

# Нейросетевое моделирование процесса детонации смеси гексида с инертными наполнителями

А. Р. Мухутдинов<sup>1</sup>, М. Г. Ефимов<sup>1</sup>, З. Р. Вахидова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань, Россия

<sup>2</sup>Учреждение высшего образования «Университет управления «ТИСБИ», г. Казань, Россия

**Аннотация.** В работе проведено нейросетевое моделирование процесса детонации смесового взрывчатого вещества с различными инертными наполнителями на основе современных информационных технологий. С помощью вычислительного эксперимента с разработанной нейросетевой моделью установлены особенности влияния плотности смесового взрывчатого вещества, природы наполнителя и его количества на характер изменения скорости детонации. Предложены оптимальные рецептуры, обеспечивающие максимальную скорость детонации.

**Ключевые слова:** искусственная нейронная сеть, моделирование, программный модуль, детонация, смесовое взрывчатое вещество, инертные наполнители.

DOI 10.14357/20718632210408

## Введение

Современные информационные технологии обеспечивают исследователей новыми эффективными инструментами для детального изучения сложных объектов. Анализ научной литературы показал интерес к использованию компьютерного моделирования на основе искусственной нейронной сети (ИНС) для прогнозирования скорости детонации индивидуальных взрывчатых веществ (ИВВ) и их смесей. Однако незначительное количество публикаций [1, 2] недостаточно освещают найденные решения и представляют полученные результаты с ИНС для ИВВ, а подобных работ для смесевых взрывчатых веществ (СВВ) нет. Так, в работе [1] отработана методика и разработана ИНС оптимальной структуры (персептрон с 8 нейронами во входном слое, 7 нейронами в одном скрытом слое и одним нейроном в выходном

слое), которая дает прогноз скорости детонации ИВВ с ошибкой в диапазоне 0,9...3,8 % в зависимости от ИВВ, а в работе [2] создана ИНС, которая дает прогноз скорости детонации ИВВ с ошибкой в диапазоне 1,3...2,0 % в зависимости от ВВ. Поэтому возникает необходимость в разработке универсальной методики и исследовании созданной на ее основе оптимальной ИНС для СВВ, которая осуществляет прогноз с более высокой точностью при значительном количестве входных параметров. Как известно, инертные добавки в смесях с ВВ химически полностью участвуют в процессе детонации, благодаря чему возрастает удельный объем газов и давление, вследствие этого возрастает и скорость детонации. Во многих литературных источниках [3-5] накоплен большой материал и имеются данные о жидких инертных добавках, повышающих скорость детонации СВВ.

В связи с вышесказанным, актуальным и перспективным способом решения таких задач является использование современного программного обеспечения для создания универсального вычислительного подхода и разработка оптимальной структуры ИНС, осуществляющей прогноз с более высокой точностью. Они позволяют, основываясь только на эмпирическом опыте, создавать нейросетевые модели, которые способствуют извлечению знаний из данных, определять особенности и активно использовать их для решения конкретных практических задач. Необходимо также отметить, что последние исследования [6] показали возможность создания нейросетевых моделей на ограниченном количестве обучающих примеров (при достаточно высоком уровне точности прогноза).

Таким образом, исследование возможности использования компьютерного моделирования процесса детонации СВВ с различными инертными добавками с помощью современных информационных технологий для получения новых знаний является актуальной задачей, имеющей практический интерес.

## 1. Методика и объект исследования

В ходе исследований проводились следующие работы:

- разработка базы знаний для создания нейросетевых моделей [7];
- разработка нейросетевой модели детонации СВВ на основе гексида [7];
- определение воспроизводимости прогнозируемых результатов оптимизированной модели в программной среде разработки;

- выбор оптимальной модели и проведение вычислительного эксперимента;
- анализ полученных результатов.

Целью данной работы является разработка нейросетевой модели и ее применение для выявления новых зависимостей скорости детонации СВВ от рецептурных и эксплуатационных факторов. Основным объектом исследований является процесс детонации СВВ, а его определяющим эксплуатационным параметром – скорость детонации, от которого зависит эффективность обработки призабойной зоны нефтяного пласта.

Первоначально по экспериментальным данным [7, 8] (9 опытов) создана база знаний в среде *MS Excel* (Табл. 1). Далее в программной среде разработки на их основе создавалась нейросетевая модель и с ее помощью проводился вычислительный эксперимент.

В качестве входных данных выбраны:

- процентное содержание состава СВВ: гексид (X1) и наполнитель (X2);
- природа наполнителя (X3) для выявления степени влияния приняты следующие допущения: воздух – «1», вода – «2», нефть – «3», глинистый раствор – «4»;
- плотность (X4).

Выходным параметром является скорость детонации СВВ (Y). Этот параметр зависит от входных данных (X1...X4).

На основе разработанных и отработанных методик [8, 9] базу знаний, которая делится на обучающую (7 примеров) и тестирующую (2 примера) выборки, помещали в программную среду разработки *NeuroShell*, где разработа-

Табл. 1. База знаний для создания нейросетевых моделей

№ опыта	Смесевое взрывчатое вещество		Природа наполнителя	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Скорость детонации (D), м/с
	Гексид, %	Наполнитель (С), %			
	Входные данные				Выходные данные
	X1	X2	X3	X4	Y
1	100	0	1	0,87	5400
2	65	35	2	1,34	6000
3	78	22	3	1,12	5750
4	60	40	4	1,48	5600
5	100	0	2	0,87	5400
6	85	15	2	1,04	5600
7	65	35	2	1,34	6000
8	100	0	1	1,65	7000
9	95	5	2	1,34	6060

тивалась компьютерная модель на основе ИНС. После чего происходило обучение и тестирование нейронной сети. В результате получена оптимизированная структура ИНС: нейронная сеть с общей регрессией, определено общее количество блоков (слоев) – 3 и количество нейронов в блоках (соответственно: 4; 9; 1), функция активации (сигмоидальная функция), калибровка (с генетическим поиском). В соответствии с количеством входных и выходных данных, количество нейронов в первом слое – 4, в последнем – 1.

После тестирования оптимизированная сеть показала максимальную относительную ошибку – 0,2 %, что подтверждает возможность данной нейросетевой модели с наименьшей погрешностью прогнозировать скорость детонации СВВ на основе гексида. Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) архитектуры нейронной сети с общей регрессией составил 0,9999 для выборки из 9 экспериментов. Разработанная нейросетевая модель учитывает влияние различных наполнителей: воздух, вода, нефть, глинистый раствор (X3).

В ходе разработки нейросетевой модели определена значимость входных параметров для выходного параметра в виде гистограммы (Рис. 1). Как видно из гистограммы, наибольшее влияние оказывает такой параметр, как плотность СВВ (X4), затем природа наполнителя (X3), далее по убыванию: процентное содержание наполнителя (X2), процентное содержание гексида (X1).

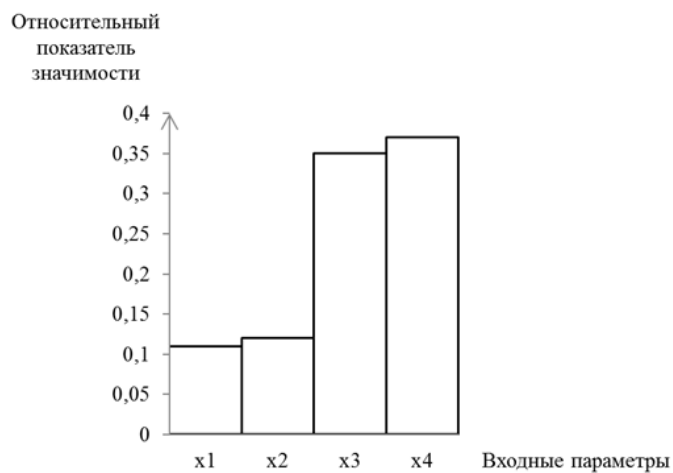


Рис. 1. Гистограмма значимости входных данных

Таким образом, по результатам определения значимости, установлено, что скорость детонации СВВ сильно зависит от плотности и процентного содержания наполнителя, что закономерно и согласуется с литературными данными [10], а также от природы наполнителя.

## 2. Результаты исследования и их обсуждение

Большой интерес представляет изучение влияния показателей значимости входных параметров, полученных с помощью нейросетевой модели, на выходные характеристики для различных выборок и дальнейшее их сравнение. По результатам определения значимости, установлено, что скорость детонации СВВ сильно зависит от его плотности, поэтому целесообразно провести исследования при его использовании в СВВ.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что плотность заряда, имеет большее влияние на выходной параметр, чем рецептура СВВ. Нейросетевая модель подтвердила, что значение плотности заряда СВВ оказывает существенное влияние на его скорость детонации, что закономерно и согласуется с литературными данными [10].

В данной работе с использованием современных компьютерных технологий (в среде *Visual Studio* на языке программирования высокого уровня «C#») на основе разработанного алгоритма (Рис. 2) и нейросетевой модели создан

прикладной программный модуль (Рис. 3), позволяющий решать две задачи: первая – осуществлять прогноз значения скорости детонации при различных соотношениях компонентов смеси, природы наполнителя и плотности заряда (левая часть алгоритма); вторая – найти оптимальное соотношение входных эксплуатационных пара-

метров, при которых достигается максимальное значение скорости детонации СВВ (правая часть алгоритма).

Интерфейс программы (Рис. 3) представляет собой главное окно, в котором находятся поля для ввода данных входных параметров (4 поля) и для вывода результата прогнозирования –

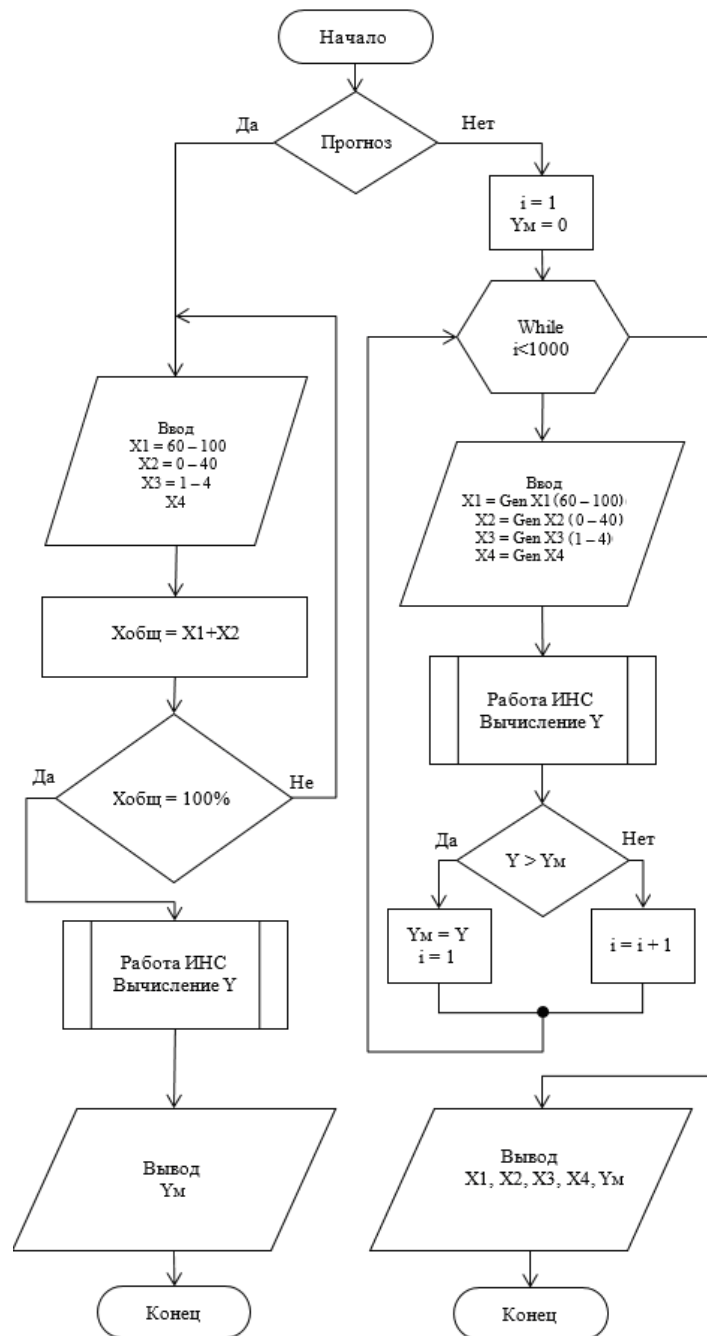


Рис. 2. Блок-схема алгоритма программы

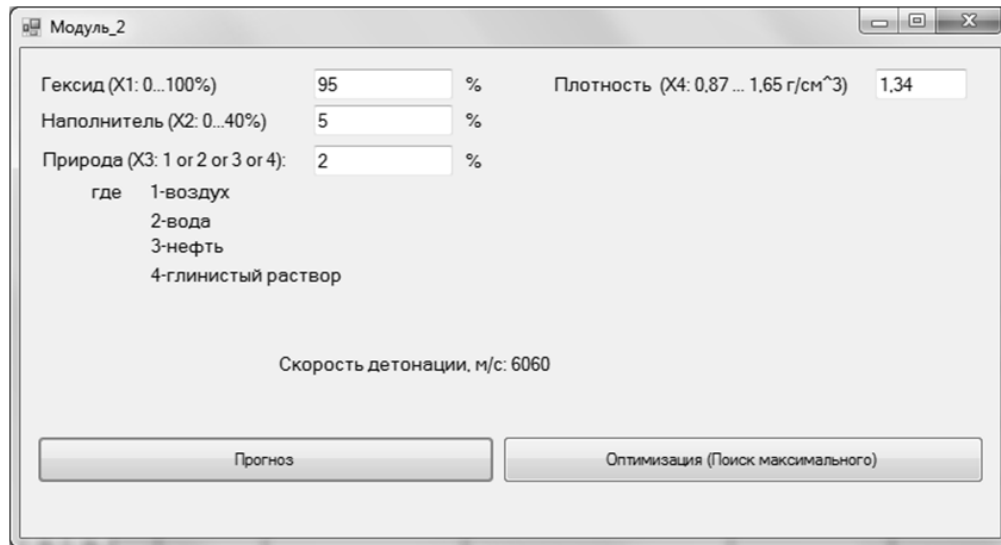


Рис. 3. Интерфейс программы реализации нейросетевой модели

значения выходного параметра (скорость детонации). Нажатием кнопки «ПРОГНОЗ» реализуется левая часть алгоритма блок-схемы. Тестирование программного модуля на основе нейросетевой модели показало, что отклонение от экспериментальных данных на выходе программы не превышает 0,001 %.

Далее на основе разработанного программного модуля и по результатам определения показателя значимости проводился вычислительный эксперимент, т.е. изучалось влияние зависимости скорости детонации,  $D$  м/с, СВВ на основе гексидов от процентного соотношения жидкого наполнителя,  $C$  % (от 0 до 40 %) при разных плотностях и неизменной природе наполнителя – вода (Рис. 4).

Из графика, полученного на основе нейросетевой модели (Рис. 4), видно, что:

- характер зависимостей скорости детонации СВВ при различных значениях плотности от процентного содержания жидкого наполнителя (вода) разный;
- плотность СВВ и количество наполнителя оказывают на зависимость  $D=f(C)$  существенное влияние;
- значение плотности СВВ равное  $1,4 \text{ г/см}^3$  является границей двух зон кардинального изменения характера зависимости;
- в первой зоне при значениях плотности СВВ от  $1,0$  до  $1,4 \text{ г/см}^3$  наблюдается увеличение

скорости детонации СВВ на 8 % в диапазоне содержания жидкого наполнителя от 5 до 25 %;

– во второй зоне при значениях плотности СВВ от  $1,55$  до  $1,65 \text{ г/см}^3$  наблюдается снижение скорости детонации СВВ на 5...16 % в диапазоне содержания жидкого наполнителя от 0 до 25 %.

Изучение влияния зависимости скорости детонации СВВ на основе гексидов от процентного соотношения наполнителя (от 0 до 40 %) при установленном значении плотности и с некоторыми постоянными компонентами состава СВВ на основе разработанного программного модуля и по результатам вычислительного эксперимента найдено оптимальное соотношение входных данных, при которых достигается максимальное значение скорости детонации СВВ (Табл. 2).

Для СВВ на основе гексидов максимальная скорость детонации  $6981,44$  м/с достигается при использовании в рецептуре (без жидкого наполнителя): гексидов – 100 %, при плотности –  $1,65 \text{ г/см}^3$  (Рис. 4).

В работе с использованием разработанного программного модуля (Рис. 5) проведена оптимизация. Нажатие кнопки «Оптимизация (поиск максимального)» позволяет реализовать правую часть алгоритма блок-схемы (Рис. 2) и определить оптимальные значения входных данных, обеспечивающих максимальное значение скорости детонации (Табл. 2).

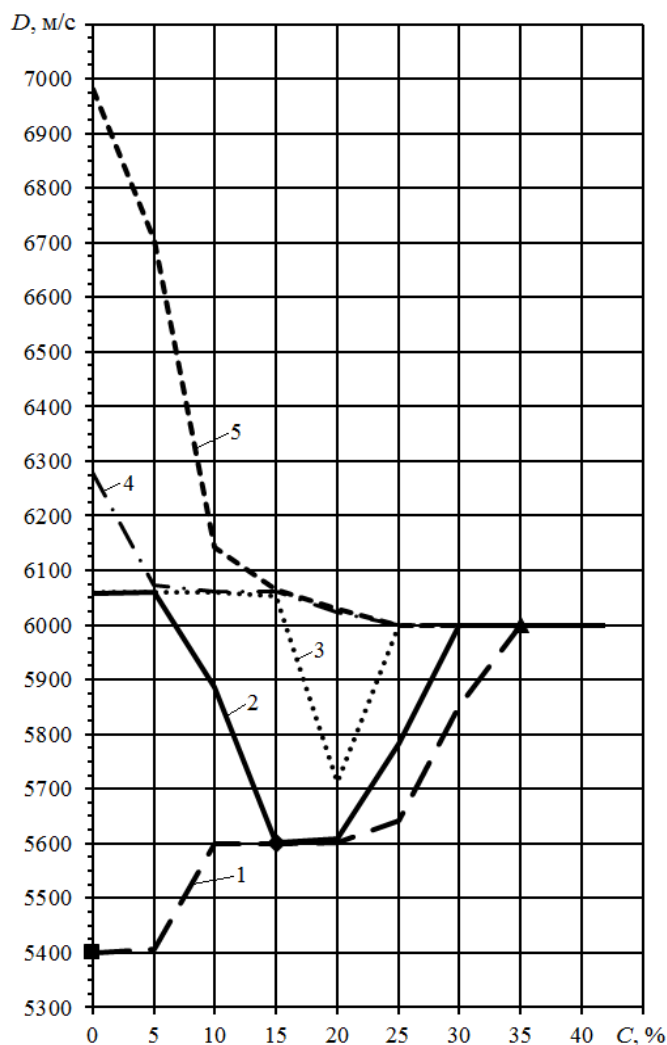


Рис. 4. Зависимость скорости детонации от процентного соотношения наполнителя, полученная на основе нейросетевой модели, при плотностях: 1 – 1,0 г/см<sup>3</sup>; 2 – 1,2 г/см<sup>3</sup>; 3 – 1,4 г/см<sup>3</sup>; 4 – 1,55 г/см<sup>3</sup>; 5 – 1,65 г/см<sup>3</sup>  
 ■, ◆, ▲ – экспериментальные точки, которые соответствуют плотностям 0,87 г/см<sup>3</sup>, 1,04 г/см<sup>3</sup> и 1,34 г/см<sup>3</sup>

Табл. 2. Оптимальные входные данные

Входные данные			Плотность, г/см <sup>3</sup>	Скорость детонации, м/с
X1	X2	X3		
100	0	2	1,65	6981,44
95	5	2	1,65	6704,48
100	0	1	1,65	7000

Оптимизация состава с помощью разработанной программы проходит по следующему алгоритму: в начале каждого цикла программа проводит генерацию значений входных параметров по условию – сумма количественного содержания компонентов в составе равна 100. Выбранные значения обрабатываются нейронной сетью, прогнозируется величина скорости

детонации, которая сравнивается с максимальным значением скорости детонации (на первом цикле оно равно нулю). В случае достижения нового максимума количественное содержание компонентов в составе, при котором он был достигнут, сохраняется. Цикл продолжается пока программа автоматически не переберет все возможные варианты соотношения компо-

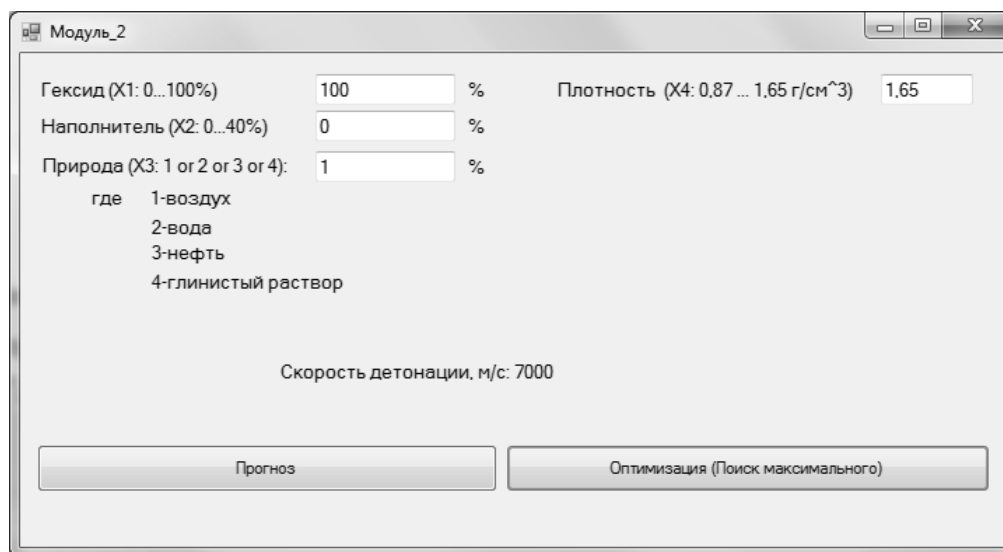


Рис. 5. Окно определения оптимальной рецептуры

нентов СВВ в заданном диапазоне. Результатом работы будет максимальное значение прогнозируемой скорости детонации, которое обеспечивается оптимальным содержанием компонентов в составе.

На основе оптимизации программный модуль определяет оптимальную рецептуру СВВ на основе гексида, обеспечивающую при плотности  $1,65 \text{ г/см}^3$  максимальную скорость детонации  $7000 \text{ м/с}$ .

Следует отметить, что при оптимизации выдается рецептура с максимальной скоростью детонации, что согласуется с найденными оптимальными рецептурами вычислительного эксперимента.

## Заключение

В работе изучена и показана возможность нейросетевого моделирования процесса детонации СВВ с различными инертными наполнителями на основе современных информационных технологий для извлечения новых знаний. С помощью вычислительного эксперимента с разработанной моделью установлены особенности влияния суженного диапазона плотности СВВ ( $1,0 \dots 1,4 \text{ г/см}^3$ ), природы наполнителя и его количества на характер изменения скорости детонации. Предложены оптимальные рецептуры, обеспечивающие максимальную скорость детонации зарядов СВВ.

## Литература

1. Ляшева С.А., Шлеймович М.П., Кирпичников А.П., Спицин А.Н. Прогнозирование скорости детонации индивидуальных взрывчатых веществ с использованием нейронной сети // Вестник Казан. технол. ун-та. - Казань: КНИТУ, 2015. - Т. 18. № 15. - С. 226-229.
2. Передерин Ю.В., Попок Н.И. Количественный анализ и прогнозирование свойств компонентов энергетических конденсированных систем – бризантных взрывчатых веществ // Ползуновский вестник. 2010. № 4-1 С.126-130.
3. Schmidt A. Zschr. Schiess-u. Sprengst, 31, 1936. 114, 149.
4. Апин А.Я. Роль наполнителей при детонации ВВ и порохов. Сб. «Физика взрыва». №2. М.: Издание АН СССР. 1952.
5. Апин. А.Я. О некоторых случаях ослабления действия взрыва Сб. «Физика взрыва». №1. М.: Издание АН СССР. 1952.
6. Мухутдинов А.Р., Ефимов М.Г. Нейросетевой подход для оптимизации состава твердого топлива по скорости горения // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2019. №4. С.25-29.
7. Мухутдинов А.Р., Ефимов М.Г., Клявлилина Л.Р., Кулагин А.А. Изучение влияния свойств наноструктурированных соединений титана на эксплуатационные параметры энергонасыщенных систем с использованием нейросетевых технологий // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2017 – Т.20, № 4. – С. 54-56.
8. Отчет по теме: Исследование действия зарядов ВВ и усовершенствование фугасных торпед для нефтяной промышленности. Казань, КХТИ, 1956.
9. Отчет по теме: Изыскание новых термостойких взрывчатых веществ. Казань, КХТИ, 1959.
10. Покалюхин Н. А. Смесевые энергоемкие материалы: учебно-методическое пособие / Н.А. Покалюхин [и др.]. – Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2008. – 92 с.

**Мухутдинов Аглям Рашидович.** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии твердых химических веществ». Автор более 200 научных работ.

**Ефимов Максим Геннадьевич.** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский научно-исследовательский технологический университет», ассистент кафедры «Технологии твердых химических веществ». Автор более 40 научных работ. E-mail: jero07@bk.ru (Ответственный за переписку).

**Вахидова Зульфия Рашидовна.** Учреждение высшего образования "Университет управления "ТИСБИ" доцент кафедры «Математика». Автор более 100 научных работ.

## Neural Network Simulation of Detonation Process of Hexide Mixture with Inert Fillers

A. R. Mukhutdinov<sup>1</sup>, M. G. Efimov<sup>1</sup>, Z. R. Vakhidova<sup>11</sup>

<sup>1</sup>Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

<sup>11</sup>Institution of higher education "University of Management" TISBI", Kazan, Russia

**Abstract.** In this work, a neural network modeling of the detonation process of a mixed explosive with various inert fillers was carried out on the basis of modern information technologies. Using a computational experiment with the developed neural network model, the features of the influence of the density of the mixed explosive, the nature of the filler and its amount on the nature of the change in the detonation velocity have been established. Optimal formulations have been proposed to ensure the maximum detonation speed.

**Keywords:** artificial neural network, simulation, software module, detonation, mixed explosive, inert fillers.

DOI 10.14357/20718632210408

## References

1. Ljasheva S.A., Shlejmovich M.P., Kirpichnikov A.P., Spicin A.N. Prognozirovanie skorosti detonacii individual'nyh vzryvchatyh veshhestv s ispol'zovaniem nejronnoj seti // Vestnik Kazan. tehnol. un-ta. - Kazan': KNITU, 2015. - T. 18. № 15. - S. 226-229.
2. Perederin Ju.V., Popok N.I. Kolichestvennyj analiz i prognozirovanie svojstv komponentov jenergeticheskikh kondensirovannyh sistem – brizantnyh vzryvchatyh veshhestv // Polzunovskij vestnik. 2010. № 4-1 S.126-130.
3. Schmidt A. Zschr. Schiess-u. Sprengst, 31, 1936. 114, 149.
4. Apin A.Ja. Rol' napolnitelej pri detonacii VV i porohov. Sb. «Fizika vzryva». №2. M.: Izdanie AN SSSR. 1952.
5. Apin. A.Ja. O nekotoryh sluchajah oslabilenija dejstvija vzryva Sb. «Fizika vzryva». №1. M.: Izdanie AN SSSR. 1952.
6. Muhutdinov A.R., Efimov M.G. Nejrosetevoj podhod dlja optimizacii sostava tverdogo topliva po skorosti gorenija // Avtomatizacija, telemehanizacija i svjaz' v neftjanoj promyshlennosti. 2019. №4. S.25-29.
7. Muhutdinov A.R., Efimov M.G., Kljavlina L.R., Kulagin A.A. Izuchenie vlijanija svojstv nanostrukturirovannyh soedinenij titana na jekspluatacionnye parametry jenergonasyshennyh sistem s ispol'zovaniem nejrosetevyh tehnologij // Vestnik Kazan. tehnol. un-ta. – 2017 – T.20, № 4. – S. 54-56.
8. Otchet po teme: Issledovanie dejstvija zarjadov VV i usovershenstvovanie fugasnyh torped dlja neftjanoj promyshlennosti. Kazan', KHTI, 1956.
9. Otchet po teme: Izyskanie novyh termostojkikh vzryvchatyh veshhestv. Kazan', KHTI, 1959.
10. Pokaljuhin N. A. Smesevyje jenergoemkie materialy: uchebno-metodicheskoe posobie / N.A. Pokaljuhin [i dr.]. – Kazan': Izd-vo Kazan. gos. tehnol. un-ta, 2008. – 92 s.

**Mukhutdinov A.R.** Kazan National Research Technological University, doctor Technical Sciences, Professor of the Department "Technologies solid chemical substances". Author of more than 200 scientific papers.

**Efimov M.G.** Kazan National Research Technological University, assistant of the Department "Technologies solid chemical substances". Author of more than 40 scientific papers.

**Vahidova Z.R.** Institution of higher education "University of Management" TISBI "Associate Professor of the Department" Mathematics". Author of more than 100 scientific papers.