



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ СМЕСЕЙ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ

Андреев С.М.<sup>1</sup>, Колокольцев М.В.<sup>2</sup>, Савинов Д.А.<sup>3</sup>, Дубровин В.К.<sup>4</sup>, Петроченко Е.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

<sup>2</sup> Проектная школа «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия

<sup>3</sup> Средняя общеобразовательная школа №5 с углубленным изучением математики, Магнитогорск, Россия

<sup>4</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** Основной целью данной работы является исследование использования моделей искусственной нейронной сети (ИНС) для проверки и прогнозирования прочностных свойств сухих и влажных песчано-глинистых смесей, используемых для формовки в процессах изготовления литых изделий. В качестве основного параметра, выражающего прочностные свойства песчано-глинистых смесей, использовали сопротивление деформации формы. В качестве выбранной структуры ИНС использовали перцептрон с несколькими скрытыми слоями, в качестве метода обучения применяли метод с учителем с использованием экспериментальных данных. Определение синаптических весов производили с использованием базового алгоритма обратного распространения ошибки. Исследовали время обучения и результирующую точность ИНС для предсказания прочностного параметра песчано-глинистых смесей в зависимости от состава смеси, влажности и температуры. В результате исследования была сформирована структура перцептрона нейросетевой модели и определены значения величин синаптических весов. Реализующая разработанную нейросетевую модель программа для ЭВМ позволила выполнить прогнозирование количественного влияния отдельных компонентов сырых и сухих песчано-глинистых смесей на их предел прочности на сжатие, который выражается через сопротивление деформации. Полученные результаты прогнозирования характеристик сравнивались с экспериментально полученными результатами других исследователей. Было установлено, что расчетные прогнозируемые данные по влиянию компонентного состава смеси на сопротивление деформации не противоречат экспериментальным данным. Исследования, проведенные с использованием разработанного программного обеспечения, позволили выполнить оценку прочности формовочных смесей с компонентными составами, которые ранее не исследовались. Это позволит расширить диапазоны оценки возможности образования горячих трещин в отливках.

**Ключевые слова:** песчано-глинистая форма, искусственная нейронная сеть, формовочная смесь, компонентный состав, податливость формы, моделирование напряженного состояния, нейросетевая модель

© Андреев С.М., Колокольцев М.В., Савинов Д.А., Дубровин В.К., Петроченко Е.В., 2023

### Для цитирования

Использование искусственных нейронных сетей для прогнозирования прочностных свойств песчано-глинистых смесей литейных форм / Андреев С.М., Колокольцев М.В., Савинов Д.А., Дубровин В.К., Петроченко Е.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 23-33. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-23-33>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# THE USAGE OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR PREDICTING STRENGTH PROPERTIES OF SAND-CLAY MIXTURES FOR CASTING MOLDS

Andreev S.M.<sup>1</sup>, Kolokoltsev M.V.<sup>2</sup>, Savinov D.A.<sup>3</sup>, Dubrovin V.K.<sup>4</sup>, Petrochenko E.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>2</sup> Project School of Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

<sup>3</sup> General Secondary School No. 5 with Advanced Study of Mathematics, Magnitogorsk, Russia

<sup>4</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** This research is mainly aimed at studying the usage of artificial neural network (ANN) models for testing and predicting strength properties of dry and wet sand-clay mixtures used for molding in manufacturing the cast products. Deformation resistance of the mold was used as the main parameter expressing strength properties of sand-clay mixtures. A perceptron with multiple hidden layers was used as the chosen ANN structure, and a supervised method using experimental data was applied as the training method. Synaptic weights were determined using a basic error backpropagation algorithm. Training time and the resulting accuracy of ANN were studied to predict the strength parameter of sand-clay mixtures depending on the mixture composition, moisture and temperature. The result of the study is a formed structure of the perceptron of the neural network model and determined values of synaptic weights. A computer program, using the developed neural network model, predicted the quantitative effect of individual components of wet and dry sand-clay mixtures on their ultimate compressive strength expressed with deformation resistance. The obtained parameter prediction results were compared with the experimental results received by other researchers. It has been established that the calculated predicted data regarding the effect of a mixture composition on deformation resistance are not in conflict with the experimental data. The studies conducted with the application of the developed software contributed to the assessment of strength of molding sands, having compositions that have not been studied yet. This will expand ranges of assessment of potential hot cracking in castings.

**Keywords:** sand-clay mold, artificial neural network, molding sand, component composition, mold compliance, stress state modeling, neural network model

## For citation

Andreev S.M., Kolokoltsev M.V., Savinov D.A., Dubrovin V.K., Petrochenko E.V. The Usage of Artificial Neural Networks for Predicting Strength Properties of Sand-Clay Mixtures for Casting Molds. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 23-33. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-23-33>

## Введение

При производстве литых изделий с использованием песчаных форм одной из важных характеристик формы является её способность деформироваться в горячем состоянии под действием давления со стороны отливки. Сама же форма воздействует на отливку и при этом деформируется. Способность формы деформироваться (податливость формы) определяет величину возникающих в отливке напряжений, а следовательно, влияет на вероятность разрушения отливки, которое представляет собой образование трещин в теле отливки в процессе её кристаллизации и охлаждения [1]. Такой вид разрушения материала отливки носит название «горячая трещина». Горячие трещины, возникшие внутри отливки и не вышедшие на поверхность, приводят в дальнейшем к снижению прочностных свойств металла [2].

Основным параметром, который влияет на податливость формы, является её компонентный состав, а также распределение влажности по толщине формы, которая возникает за счет движения пара, образовав-

шегося из влаги под действием теплового поля горячей отливки с последующей его конденсацией в холодных слоях формы [3].

Моделирование напряженного состояния литейной формы представлено в работах [4, 5], в которых проводили исследования по влиянию компонентного состава формовочных смесей на их свойства с учетом температуры. Подобные исследования проводились и в работах [6, 7], в которых производились эксперименты по сжатию сырых и сухих формовочных смесей различного компонентного состава и контроль момента их разрушения. Результатом этих работ являлось подтверждение гипотезы по механизму разрушения формовочных смесей при различных состояниях. В работах [7-9], в отличие от предыдущих работ, испытание упругих и упругопластичных свойств образцов формовочной смеси проводилось в условиях, когда боковые поверхности образца были ограничены. Предложенные авторами условия испытаний приближены к реальным условиям работы формы, так как учитывается действие опоки, которая оказывает на форму дополнительное и всестороннее сжатие. Пока-

зано, что из-за этого дополнительного действия опоки на форму прочность смеси формы значительно выше, чем прочность образцов, на которые не оказывалось ограничение боковых поверхностей.

Полученные результаты по прочности смесей [4-9] основываются на экспериментальных исследованиях смеси в разных условиях и при различном приложении нагрузки. Другим направлением исследования является теоретическое представление движения отдельных песчинок в песчано-глинистой форме, связанных между собой упругим материалом [10-14]. Такой подход позволил разделить поведение материала формы при сжатии на периоды [10] и было выделено три периода. В каждый период определялось поведение формы и исследовалось поведение отдельных песчинок в смеси. Первый период характеризуется поведением смеси как пластичного тела, которое легко поддается деформации от приложенного усилия. По мере действия силы сжатия происходит повышение плотности смеси, пустоты удаляются, смесь становится однородной. Отдельные песчинки начинают воздействовать друг на друга своими оболочками из связующего материала и начинается процесс деформации этих оболочек. Этот период характеризуется тем, что смесь ведет себя как вязкоупругое тело. При дальнейшем нагружении материала формы частицы песка начинают непосредственно взаимодействовать друг с другом, начинается их упругая деформация, а затем при превышении предела прочности и разрушение отдельных частиц. Поведение формовочной смеси становится подобным упруговязкопластичному телу, что приводит к проявлению упругих свойств. Описанный подход используется для разработки реологических моделей прогностического поведения формовочных смесей, что позволяет прогнозировать характеристики литейных форм и, соответственно, влиять на оказываемые на отливки напряжения [11].

Однако данный подход не позволяет учитывать в достаточной степени изменение механических и физических свойств формовочной смеси в процессе теплового воздействия на неё горячей отливки. Поэтому сформировался подход, в котором производится исследование процессов деформации формы при непосредственном взаимодействии отливки и формы в условиях, аналогичных условиям процесса литья в формы [12]. Например, в работе [13] описывается способ изучения неупругого перемещения слоев формовочной смеси с использованием лабораторного стенда, который представляет собой специально сконструированную литейную форму, на котором можно изучать неупругое перемещение слоев формовочной смеси. Такой подход позволил определить влияние начальных параметров формовочной смеси (до воздействия отливки) на податливость литейной формы при действии на неё горячей отливки и выразить это влияние значением модуля упругости. Кроме того, предложенная конструкция лабораторного стенда позволила наблюдать перемещение слоев в смеси под влиянием температуры отливки и получить эмпирические зависимости

этого влияния. Схожие исследования проводились авторами работы [14]. С использованием лабораторного стенда с литейной формой определялось численное значение податливости формовочной смеси, выраженное через сопротивление деформации при действии на неё горячей отливки в зависимости от плотности формы, начальной влажности, содержания бентонита и других факторов. Также авторами определялась прочность сырой формовочной смеси при сжатии и взаимосвязь этих параметров. По результатам эксперимента установлено, что взаимосвязь между прочностью и податливостью отсутствует, что не позволяет использовать данные лабораторных испытаний смесей на временное сопротивление сжатию для прогнозирования величины сопротивления деформации смеси.

В результате анализа информационных источников по прогнозированию податливости формы было установлено, что между сопротивлением деформации песчано-глинистых форм и её составом есть функциональная связь. Влажность, компонентный состав и начальная плотность формы являются основными параметрами, влияющими на податливость. Одним из факторов, затрудняющим установление этой связи и, как следствие, использование результатов исследований сопротивления сжатию формовочных смесей является отсутствие равномерного распределения температуры по толщине формы, нагреваемой от горячей отливки. Поэтому актуальной задачей является определение зависимостей, которые бы позволили прогнозировать величину податливости песчано-глинистой смеси в литейной форме в зависимости от компонентного состава, плотности, начальной влажности смеси и температуры отливки.

Для решения задач количественной оценки, в которых на выходную величину прогнозируемого значения параметра оказывает влияние несколько входных параметров, то есть когда требуется решение задачи многомерного анализа, показали хорошую эффективность методы глубокого обучения, в частности искусственные нейронные сети (ИНС). Такой подход к прогнозированию параметров различных материалов применяется в работах многих авторов [15-17].

В настоящем исследовании был использован подход с использованием ИНС для прогнозирования величины сопротивления деформации в зависимости от компонентного состава песчано-глинистых форм с различной начальной влажностью.

Было разработано программное обеспечение, в котором реализован перцептрон и алгоритм обучения ИНС. Обучение ИНС было произведено на наборе экспериментальных данных, в которых в качестве входных параметров использовали значения содержания компонентов, таких как каолиновая и бентонитовая глина, а также величин плотности и влажности смеси. Для сырых смесей использовали в качестве входного параметра величину уплотнения смеси, а для сухих – величину деформации смеси. Выходным прогнозируемым параметром является сопротивление деформации смеси.

## Используемые экспериментальные данные

Методика эксперимента, а также полученные экспериментальные данные по пределу прочности при сжатии сырых и сухих формовочных смесей приведены в работах [18-22].

Для сырых формовочных смесей проводили полный факторный эксперимент, в котором варьировался компонентный состав формовочных смесей и определялась деформационная способность слоя ПГС. Для сырых форм варьировали следующие параметры: процентное содержание связующих компонентов (бентонитовые и каолиновые глины) – 0, 5, 10%; влажность – 0, 2, 6, 10%; статическое нагружение 0-45 кН. В качестве наполнителя использовали кварцевый песок марки 1К202 (ГОСТ 2138-91). Для влажных формовочных смесей в ходе эксперимента для разных составов смесей контролировали начальный размер образцов и их начальную плотность  $\rho_{\text{вл}}$ .

Для сухих формовочных смесей проводился полный факторный эксперимент, в котором исследовали влияние компонентного состава и температурных условий нагружения на слой сухой ПГС. В процессе эксперимента варьировались следующие параметры: процентное содержание связующих компонентов – 0, 5, 10%; начальная влажность – 0, 2, 6, 10%; статическое нагружение на образец – 0-45 кН. Образцы сушили при температуре 250-300°C, охлаждали до 20°C и повторно нагревали до температуры 300, 600 и 900°C. В отличие от исследования сырых образцов смесей, для достаточной равномерности распределения температурного поля по сечению образца была уменьшена площадь его поперечного сечения.

Для определения деформационной способности материала форм испытываемые образцы подвергали статическому нагружению. Для этого смесь сжималась в обойме пуансоном и определялась величина статического нагружения до осадки, равной 10% от первоначальной высоты. Обойма позволяла исследовать образцы смесей как при полном отсутствии связующего, так и при влажности, превышающей 6%. При этом контролировали характеристику в координатах «усилие нагружения – изменение высоты образца». Затем

производили пересчет полученной характеристики в координаты «усилие – относительная деформация». С целью исключения взаимовлияния двух факторов – плотности и влажности – производился пересчет плотности без учета влажности.

## Искусственная нейронная сеть

Искусственные нейронные сети (ИНС) используются для решения нелинейных сложных задач, в результате которых на основе работы алгоритма обучения определяется взаимосвязь между выходным и входными параметрами. В своей основе ИНС являются адаптивными экспериментально-статистическими моделями, в которых объект исследования представляется «черным ящиком», то есть процессом, о котором известны только входные и выходные параметры при полном отсутствии информации о внутренних взаимных связях между ними [22, 23].

Обучение нейронной сети заключается в выборе величины синаптических весов, характеризующих связь между нейронами таким образом, чтобы формируемые нейронной сетью выходные значения параметра, полученные расчетным путем, были наиболее близки к экспериментальным значениям. То есть при выборе синаптических весов необходимо стремиться к тому, чтобы нейронная сеть выдавала бы такие же результаты, которые были получены при проведении эксперимента. Оптимальные синаптические веса определяют функцию связи между выходным и входными переменными в нейросетевой модели.

В этом исследовании использовали персептрон, представляющий полносвязанную ИНС прямого распространения. На рис. 1 приведена структура персептрона, используемая для формирования модели. Число входов персептрона соответствует числу варьируемых параметров модели. Выходное значение персептрона, являющееся выходом нейросетевой модели, представляет собой величину сопротивления деформации исследуемой формовочной смеси. Кружками показаны нейроны слоев, а стрелочками – связи между ними с указанием направления распространения сигнала.

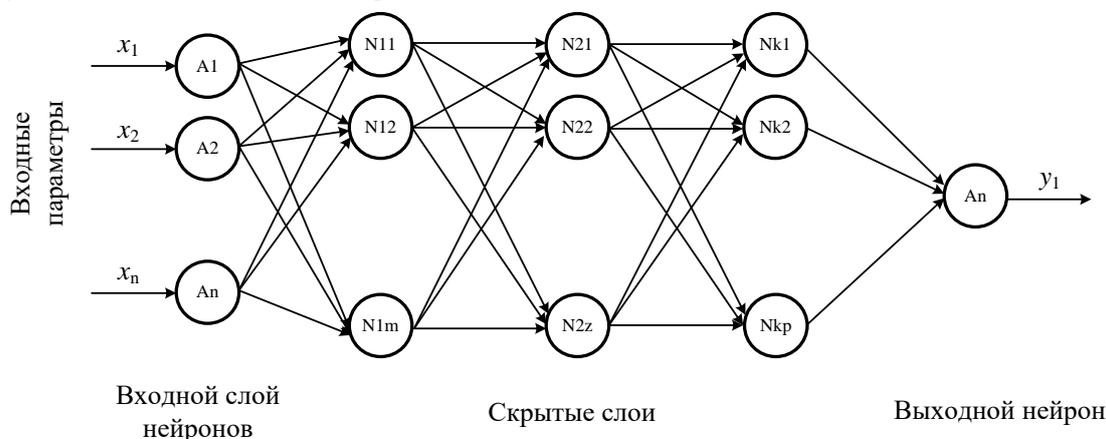


Рис. 1. Структура полносвязанной ИНС прямого распространения со скрытыми слоями

Fig. 1. Structure of a fully connected direct propagation ANN with hidden layers

В работе выполнено исследование по выбору числа скрытых слоев и числу нейронов в скрытом слое. Выбраны такие значения, которые позволяли наилучшим образом предсказать значения величины степени деформации с минимальной ошибкой.

Во входном слое ИНС производится нормирование входных сигналов  $x_i$  в диапазоне 0,1-0,9 в соответствии с выражением:

$$X_i = 0,1 + 0,8(x_i - X_{\min i})(X_{\max i} - X_{\min i}), \quad (1)$$

где  $X_{\min i}$ ,  $X_{\max i}$  – минимальное и максимальное значения  $i$ -го параметра во входном слое для всех значений исходных данных соответственно, техн. ед;  $x_i$  – варьируемый параметр модели, техн. ед.

В нейронах скрытого и выходного слоя производится функциональное преобразование сигнала. Структурная схема нейрона скрытого слоя показана на рис. 2.

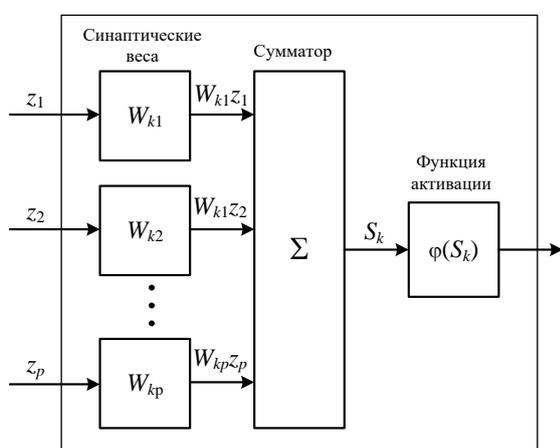


Рис. 2. Функциональная модель нейрона  
Fig. 2. A functional model of a neuron

Входные значения сигналов  $z_i$  формируются в предыдущем (или во входном) слое нейронов. Каждый входной сигнал  $z_i$  масштабируется на величину синаптического веса  $W_{ki}$  и затем сигналы складываются в сумматоре. Выходной сигнал сумматора для  $k$ -го нейрона формируется в соответствии с выражением

$$S_k = \sum_{i=1}^p W_{ki} z_p. \quad (2)$$

Значение  $S_k$  с выхода сумматора подается на блок активационной функции, в котором происходит активация нейрона. В качестве активационной функции использовалась сигмоидальная функция вида

$$\varphi(S_k) = \frac{1}{1 + e^{-S_k}}. \quad (3)$$

Выходной сигнал нейрона передается на вход нейронов следующего слоя. Последним нейроном в этой последовательности вычислений является вы-

ходной нейрон. Кроме функции активации в выходном слое реализуется функция масштабирования сигнала на такую же величину, которая была использована при масштабировании экспериментальных значений величины относительной деформации в соответствии с выражением

$$y_1 = 1,25(Y_1 - 0,1)(Y_{\max} - Y_{\min}) + Y_{\min}, \quad (4)$$

где  $Y_{\min}$ ,  $Y_{\max}$  – минимальное и максимальное значения выходного параметра модели;  $Y_1$  – варьируемый параметр модели в диапазоне 0,1-0,9.

Диапазон варьируемого параметра (входного и выходного) был выбран от 0,1 до 0,9, чтобы избежать насыщения активационной функции нейрона.

В табл. 1 и 2 приведены значения параметров ИНС и диапазоны их изменения для прогнозирования свойств сухих и сырых формовочных смесей.

Таблица 1. Входные X и выходной y параметры ИНС для модели свойств сухой формовочной смеси

Table 1. Input X and output y parameters of ANN for the dry sand property model

Обозначение параметра	Параметр	Минимум	Максимум
$x_1$	Деформация, %	0,0	10,0
$x_2$	Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,3	1,6
$x_3$	Влажность, %	2,0	20,0
$x_4$	Бентонит, %	0,0	6,0
$x_5$	Каолин, %	0,0	6,0
$x_6$	Температура, °С	20,0	900,0
y	Сопротивление деформации, МПа	0,0	65,0

Таблица 2. Входные X и выходной y параметры ИНС для модели свойств сырой формовочной смеси

Table 2. Input X and output y parameters of ANN for the wet sand property model

Обозначение параметра	Параметр	Минимум	Максимум
$x_1$	Уплотнение, %	0,0	10,0
$x_2$	Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,3	1,6
$x_3$	Влажность, %	2,0	20,0
$x_4$	Бентонит, %	0,0	10,0
$x_5$	Каолин, %	0,0	10,0
y	Сопротивление деформации, МПа	0,0	16,0

Значение величин синаптических весов определяется в результате обучения ИНС на экспериментальных данных. Для обучения ИНС использовался алгоритм обратного распространения ошибки, в котором информация от входов ИНС к скрытому слою, а затем к выходу обрабатывается в прямом направлении, а затем производится обратное вычисление синаптических весов начиная с выходного нейрона, причем так, чтобы расчетные значения элементов выходного век-

тора слоя  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_p)$  были бы максимально близки к целевым выходным значениям  $T = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p)$ , полученным из экспериментальных данных. Для определения величины отклонения вектора  $Y$  от вектора  $T$  используется функция квадрата ошибки следующего вида:

$$\varepsilon = \sum_p \sum_k (y_i - \theta_i)^2, \quad (5)$$

где  $y_i$  – элемент выходного вектора  $Y$  ИНС;  $\theta_i$  – элемент целевого выходного вектора  $T$ , полученного из экспериментальных данных.

Метод обратного распространения ошибки формирует величину градиента синаптических весов, который используется для изменения его величины в  $n$ -й эпохе обучения в соответствии с выражением

$$W_{ij}(n) = -\delta \frac{\partial \varepsilon}{\partial W_{ij}} + \alpha W_{ij}(n-1), \quad (6)$$

где  $\delta$  – безразмерная величина скорости обучения, которая выбирается таким образом, чтобы процесс обучения был бы устойчивым и не останавливался при попадании в локальные минимумы;  $\alpha$  – весовой коэффициент величины приращения синаптического веса за шаг.

Представленная модель ИНС с алгоритмом обратного распространения ошибки реализована на языке Pascal в среде разработки Borland Delphi 7.0.

### Вычислительный эксперимент и результаты

Данные, полученные в результате экспериментов, были разбиты на 2 группы: обучающая выборка – 90% всех данных и тестовая выборка – 10% от всех данных. Модель ИНС формировалась с различным числом скрытых слоев (от 1 до 3) и различным числом нейронов в скрытом слое (от 10 до 100).

Из обучающей выборки входные данные (вектор  $X$ ) последовательно подавались на входы ИНС и производился запуск алгоритма обратного распространения ошибки для выбора коэффициентов синаптических

весов  $W_{kp}$ . Однократная подстановка всех данных обучающей выборки заканчивала эпоху обучения. После этого цикл обучения повторялся. Обучение прекращалось, когда интегральный показатель ошибки обучения после окончания эпохи обучения не отличался более чем на 2% от интегрального показателя ошибки, полученной в предыдущей эпохе обучения. Интегральный показатель ошибки определялся как сумма квадратов отклонений расчетного значения  $Y_{расч}$  от экспериментального значения  $Y_{экс}$ .

Для проверки качества обучения ИНС использовалась тестовая выборка, для которой определялись статистические показатели адекватности полученной модели ИНС с использованием критерия Фишера путем сравнения расчетной величины критерия  $F_p$  с критической  $F_k$ .

В результате проведенного вычислительного эксперимента были получены такие параметры ИНС (число скрытых слоев и число нейронов в скрытом слое), которые привели к наилучшему результату. Результаты исследований по выбору параметров нейросетевой модели по прогнозированию сопротивления деформации слоя формовочной смеси приведены в табл. 3.

Разработанную программу моделирования использовали для определения влияния различных факторов на сопротивление деформации слоя сырой и сухой формовочной смеси. При моделировании характеристик сырой ПГФ (рис. 3) величину влажности смеси при формовке принимали равной 5%, плотность 1,5 т/м<sup>3</sup>, содержание каолиновой глины 5%, а бентонитовой глины 3%. При анализе влияния связующих компонентов они рассматривались отдельно (рис. 3, б).

Установлено, что начальная плотность смеси влияет на сопротивление деформации сырой песчано-глинистой формы: чем выше начальная плотность, тем выше возникающие напряжения в слое смеси (рис. 3, в).

Определено неоднозначное влияние начальной влажности смеси на сопротивление деформации (рис. 3, а).

Таблица 3. Итоговые параметры нейросетевых моделей по прогнозированию сопротивления деформации слоя формовочной смеси

Table 3. Final parameters of neural network models for predicting deformation resistance of a sand layer

Характеристика	Количество нейронов в слое			Число эпох обучения	Объем тестовой выборки	Корреляционное отношение	Оценка адекватности
	1	2	3				
Сопротивление деформации слоя сухой ПГФ $\sigma$ , МПа	95	47	31	108	717	0,997	$F_p < F_k$ 1,035 < 1,358
Сопротивление деформации слоя сырой ПГФ $\sigma$ , МПа	51	–	–	12	121	0,9967	$F_p < F_k$ 1,006 < 1,358

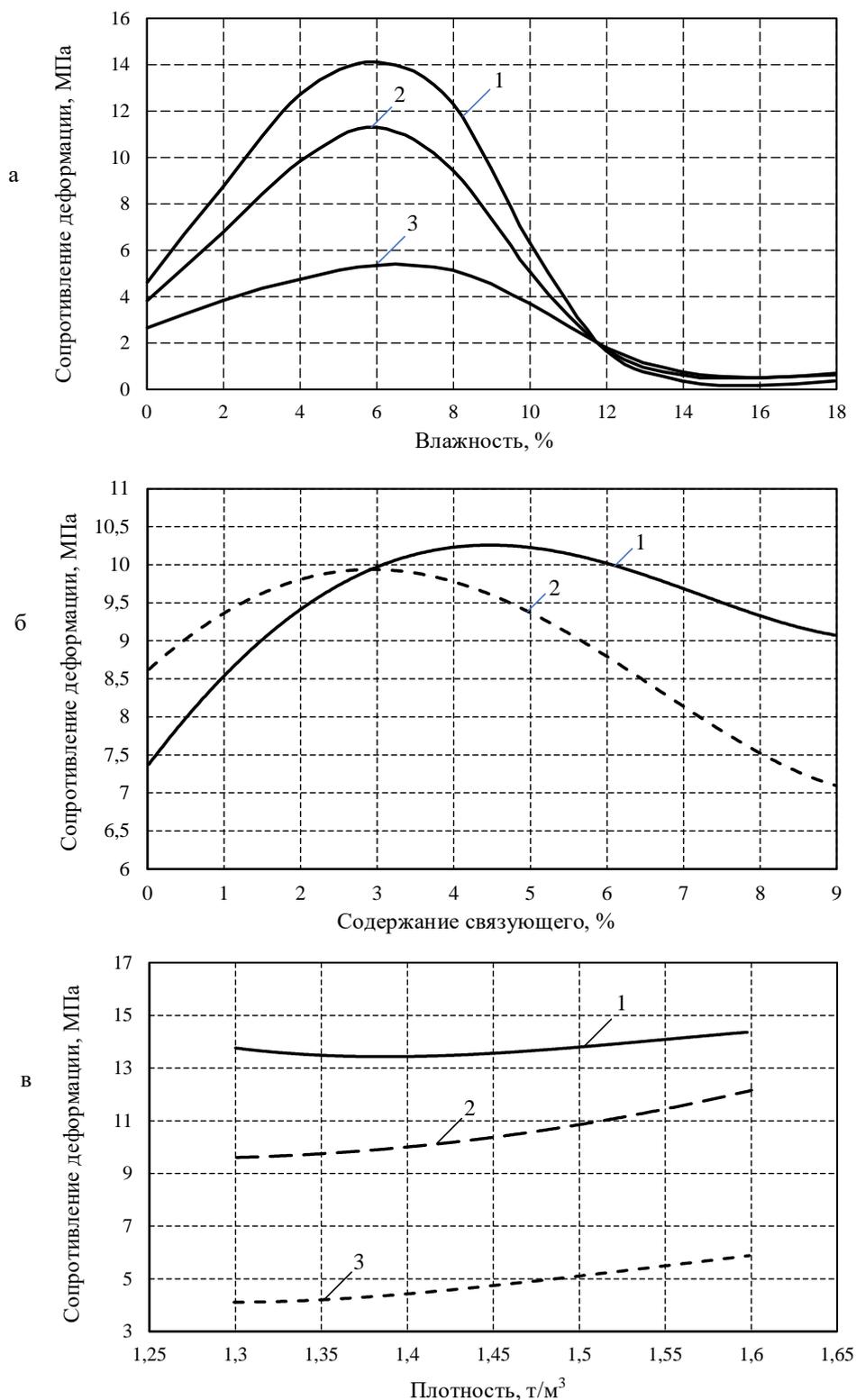


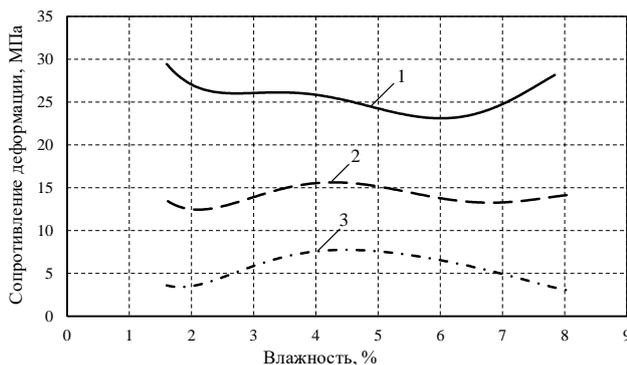
Рис. 3. Расчетные зависимости сопротивления деформации сырых песчано-глинистых смесей от: а – влажности (1 при деформации 9%, 2 – 6%, 3 – 3%); б – содержания связующего (1 – бентонитовая глина, 2 – каолиновая глина); в – плотности  $\rho_{\text{сух}}$  (1 – при деформации 9%, 2 – 6%, 3 – 3%)

Fig. 3. Calculated dependences between deformation resistance of wet sand-clay mixtures and: а is moisture (1 is at a deformation of 9%; 2 is 6%; 3 is 3%); б is binder content (1 is bentonite clay; 2 is kaolin clay); в is density  $\rho_{\text{dry}}$  (1 is at a deformation of 9%; 2 is 6%; 3 is 3%)

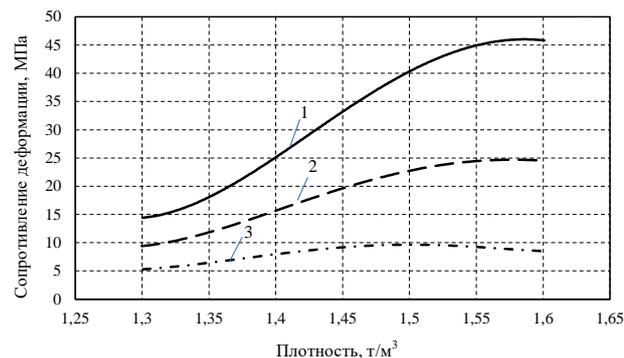
При значениях влажности до 4-6% сопротивление деформации значительно увеличивается при увеличении начальной влажности. Это объясняется тем, что связующие компоненты набирают прочность. При дальнейшем увеличении влажности до 14% наблюдается снижение величины деформации смеси, и при больших значениях влажности снижается практически до нуля. Обратный процесс наблюдается при изменении содержания связующих компонентов в смеси. При увеличении процентного содержания связующих происходит усвоение достаточной влаги и набора прочности, что приводит к увеличению величины сопротивления деформации (см. рис. 3, б). Когда связующего становится больше, чем доступной влаги, требуемой для набора прочности, прочность смеси начинает уменьшаться.

При исследовании сухих песчано-глинистых форм задавались следующими параметрами смеси при формовке. Величину влажности смеси принимали равной 5%, плотность смеси 1,4 т/м<sup>3</sup>, температура 400°C, содержания каолиновой глины 5%, содержание бентонитовой глины 3%. Аналогично исследованиям сырых смесей при анализе влияния связующих компонентов они рассматривались отдельно, например как показано влияние на рис. 4, б.

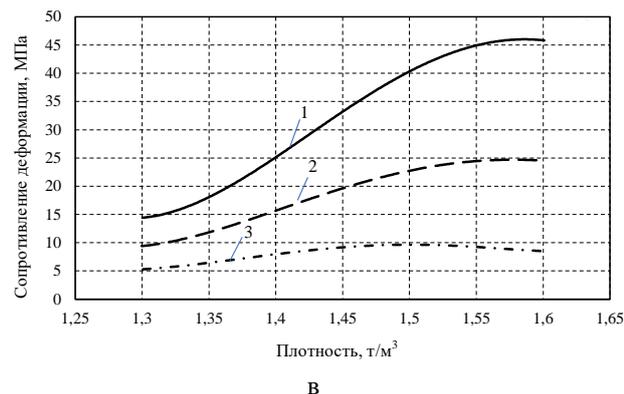
Эксперимент с сухой смесью позволил определить



а



б

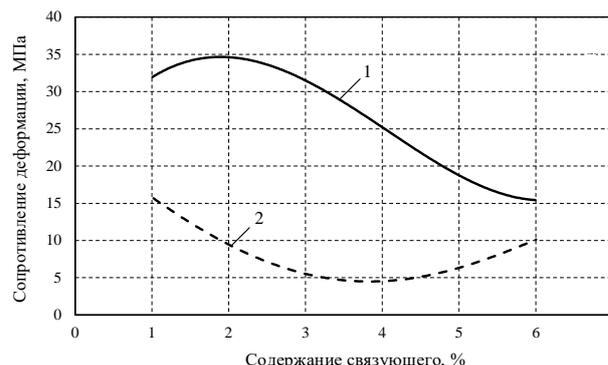


в

влияние температуры смеси ПГФ (рис. 4, г). Исследования показали, что увеличение температуры приводит к увеличению сопротивления деформации смеси. Аналогичное влияние оказывает и увеличение плотности песчано-глинистой формы (рис. 4, в).

Влияние содержания каолиновой глины носит существенно нелинейный характер. Как видно из полученных результатов (рис. 4, б), до содержания 2% происходит увеличение сопротивления деформации формовочной смеси, а при превышении этого порога – снижение. Причиной такого явления, так же как и для сырых форм, является недостаточное количество влаги в смеси для набора прочности большого количества связующего. Увеличение же количества бентонитовой глины в сухой форме, напротив, увеличивает податливость смеси, и только после превышения порога по её содержанию более 4% эффект повышения податливости (и снижение величины сопротивления деформации) перестает наблюдаться и происходит небольшое повышение прочности.

Полученные данные не противоречат физическому смыслу поведения изучаемого объекта, а также экспериментальным данным других исследователей [3-12], что может являться косвенным подтверждением адекватности полученной модели.



г

Рис. 4. Расчетные зависимости сопротивления деформации сухих песчано-глинистых смесей от: а – влажности при формовке (1 – осадка 9%, 2 – 6%, 3 – 3%); б – содержания связующего (1 – каолиновая глина, 2 – бентонитовая глина); в – плотности (1 – осадка 9%, 2 – 6%, 3 – 3%); г – температуры (1 – осадка 9%, 2 – 6%, 3 – 3%)

Fig. 4. Calculated dependences between deformation resistance of dry sand-clay mixtures and: a is moisture during molding (1 is a 9% sediment; 2 is 6%; 3 is 3%); б is binder content (1 is kaolin clay; 2 is bentonite clay); в is density (1 is a 9% sediment; 2 is 6%; 3 is 3%); г is temperature (1 is a 9% sediment; 2 is 6%; 3 is 3%)

### Заключение

Подход с использованием нейросетевой модели был успешно применен для прогнозирования прочностных свойств песчано-глинистых смесей, в частности сопротивления деформации сухих и сырых ПГФ. Сравнение результатов с экспериментальными данными показало хорошую адекватность полученной модели. Кроме того, полученные результаты согласуются с экспериментальными наблюдениями других исследователей. В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что ИНС являются полезным инструментом для определения влияния множества параметров на прочностные свойства песчано-глинистых смесей, а учитывая большой объем накопленных в отрасли экспериментальных данных по характеристикам ПГФ, могут быть успешно применены и для прогнозирования других параметров.

### Список источников

1. Бехалов В.Н. Механические свойства литейной формы при уплотнении прессованием // Литейное производство. 1965. №4. С. 18-21.
2. Смеляков Н.Н., Косариков Н.Ф. Исправление пороков отливок. М.: Машгиз, 1950. 120 с.
3. Савинов А.С., Тубольцева А.С. Расчет движения фронта влажности в сырой песчано-глинистой форме // Вестник Магнитогорского государственного университета им. Г.И. Носова. 2010. №2. С. 30-33.
4. Савинов А.С. Методологические основы оценки и прогнозирования напряженно-деформированного состояния системы «отливка – форма» для предупреждения образования горячих трещин в фасонных отливках: дис. ... д-ра техн. наук. Магнитогорск, 2016. 382 с.
5. Математическое моделирование напряженно-деформируемого состояния оболочковых форм при литье по выплавляемым моделям: монография / А.И. Евстигнеев, В.И. Одинокоев, В.В. Петров, Э.А. Дмитриев. Владивосток: Дальнаука, 2009. 130 с.
6. Великанов Г.Ф., Примак И.Н., Бречко А.А. Прочность формовочных смесей // Литейное производство. 1986. №3. С. 10-13.
7. Мутилов В.П. Упругие свойства формовочной смеси // Литейное производство. 1974. №1. С. 30-31.
8. Матвеев И.В., Иванов Е.И., Резчиков Е.А. Реологические испытания формовочных смесей // Формовочные смеси. 1977. №12. С. 11-14.
9. Матвеев И.В., Иванов Е.И., Резчиков Е.А. Деформационные свойства формовочных смесей при сложном напряженном состоянии // Литейное производство. 1977. №10. С. 17-18.
10. Карпенко В.М., Филипенко Е.В. Разработка экспериментального устройства для испытания деформационных свойств формовочной смеси // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Серия: Машиностроение. 2010. №58. С. 129-133.
11. Моделирование реологических свойств формовочных смесей / В.П. Авдокушин, С.П. Дорошенко, Е.А. Сургучев и др. // Литейное производство. 1979. №8. С. 13-14.
12. Изменение податливости сырой песчано-глинистой формы под воздействием геометрических и теплофизических свойств отливки / В.М. Колокольцев, А.С. Савинов, Н.А. Феоктистов, А.С. Постникова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. №10. С. 829-835. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-829-835
13. Баландин Г.Ф., Степанов Ю.А. О силовом взаимодействии затвердевающей отливки и формы // Литейное производство. 1962. №4. С. 37-41.
14. Аксенов П.Н., Трухов А.П. Прибор для испытания сырых формовочных смесей на горячую податливость // Литейное производство. 1979. №3. С. 20-21.
15. Lin C-J, Wu N-J. An ANN Model for Predicting the Compressive Strength of Concrete // Applied Sciences. 2021, vol. 11, no. 9, pp. 3798.
16. Predicting the compressive strength of ground granulated blast furnace slag concrete using artificial neural network / C. Bilim, C.D. Atiş, H. Tanyildizi, O. Karahan // Advances in Engineering Software. 2009, vol. 40, no. 5, pp. 334-340.
17. Artificial neural network (ANN) prediction of compressive strength of VARTM processed polymer composites / A. Seyhan, G. Tayfur, M. Karakurt, M. Tanog // Computational Materials Science. 2005, vol. 1, no. 34, pp. 99-105.
18. Савинов А.С., Тубольцева А.С., Сеницкий Е.В. Исследование деформационной способности песчано-глинистых смесей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №1. С. 29-32.
19. Савинов А.С., Тубольцева А.С. Расчет податливости сырой песчано-глинистой формы // Инновационные технологии в обеспечении качества, энергоэффективности и экологической безопасности. Повышение конкурентоспособности металлургических и машиностроительных предприятий в современных условиях. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2010. С. 176-179.
20. Савинов А.С., Тубольцева А.С. Моделирование деформационной способности сухой песчано-глинистой формы // Прогрессивные технологии в современном машиностроении: сб. ст. VI Междунар. науч.-техн. конф. Пенза: Приволжский дом знаний, 2010. С. 66-70.
21. Моделирование напряженного состояния сырых песчано-глинистых литейных форм / А.С. Савинов, В.П. Дзюба, К.А. Фролушкина, Р.М. Байбатыров; ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова». Магнитогорск, 2012. 10 с. Деп. в ВИНТИ 11.03.2012. №82. В2012.
22. Исследование физических свойств сухих песчано-глинистых литейных форм // А.С. Савинов, А.С.

Тубольцева, В.П. Дзюба, К.А. Фролушкина; ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова». Магнитогорск, 2012. 41 с. Деп. в ВИНТИ 11.03.2012. №81. В2012.

23. Адаптивные статистические модели, синтезированные на основе ИНС / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.Г. Обухова и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. №4(40). С. 68-71.
24. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс: пер. с англ., 2-е изд.: М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.

### References

1. Bekhalov V.N. Mechanical properties of the casting mold during compaction by pressing. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry Production]. 1965;(4):18-21. (In Russ.)
2. Smelyakov N.N., Kosarikov N.F. *Ispravlenie porokov otlivok* [Correction of defects in castings]. Moscow: Mashgiz, 1950, 120 p. (In Russ.)
3. Savinov A.S., Tuboltseva A.S. Calculation of the movement of the moisture front edge in a wet sand-clay mold. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2010;(2):30-33. (In Russ.)
4. Savinov A.S. *Metodologicheskie osnovy otsenki i prognozirovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya sistemy «otlivka – forma» dlya preduprezhdeniya obrazovaniya goryachikh treshchin v fasonnykh otlivkakh: dis. ... dokt. tekhn. nauk* [A methodological framework for assessing and predicting the stress and strain state of the “casting – mold” system to prevent hot cracking in shaped castings. Doctoral dissertation]. Magnitogorsk, 2016. 382 p.
5. Evstigneev A.I., Odinkov V.I., Petrov V.V., Dmitriev E.A. *Matematicheskoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya obolochkovykh form pri lite po vyplavlyаемым modelyam: monografiya* [Mathematical modeling of the stress and strain state of shell molds during investment casting: monograph]. Vladivostok: Dalnauka, 2009, 130 p. (In Russ.)
6. Velikanov G.F., Primak I.N., Brechko A.A. Strength of molding sands. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry Production]. 1986;(3):10-13. (In Russ.)
7. Mutilov V.P. Elastic properties of molding sands. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry Production]. 1974;(1):30-31. (In Russ.)
8. Matveenko I.V., Ivanov E.I., Rezchikov E.A. Rheological tests of molding sands. *Formovochnye smesi* [Molding Sands]. 1977;(12):11-14. (In Russ.)
9. Matveenko I.V., Ivanov E.I., Rezchikov E.A. Deformation properties of molding sands under complex stress state. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry Production]. 1977;(10):17-18. (In Russ.)
10. Karpenko V.M., Filipenko E.V. Development of an experimental device for testing the deformation prop-

erties of the molding sand. *Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta Ukrainy "Kievsky politekhnicheskyy institut. Seriya: Mashinostroenie* [Bulletin of National Technical University of Ukraine Kyiv Polytechnic Institute. Series: Mechanical Engineering]. 2010;(58):129-133. (In Russ.)

11. Avdokushin V.P., Doroshenko S.P., Surguchev E.A. et al. Modeling of rheological properties of molding sands. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry Production]. 1979;(8):13-14. (In Russ.)
12. Kolokoltsev V.M., Savinov A.S., Feoktistov N.A., Postnikova A.S. Change in ductility of a wet sand-clay mold under influence of geometric and thermophysical properties of the casting. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2020;63(10):829-835. (In Russ.) DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-829-835
13. Balandin G.F., Stepanov Yu.A. On the force interaction of a hardening casting and a mold. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry Production]. 1962;(4):37-41. (In Russ.)
14. Aksenov P.N., Trukhov A.P. A device for testing wet molding sands for hot compliance. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry Production]. 1979;(3):20-21. (In Russ.)
15. Lin C.-J., Wu N.-J. An ANN model for predicting the compressive strength of concrete. *Applied Sciences*. 2021;11(9):3798.
16. Bilim C., Atiş C.D., Tanyildizi H., Karahan O. Predicting the compressive strength of ground granulated blast furnace slag concrete using artificial neural network. *Advances in Engineering Software*. 2009;40(5):334-340.
17. Seyhan A., Tayfur G., Karakurt M., Tanog M. Artificial neural network (ANN) prediction of compressive strength of VARTM processed polymer composites. *Computational Materials Science*. 2005;1(34):99-105.
18. Savinov A.S., Tuboltseva A.S., Sinitzky E.V. Study on the deformation capacity of sand-clay mixtures. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2011;(1):29-32. (In Russ.)
19. Savinov A.S., Tuboltseva A.S. Calculation of the compliance of a wet sand-clay mold. *Innovatsionnye tekhnologii v obespechenii kachestva, energoeffektivnosti i ekologicheskoy bezopasnosti. Povyshenie konkurentnosposobnosti metallurgicheskikh i mashinostroitelnykh predpriyatii v sovremennykh usloviyakh* [Innovative Technologies in Ensuring Quality, Energy Efficiency and Environmental Safety. Increasing Competitiveness of Metallurgical and Machine-Building Enterprises in Current Conditions]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2010, pp. 176-179. (In Russ.)
20. Savinov A.S., Tuboltseva A.S. Simulation of deformation ability of dry sand-clay molds. *Progressivnyye tekhnologii v sovremennom mashinostroenii* [Progressive Technologies in Modern Mechanical Engineering: Collected Papers of the 6<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference]. Penza: Privolzhsky dom znaniy, 2010, pp. 66-70. (In Russ.)

21. Savinov A.S., Dziuba V.P., Frolushkina K.A., Baibaturov R.M. *Modelirovanie napryazhennogo sostoyaniya syrykh peschano-glinistykh liteynykh form* [Modeling of the stress state of wet sand-clay casting molds]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, 10 p. (In Russ.)
22. Savinov A.S., Tuboltseva A.S., Dziuba V.P., Frolushkina K.A. *Issledovanie fizicheskikh svoystv sukhikh peschano-glinistykh liteynykh form* [Study on the physical properties of dry sand-clay casting molds]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2012, 41 p. (In Russ.)
23. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Obukhova T.G. et al. Adaptive statistical models synthesized on the basis of artificial neural networks. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2012;4(40):68-71. (In Russ.)
24. Haykin S. *Neironnye seti: polny kurs* [Neural networks: A comprehensive foundation]. Moscow: Williams Publishing House, 2006, 1104 p. (In Russ.)

Поступила 05.06.2023; принята к публикации 29.06.2023; опубликована 25.12.2023  
Submitted 05/06/2023; revised 29/06/2023; published 25/12/2023

**Андреев Сергей Михайлович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия. Email: andreev.acs@gmail.com. ORCID 0000-0003-0735-6723

**Колокольцев Михаил Валерьевич** – обучающийся проектной школы «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Email: mishakokolokol@mail.ru.

**Савинов Дмитрий Александрович** – обучающийся МОУ «СОШ №5 с углубленным изучением математики», Магнитогорск, Россия. Email: savinov\_es@mail.ru.

**Дубровин Виталий Константинович** – доктор технических наук, доцент кафедры пирометаллургических и литейных технологий, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. Email: dubrovinvk@susu.ru.

**Петроченко Елена Васильевна** – доктор технических наук, профессор кафедры литейных процессов и материаловедения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

**Sergey M. Andreev** – DrSc (Eng.), Head of the Department of Automated Control Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: andreev.acs@gmail.com. ORCID 0000-0003-0735-6723

**Mikhail V. Kolokoltsev** – student of NMSTU Project School, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Email: mishakokolokol@mail.ru.

**Dmitry A. Savinov** – student of Secondary School No. 5, Magnitogorsk, Russia. Email: savinov\_es@mail.ru.

**Vitaly K. Dubrovin** – DrSc (Eng.), Associate Professor of the Department of Pyrometallurgy and Foundry Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia. Email: dubrovinvk@susu.ru.

**Elena V. Petrochenko** – DrSc (Eng.), Professor of the Department of Foundry Processes and Materials Science, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.