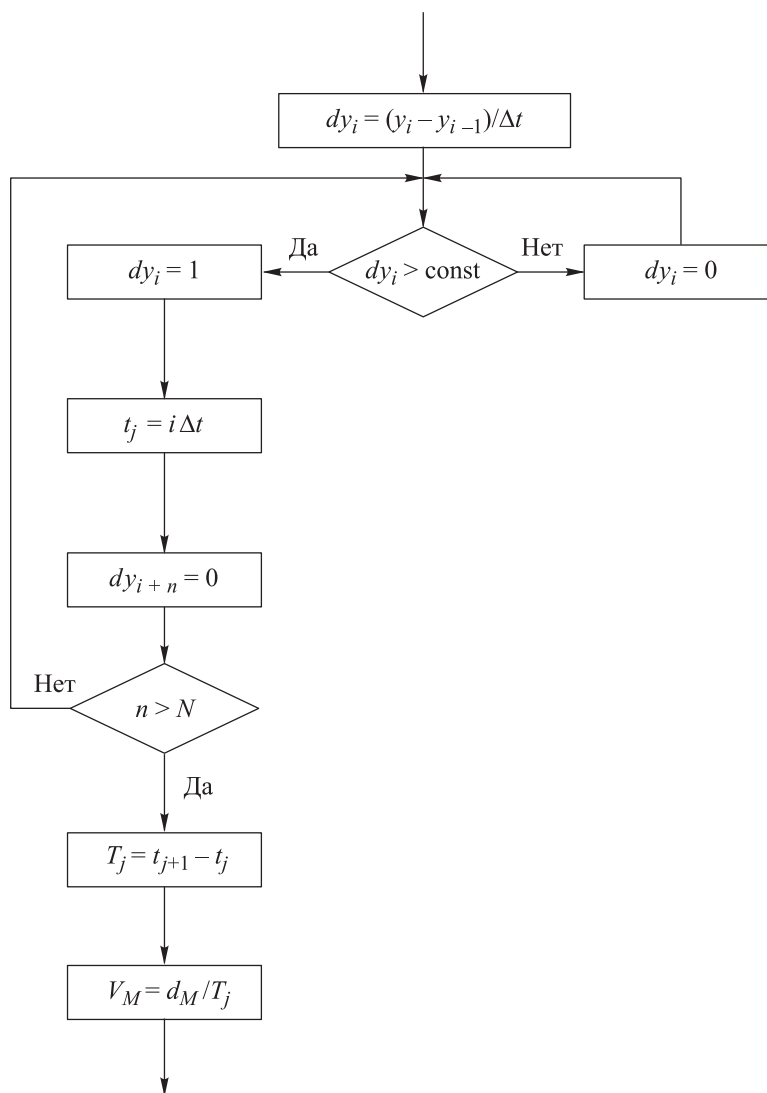


Рис. 8. Фрагменты блок-схемы алгоритма обработки сигнала, получаемого с датчиков скорости детонации в составе измерительной системы, реализованного в среде MATLAB

Оценка погрешности определения скорости ионизационной волны при реализации данного алгоритма путем измерения временных интервалов, содержащих информацию о движении ионизационного фронта, сводится к анализу частоты дискретизации и шага квантования сигнала в выбранном АЦП. Используемое для получения представленных данных АЦП имеет частоту дискретизации 1 ГГц и разрядность $n = 8$, откуда можно судить, что погрешности дискретизации и квантования равны 1 нс ($1/f_d$) и 0,2 В ($[U_{\max} - U_{\min}] / 2^n$).

Как следует из этапа 7 приведенного алгоритма, кроме погрешности определения временного интервала между импульсами необходимо знать точность изготовления датчика. Ионизационный датчик (см. рис. 1) выполнен по седьмому классу точности (ГОСТ Р 53429–2009¹), максимальный разброс размеров исполнения токопроводящих дорожек составляет 50 мкм.

Следовательно, при полученных погрешностях дискретизации и квантования сигнала, а также максимальном отклонении длины токопроводящих дорожек от заложенного конструкцией максимальная погрешность определения скорости составляет не более 10^{-3} м/с.

Отметим, что в приведенном алгоритме не учитываются шумы в сигнале, вызванные влиянием внешних воздействующих факторов, которые могут влиять на точность временных интервалов между информационными импульсами. Однако они не являются постоянными и их учет может быть проведен только при измерении соответствующих параметров среды.

Обсуждение полученных результатов и сравнение с результатами предыдущих исследований. Сравнение полученных результатов с данными предыдущих исследований позволяет сделать вывод о точности измерения скорости детонации с помощью ионизационных датчиков и подтверждает значимость предлагаемой методики исследования энергоемких веществ. Кроме того, низкоомный выход датчика обеспечивает хорошее ОСШ и упрощает обработку результатов. Установлено, что полученные данные о скорости детонации могут быть использованы для создания цифровых моделей энергоемких веществ на основе математических алгоритмов. Это позволяет управлять свойствами вещества и оптимизировать его использование в различных областях, например, в военной и космической промышленности [13]. Однако необходимо отметить, что проведение исследований на ионизационных датчиках имеет ограничения, связанные с высокой стоимостью оборудования и необходимостью экспериментов в условиях строгой безопасности [14–16]. В этом контексте возможны альтернативные методы измерения скорости детонации, которые также требуют дальнейшего исследования и сравнения с данными, полученными с помощью ионизационных датчиков.

Применение полученных данных. Одним из основных применений данных об измеренной скорости детонации является создание цифровых моделей энергоемких веществ. Такие модели могут быть использованы

¹ ГОСТ Р 53429–2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции. М., Стандартинформ, 2018.

для предсказания и анализа различных свойств вещества, таких как силы давления и температуры, которые возникают при взрыве. Создание цифровых моделей на основе скорости детонации является достаточно сложным процессом, который требует применения специализированного программного обеспечения и высококачественных данных об измеренной скорости детонации и составе энергоемкого вещества. Разработка таких моделей может быть полезной для инженеров и научных исследователей в области создания взрывоопасных материалов и обеспечения безопасности при их использовании. Созданные цифровые модели могут использоваться для проведения виртуальных испытаний в условиях, максимально приближенных к реальным, что позволяет предсказать поведение энергоемкого вещества в различных ситуациях и оптимизировать его свойства. Кроме того, данные об измеренной скорости детонации могут быть использованы для определения оптимального состава энергоемкого вещества, который обеспечивает максимальную эффективность и безопасность при использовании. Таким образом, создание цифровых моделей на основе данных о скорости детонации является важным шагом в исследовании энергоемких веществ и обеспечении их безопасности и эффективности при использовании.

Цифровые модели на основе данных о скорости детонации и составе энергоемких веществ используются для прогнозирования и управления их свойствами. Основным принципом создания моделей является анализ полученных данных и построение математических моделей, которые описывают зависимость скорости детонации от состава и других параметров энергоемкого вещества. Для построения модели необходимо использовать различные методы математического анализа и статистики, такие как регрессионный анализ, кластерный анализ, многомерный анализ данных и др. Полученная модель может быть использована для прогнозирования скорости детонации новых веществ на основе их состава и других параметров [17].

Цифровые модели на основе данных о скорости детонации и составе энергоемких веществ находят широкое применение в различных областях, включая промышленность, оборону, науку и технологии [18–20].

Заключение. Рассмотрены принципы работы ионизационных датчиков и их применение для измерения скорости детонации энергоемких веществ. Приведены схема экспериментальной установки и процедура измерений, а также результаты исследования. Подтверждена важность измерения скорости детонации для управления свойствами энергоемких веществ. Создание цифровых моделей на основе скорости детонации может

быть полезным инструментом для прогнозирования поведения вещества при различных условиях и для оценки возможных рисков и опасностей. Моделирование также может помочь в разработке более безопасных и эффективных энергоемких веществ. Таким образом, применение ионизационных датчиков для измерения скорости детонации и создание цифровых моделей на основе полученных данных является перспективным направлением дальнейших исследований в области энергохимии и безопасности. Развитие этой темы может привести к новым открытиям и разработкам в области энергоемких веществ, что может иметь большое значение для многих отраслей промышленности и науки.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением возможностей ионизационных датчиков для измерения скорости детонации энергоемких веществ. Одним из направлений может быть разработка более точных и чувствительных датчиков, способных работать при более высоких температурах и давлениях. Возможны исследования, направленные на расширение набора параметров, которые можно измерять с помощью ионизационных датчиков. Например, можно рассмотреть возможность измерения концентрации отдельных компонентов энергоемких веществ, что может быть полезно для создания более точных цифровых моделей. Другим направлением дальнейших исследований может быть более глубокое изучение взаимодействия между компонентами энергоемких веществ, включая процессы, происходящие на уровне молекулярных связей. Это может помочь лучше понять механизмы детонации и предсказать поведение вещества при различных условиях. В дальнейших работах планируется описать остальные этапы создания цифровых моделей, такие как создание математической модели, описывающей процесс детонации, создание и исследование цифровых моделей веществ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Козырев С.А., Едигарев С.А., Власова Е.А. и др. Комплексный метод оценки взрывчатых и газовых характеристик промышленных ВВ. *Записки Горного института*, 2007, т. 171, с. 195–202. EDN: IBLIKV
- [2] Галайдин П.А., Мустафаев Ю.Н., Мустейкис А.И. Измерение скорости процессов в детонационных трубах с использованием ионизационных регистраторов. *Приборостроение*, 2011, № 5, с. 72–75.
- [3] Метод измерений скорости детонации взрывчатых веществ рефлектометрическим методом с применением измерителя скорости детонации Speed VOD СТО 01.01.004-2011 (компания TLC Engineering-solutions Ltd). Екатеринбург, УрО РАН, 2011.

- [4] Смуров С.В., Салько А.Е., Загарских В.И. и др. Явление пересжатости детонационной волны как инструмент повышения взрывчатых характеристик линейных детонирующих устройств. *Известия Института инженерной физики*, 2019, № 4, с. 21–24. EDN: ZZZZDP
- [5] Кутуев В.А., Меньшиков П.В., Жариков С.Н. Анализ методов исследования детонационных процессов ВВ. *Проблемы недропользования*, 2016, № 3, с. 78–87. EDN: WMEGUZ
- [6] Frederick M.D., Gejji R.M., Shepherd J.E., et al. Statistical analysis of detonation wave structure. *Proc. Combust. Inst.*, 2023, vol. 39, no. 3, pp. 2847–2854. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.08.054>
- [7] Zhang G., Zhao Y., Liu Y., et al. A flexible MEMS ionization-conducted probe sensor for evaluating detonation velocity of microcharges. *Sens. Actuator A Phys.*, 2021, vol. 331, art. 112929. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112929>
- [8] Liu T., Cui J., Zheng Y., et al. A self-powered inert-gas sensor based on gas ionization driven by a triboelectric nanogenerator. *Nano Energy*, 2023, vol. 106, art. 108083. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.108083>
- [9] Клевцов С.И. Физические принципы преобразования сигналов в датчиках. Таганрог, ТТИ ЮФУ, 2007.
- [10] Lv Z., Xie S., Li Y., et al. Building the metaverse using digital twins at all scales, states, and relations. *VRH*, 2022, vol. 4, no. 6, pp. 459–470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vrih.2022.06.005>
- [11] Булат П.В., Есаков И.И., Грачев Л.П. и др. Математическое и компьютерное моделирование горения и детонации под критическим стримерным разрядом. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2017, т. 17, № 4, с. 569–592. DOI: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-4-569-592>
- [12] Langmuir I., Jones H.A. A simple method for quantitative studies of ionization phenomena in gases. *Science*, 1924, vol. 59, no. 1530, pp. 380–383. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.59.1530.380.c>
- [13] Генералов М.Б. Основные процессы и аппараты технологии промышленных взрывчатых веществ. М., Академкнига, 2004.
- [14] Воробьева О.В., Костеренко В.Н., Тимченко А.Н. Анализ причин взрывов с целью повышения эффективности системы управления безопасностью труда угледобывающих предприятий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2018, № S61, с. 3–17. DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-61-3-17>
- [15] Субботин А.И., Гаврилов Н.И., Колесникова С.В. Документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в области взрывных работ и изготовления взрывчатых материалов. М., ЗАО НТЦ ПБ, 2009.
- [16] Лебедев А.А., Климовский А.В. Оценка безопасности ведения взрывных работ (на примере воздействия карьерных взрывов на здания хлебокомбината). *Совре-*

менные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. *Матер. 10 Междунар. сейсм. шк.* Обнинск, ФИЦ ЕГС РАН, 2015, с. 204–206. EDN: UIOPST

[17] Yang Z., Rong J., Zhao Z. Study on the prediction and inverse prediction of detonation properties based on deep learning. *Def. Technol.*, 2023, vol. 24, pp. 18–30.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.11.011>

[18] Liu M.B., Liu G.R., Zong Z., et al. Computer simulation of high explosive explosion using smoothed particle hydrodynamics methodology. *Comput. Fluids*, 2003, vol. 32, no. 3, pp. 305–322. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-7930\(01\)00105-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7930(01)00105-0)

[19] Yellup J.M. The computer simulation of an explosive test rig to determine the spall strength of metals. *Int. J. Impact. Eng.*, 1984, vol. 2, no. 2, pp. 151–167.

DOI: [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(84\)90003-4](https://doi.org/10.1016/0734-743X(84)90003-4)

[20] Yin J.P., Han Y.Y., Wang X.F., et al. A new charge structure based on computer modeling and simulation analysis. *J. Vis. Commun. Image Represent.*, 2019, vol. 64, art. 102613. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JVCIR.2019.102613>

Ганигин Сергей Юрьевич — д-р техн. наук, доцент, декан инженерно-технологического факультета СамГТУ (Российская Федерация, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244).

Киященко Виктория Витальевна — младший научный сотрудник лаборатории «Цифровые двойники материалов и технологических процессов их обработки» СамГТУ (Российская Федерация, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244).

Акопян Анжела Артаковна — преподаватель кафедры «Радиотехнические устройства» СамГТУ (Российская Федерация, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244).

Шмырин Глеб Вячеславович — младший научный сотрудник лаборатории «Цифровые двойники материалов и технологических процессов их обработки» СамГТУ (Российская Федерация, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244).

Теняков Максим Владимирович — младший научный сотрудник лаборатории «Цифровые двойники материалов и технологических процессов их обработки» СамГТУ (Российская Федерация, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244).

Веревкин Денис Васильевич — инженер-исследователь лаборатории «Цифровые двойники материалов и технологических процессов их обработки» СамГТУ (Российская Федерация, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244).

Гречухина Мария Сергеевна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории «Цифровые двойники материалов и технологических процессов их обработки» СамГТУ (Российская Федерация, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Ганигин С.Ю., Киященко В.В., Акопян А.А. и др. Измерение скорости детонации энергоемких веществ с использованием авторских ионизационных датчиков: экспериментальные и цифровые моделирования. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2024, № 3 (148), с. 22–41. EDN: NMGFCS

**MEASURING DETONATION VELOCITY
OF THE POWER-CONSUMING SUBSTANCES USING
THE AUTHORS' IONIZATION SENSORS:
EXPERIMENTAL AND NUMERICAL SIMULATION**

S.Yu. Ganigin

ganigin.s.yu@yandex.ru

V.V. Kiyashchenko

vv.kiyashchenko@gmail.com

A.A. Akopyan

anzakopyan@yandex.ru

G.V. Shmyrin

gleb.shmyrin@mail.ru

M.V. Tenyakov

maximtenykov@gmail.com

D.V. Verevkin

mukum@bk.ru

M.S. Grechukhina

mariya_grechukhina@mail.ru

SSTU, Samara, Russian Federation

Abstract

The paper considers application of the ionization sensors to measure detonation velocity of the power-consuming substances and to create digital models based on the obtained data. It presents operation principles and experimental setup for such measurements. Results of the detonation velocity measurement in various substances are obtained confirming accuracy and significance of this research method. The paper describes principle of creating digital models based on detonation velocity data and substance composition using mathematical analysis and statistics. The obtained detonation velocity data are used to create a digital model of the power-consuming substance to optimize its properties. It provides conclusions and prospects for further research including design and development of more accurate and sensitive sensors, expansion of the set of measurement parameters, and deepening interaction between the substance components at the molecular level. Research results could be applied in various areas, i.e., industry, defense, science and technology, to predict and control the power-consuming substances properties, as well as to ensure their safety and efficien-

Keywords

Ionization sensors, detonation velocity, power-consuming substances, digital models, mathematical analysis, properties prediction

cy. Prospects in further research are related to expanding capabilities of the ionization sensors in measuring the power-consuming substance detonation velocity

Received 01.08.2023

Accepted 25.06.2024

© Author(s), 2024

The work was financially supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment (project no. AAAA-A12-2110800012-0)

REFERENCES

- [1] Kozyrev S.A., Edigarev S.A., Vlasova E.A., et al. Comprehensive method for assessing explosive and gas characteristics of industrial explosives. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2007, vol. 171, pp. 195–202 (in Russ.). EDN: IBLIKV
- [2] Galaydin P.A., Mustafaeв Yu.N., Musteykis A.I. Process speed measurement in detonation tubes using ionization detectors. *Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2011, no. 5, pp. 72–75 (in Russ.).
- [3] Metod izmereniy skorosti detonatsii vzrychatykh veshchestv reflektrometricheskim metodom s primeneniem izmeritelya skorosti detonatsii Speed VOD STO 01.01.004-2011 (kompaniya TLC Engineering-solutions Ltd) [Method for measuring the detonation velocity of explosives by the reflectometric method using the speed VOD detonation velocity meter STO 01.01.004-2011 (TLC Engineering-solutions Ltd company)]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2011.
- [4] Smurov S.V., Salko A.E., Zagarskikh V.I., et al. The phenomenon of detonation wave overdrive as a tool for increasing the explosive characteristics of linear detonating devices. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki*, 2019, no. 4, pp. 21–24 (in Russ.). EDN: ZZZZDP
- [5] Kutuev V.A., Menshikov P.V., Zharikov S.N. The analysis of methods for studying explosives' detonation processes. *Problemy nedropolzovaniya* [Problems of Subsoil Use], 2016, no. 3, pp. 78–87 (in Russ.). EDN: WMEGUZ
- [6] Frederick M.D., Gejji R.M., Shepherd J.E., et al. Statistical analysis of detonation wave structure. *Proc. Combust. Inst.*, 2023, vol. 39, no. 3, pp. 2847–2854. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.08.054>
- [7] Zhang G., Zhao Y., Liu Y., et al. A flexible MEMS ionization-conducted probe sensor for evaluating detonation velocity of microcharges. *Sens. Actuator A Phys.*, 2021, vol. 331, art. 112929. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112929>
- [8] Liu T., Cui J., Zheng Y., et al. A self-powered inert-gas sensor based on gas ionization driven by a triboelectric nanogenerator. *Nano Energy*, 2023, vol. 106, art. 108083. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.108083>
- [9] Klevtsov S.I. Fizicheskie printsipy preobrazovaniya signalov v datchikakh [Principles of signal transformation in sensors]. Taganrog, TTI YuFU Publ., 2007.
- [10] Lv Z., Xie S., Li Y., et al. Building the metaverse using digital twins at all scales, states, and relations. *VRIH*, 2022, vol. 4, no. 6, pp. 459–470. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vrih.2022.06.005>

- [11] Bulat P.V., Esakov I.I., Grachev L.P., et al. Modeling and simulation of combustion and detonation by subcritical streamer discharge. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2017, vol. 17, no. 4, pp. 569–592 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2017-17-4-569-592>
- [12] Langmuir I., Jones H.A. A simple method for quantitative studies of ionization phenomena in gases. *Science*, 1924, vol. 59, no. 1530, pp. 380–383. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.59.1530.380.c>
- [13] Generalov M.B. Osnovnye protsessy i apparaty tekhnologii promyshlennykh vzryvchatykh veshchestv [Fundamentals of processes and equipment for the production of industrial explosives]. Moscow, Akademkniga Publ., 2004.
- [14] Vorobyeva O.V., Kosterenko V.N., Timchenko A.N. Analysis of the causes of the explosions with the aim of increasing the effectiveness of the system of occupational safety management of coal enterprises. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2018, no. S61, pp. 3–17 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-12-61-3-17>
- [15] Subbotin A.I., Gavrilov N.I., Kolesnikova S.V. Dokumenty po bezopasnosti, nadzornoy i razreshitelnoy deyatel'nosti v oblasti vzryvnykh rabot i izgotovleniya vzryvchatykh materialov [Documents on safety, supervisory and permitting activities in the field of explosive works and the manufacture of explosive materials]. Moscow, ZAO NTTs PB Publ., 2009.
- [16] Lebedev A.A., Klimovskiy A.V. [Safety assessment of explosive works (on the example of the impact of quarry blasts on the buildings of a bakery)]. *Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh. Mater. 10 Mezhdunar. Seysmologicheskoy shkoly* [Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data. Proc. 10th Int. Seismological School]. Obninsk, FITs EGS RAN Publ., 2015, pp. 204–206 (in Russ.). EDN: UIOPS
- [17] Yang Z., Rong J., Zhao Z. Study on the prediction and inverse prediction of detonation properties based on deep learning. *Def. Technol.*, 2023, vol. 24, pp. 18–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.11.011>
- [18] Liu M.B., Liu G.R., Zong Z., et al. Computer simulation of high explosive explosion using smoothed particle hydrodynamics methodology. *Comput. Fluids*, 2003, vol. 32, no. 3, pp. 305–322. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-7930\(01\)00105-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7930(01)00105-0)
- [19] Yellup J.M. The computer simulation of an explosive test rig to determine the spall strength of metals. *Int. J. Impact. Eng.*, 1984, vol. 2, no. 2, pp. 151–167. DOI: [https://doi.org/10.1016/0734-743X\(84\)90003-4](https://doi.org/10.1016/0734-743X(84)90003-4)
- [20] Yin J.P., Han Y.Y., Wang X.F., et al. A new charge structure based on computer modeling and simulation analysis. *J. Vis. Commun. Image Represent.*, 2019, vol. 64, art. 102613. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JVCIR.2019.102613>

Ganigin S.Yu. — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Dean, Faculty of Engineering and Technology, SSTU (Molodogvardeyskaya ul. 244, Samara, 443100 Russian Federation).

Kiyashchenko V.V. — Research Assistant, Laboratory of Digital Twins of Materials and Technological Processes for their Processing, SSTU (Molodogvardeyskaya ul. 244, Samara, 443100 Russian Federation).

Akopyan A.A. — Lecturer, Department of Radio Engineering Devices, SSTU (Molodogvardeyskaya ul. 244, Samara, 443100 Russian Federation).

Shmyrin G.V. — Research Assistant, Laboratory of Digital Twins of Materials and Technological Processes for their Processing, SSTU (Molodogvardeyskaya ul. 244, Samara, 443100 Russian Federation).

Tenyakov M.V. — Research Assistant, Laboratory of Digital Twins of Materials and Technological Processes for their Processing, SSTU (Molodogvardeyskaya ul. 244, Samara, 443100 Russian Federation).

Verevkin D.V. — Research Engineer, Laboratory of Digital Twins of Materials and Technological Processes for their Processing, SSTU (Molodogvardeyskaya ul. 244, Samara, 443100 Russian Federation).

Grechukhina M.S. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Fellow, Laboratory of Digital Twins of Materials and Technological Processes for their Processing, SSTU (Molodogvardeyskaya ul. 244, Samara, 443100 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Ganigin S.Yu., Kiyashchenko V.V., Akopyan A.A., et al. Measuring detonation velocity of the power-consuming substances using the authors' ionization sensors: experimental and numerical simulation. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2024, no. 3 (148), pp. 22–41 (in Russ.).

EDN: NMGFCS