

без применения дорогостоящих устройств изменения частоты вращения роторных частей агрегатов. Энергоэффективность работы багерных станций при этом повышается на 11% без увеличения эксплуатационных затрат. Затраты на внедрение оцениваются в объеме 50 тыс. грн на одну багерную станцию. Соотношение затрат по предлагаемым мероприятиям и проекту “Реконструкция золоотвалов”, а также сроки их окупаемости показывают привлекательность рассматриваемых мероприятий в техническом и экономическом плане.

В целом реализация на предприятии комплексного энергосберегающего проекта, включающего очистку водоводов и модернизацию насосных агрегатов, позволяет получить экономический эффект без учета фактора времени в размере от 1660 до 2407 тыс. грн (в зависимости от режимов работы ТЭС) в течение 20 лет при уровне капитальных затрат 775 тыс. грн. Сроки окупаемости проекта, рассчитанные на основе среднегодового экономического эффекта, колеблются по проводимым мероприятиям от 3,3 месяцев до 10,2 лет, при этом средний срок окупаемости по комплексу мероприятий составляет 6,4-9,3 года.

Предложенные технико-экономические решения в рамках разработанного комплексного энергосберегающего проекта реконструкции системы оборотного водоснабжения золошлакоудаления ТЭС могут быть с успехом применены как базовые и на других украинских электростанциях, работающих на угле и эксплуатирующих систему золошлакоудаления.

**Список литературы:** 1.СНиП II-35-76 “Котельные установки” [Электронный ресурс]. – Режим доступа : // <http://www.vashdom.ru/snip/II-35-76>. 2.Нормы технологического проектирования тепловых электрических станций ВНТП 81 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : // [http://www.rosteplo.ru/Npb\\_files/npb\\_shablon.php?id=313](http://www.rosteplo.ru/Npb_files/npb_shablon.php?id=313). 3.Трубы стальные – Холдинговая компания «Интербуд» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : // <http://www.interbud.org.ua/price>. 4.Водопроводные трубы из полиэтилена ТМ РАСКО [Электронный ресурс]. – Режим доступа : // [http://rasko.ua/assets/files/rasko\\_price\\_all.pdf](http://rasko.ua/assets/files/rasko_price_all.pdf).

*Поступила в редколлегию 15.02.2012*

**УДК 669.162.231:51.007.004.8**

**А.В. КОШЕЛЬНИК**, канд. техн. наук, с.н.с., ИПМаш НАН Украины,  
Харьков,

**В.М. КОШЕЛЬНИК**, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ», Харьков,

**А.А. МИГУРА**, маг., НТУ «ХПИ», Харьков

## **ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В НАСАДКЕ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ**

У статті показано можливість використання нейронних мереж, що прогнозують коефіцієнти теплообміну регенеративного повітрянагрівача скловарної печі. Розглянуто порівняння нейронної мережі типу багатозаровий перцептрон (MLP) та радіально базисна функція (RBF).

В статье показана возможность применения нейронных сетей для прогнозирования коэффициентов теплообмена регенеративного воздухонагревателя стекловаренной печи.

Проводится сравнение нейронной сети типа многослойный персептрон (MLP) и радиально базисная функция (RBF).

The feasibility of Neural Network have determined for forecast parameters of heat exchangers type of the regenerative air heater for glass furnaces. Neural Network multilayer perception (MLP) and radial basis function have analyzed.

**Введение. Постановка задачи в общем виде.** Повышение энергоэффективности и энергосбережение является актуальной проблемой для экономики Украины [1]. Как известно, высокотемпературные теплотехнические установки (ВТУ) разного целевого назначения с системой регенеративного теплоиспользования составляют основу технологических комплексов предприятий ряда энергоемких отраслей промышленности, таких как металлургия, коксохимия, стекольное производство [2, 3]. Расчет высокотемпературных регенераторов, которые широко применяются в теплотехнических схемах, связан с необходимостью решения задач нестационарного теплообмена в огнеупорной насадке с реализацией громоздкого алгоритма вычислений для расчета основных режимных параметров. Одной из главных задач расчетов является определение интенсивности теплообмена в каналах насадки различной формы при циклическом изменении температуры.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В настоящее время, учитывая резкое подорожание стоимости энергоносителей, актуальной проблемой теплотехнологии является усовершенствование оборудования для реализации тепловых процессов, в том числе, в ВТУ регенеративного типа разного назначения [1 - 4]. На кафедре теплотехники НТУ «ХПИ» выполнен комплекс работ по моделированию работы регенераторов различной тепловой мощности [3-7]. Отметим, что повышение эффективности работы регенераторов связано с необходимостью получения достоверной информации о нестационарных температурных процессах, которые развиваются в каналах теплоаккумулирующей насадки регенераторов.

Создание и реализация математических моделей высокотемпературных регенераторов требует учета конструктивных особенностей, технологических ограничений и связей регенераторов с работой основного агрегата. Однако общим для регенераторов ВТУ является наличие сложного нестационарного теплообмена и диапазона изменения температур от 30 до 1600 °С. Считаем, что в этом случае возможно применение искусственного интеллекта, что позволяет решать задачи, природу которых не всегда удастся выразить в обычных терминах «корреляций» [6, 7]. В последнее время наблюдается значительное увеличение интереса к нейронным сетям, которые находят широкое применение в самых различных областях – физике, технике, медицине, геологии [8]. Нейронные сети имеют практическое применение во многих случаях, где необходимо решать задачи прогнозирования, классификации или управления. Как известно, нейронные сети представляют собой небольшие модели, созданные по подобию биологических нейронных сетей.

**Выделение нерешенной части общей проблемы.** Повышение эффективности работы системы регенерации ВТУ может быть достигнуто путем

решения задачи теплообмена в регенеративной насадке. Значительно усложняет решение данной задачи использование насадок с различной геометрией канала, использование различных огнеупорных материалов, необходимость учета изменения теплофизических свойств теплоносителей и материала насадки. Определение коэффициентов теплообмена в каналах насадок регенераторов является одной из важнейших задач при разработке математических моделей регенераторов [4, 6, 7]. В каналах регенеративной насадки имеет место совместное действия конвекции и излучения. В настоящее время имеется необходимость разработки методологических подходов к созданию математических моделей с использованием универсальных блоков по прогнозированию интенсивности теплообмена между огнеупорной насадкой и теплоносителями при условии циклического изменения температуры в широком диапазоне параметров при условии разнообразия формы и размеров насадки регенераторов для высокотемпературного нагрева воздуха горения.

**Постановка задачи.** Для совершенствования методики комплексного расчета рабочих параметров теплотехнологической системы, включающую регенеративные теплообменные аппараты, имеет решающее значение определение универсальных корреляций, позволяющих решить задачи прогнозирования интенсивности теплообмена с выбором основных характеристик и режимов их работы на основе моделирования нейросетевых архитектур.

**Цель работы** состоит в научном обосновании и разработке методологических основ, касающихся возможности применения нейросетевых моделей для прогнозирования интенсивности нестационарного теплообмена в каналах теплоаккумулирующих насадок на примере регенераторов стекловаренных печей.

**Изложение основного материала.** Как известно, нейросетевые модели имеют разнообразную структуру. Однако, даже относительно простые ансамбли дают возможность выполнять поставленную задачу с большой степенью точности [9]. Из всего разнообразия моделей следует выделить, прежде всего, сети прямого и обратного распространения ошибок. Первые являются более простыми в своем понимании, а процесс обучения производится за более короткое время и с меньшим количеством математических вычислений по сравнению с сетями обратного распространения [10]. Нами предпочтение было отдано одношаговому предиктору на базе прямонаправленной трехслойной сети с радиально-базисными активационными функциями нейронов скрытого слоя RBF – сети, и многослойному персептрон MLP.

В статье рассмотрены модели прямого распространения различной архитектуры, с помощью которых будет решаться задача прогнозирования значений коэффициентов теплообмена в каналах регенератора стекловаренной печи.

Текущее состояние нейрона определяется как взвешенная сумма его входов:

$$S = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i, \quad (1)$$

где  $n$  – число входов нейрона,

$x_i$  – значение  $i$ -го входа нейрона,

$w_i$  – вес  $i$ -го синапса (однонаправленные связи входных сигналов соединенных с выходами других нейронов).

Затем определяется значение аксона нейрона по формуле  $y = f(s)$ , где  $f$  – некоторая функция, которая называется активационной. Выход нейрона есть функция его состояния. В качестве активационной функции чаще всего применяется нелинейная функция с насыщением, логистическая функция или сигмоид (рис. 1, а):

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha x}}. \quad (2)$$

Во введенных Брумхедом и Лоуе нейронных сетях в качестве активационной применяется функция Гаусса (радиально-базисная функция (РБФ)) (рис. 1, б):

$$f(x) = e^{-\frac{x^2}{\sigma^2}}. \quad (3)$$

Ее аргумент рассчитывается по формуле  $x = \|z - c\|$ , где  $z$  – вектор входных сигналов нейрона;  $c$  – вектор координат центра окна активационной функции;  $\sigma$  – ширина окна;  $\| \cdot \|$  – евклидово расстояние.

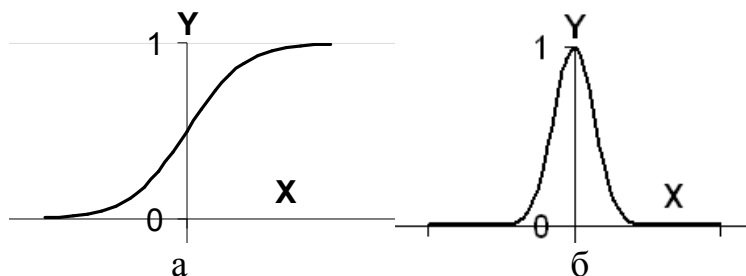


Рис. 1 . Типы активационных функций

Далее рассмотрим возможность применения нейронных сетей для решения задачи расчета коэффициентов теплообмена в каналах насадки регенератора стекловаренной печи. Насадочная камера регенератора имеет прямоугольную форму, в которой устанавливается насадка из огнеупорного кирпича. В данном случае рассмотрена насадка с каналами прямоугольной формы (рис. 2).

Температурные параметры: греющие газы поступают в регенераторы с температурой 1100-1350 °С и охлаждаются там до 400 – 550 °С, температура воздуха на входе в регенератор составляет в среднем 80 – 150 °С.

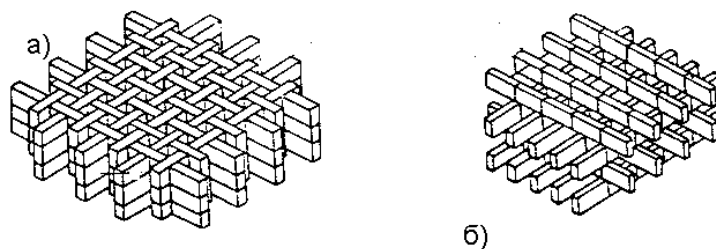


Рис. 2 . Общий вид насадок регенераторов стекловаренных печей а)Каупера, б) Сименса

Расчетные исследования проведены для насадки Каупера с размером ячейки 120×120 мм. Выбор критериальных уравнений для расчёта теплопередачи в насадках регенераторов обусловлен конструкцией насадки и условиями её работы. Для определения конвективной составляющей коэффициента теплоотдачи использовали критериальное уравнение [4]:

$$Nu = 0,237 \cdot Re^{0,61}, \quad (4)$$

где  $Re$  – число Рейнольдса.

Лучистая составляющая значения коэффициента теплоотдачи находится с учетом влияния величин дополнительных отражений и поглощений как

$$\alpha_{л} = \frac{C_S}{T - T_{ст}} \cdot \left[ \bar{\varepsilon} \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4 - \bar{\varepsilon}_{П} \cdot \left( \frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right]. \quad (5)$$

Здесь величины  $\bar{\varepsilon}$  и  $\bar{\varepsilon}_{П}$  учитывают влияние дополнительных отражений и поглощений, рассчитываемые по методике, изложенной в [4, 5].

Массив исходных данных для обучения сети был получен с помощью программного комплекса для моделирования работы регенеративных теплообменников [4]. В результате расчета были получены данные для обучения нейросетевой модели.

Таблица. Данные для обучения нейронной сети

Температура газа на входе в насадку, °С	Скорость газа, м/с	Диапазон изменения коэффициентов теплообмена, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	
		конвекция	излучение
100 – 1580	0,6	12,43 – 28,6	3,19 – 139,16

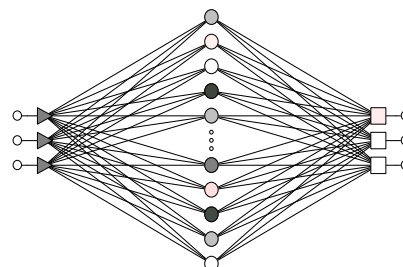
Полученные результаты были обработаны помощью нейросетевого компилятора стандартного приложения Stat Soft NeuralNetwork [10]. В результате анализа было получено пять моделей с тремя видами архитектуры нейронной сети: линейная, многослойный персептрон и радиально базисная функция соответственно.

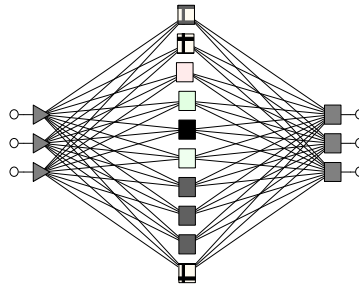
Из этих моделей выберем две с различной архитектурой для дальнейшего анализа.

На интервале обучения наименьшую ошибку 0,000242, имеет радиально-базисная функция с архитектурой РБФ 3:3-31-3:3 где 3 входа, 3 выхода, три слоя, которых имеют 3, 31 и 3 элемента соответственно. Многослойный персептрон – МП 3:3-10-3:3, контрольная ошибка составляет 0,008961.

На рис. 3 представлено архитектуры ансамбля нейронных моделей для радиально-базисной функции и для многослойного персептрона. Треугольники

используются для того, чтобы указать на входные нейроны. Эти нейроны не осуществляют преобразований, а просто подают входные значения в сеть. Квадраты соответствуют





а б  
Рис. 3 .Архитектура сети: а) РБФ 3:3-31-3:3, б) многослойный персептрон МП 3:3-10-3:3

элементам с синаптической функцией скалярного произведения. Окружности соответствуют элементам с радиальной синаптической функцией. Черный цвет скрытого слоя нейронов показывает

положительное

воздействие

активации

выходные

предикторы,

уменьшением

активации

становится светлее,

штриховка

показывает

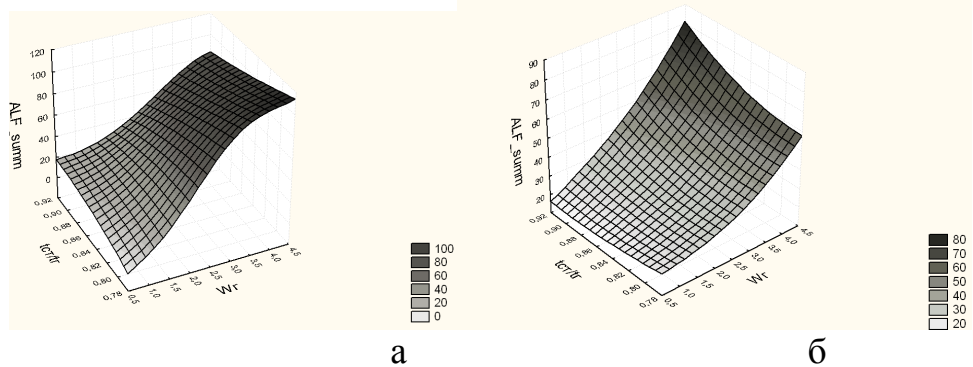
отрицательное

воздействие.

на

с

цвет



а б  
Рис. 4. Поверхность отклика: а) РБФ 3:3-31-3:3, б) многослойный персептрон МП 3:3-10-3:3

Поверхность отклика представляет собой двумерный срез  $N$ -мерной поверхности отклика, где  $N$  – число входных переменных. В нашем случае размерность обучающей выборки равна трем.

Для оценки работоспособности сети протестируем модель и прогнозируемые

результаты сравним с расчетными. Входные данные выполняют условие, что  $\frac{t_2}{t_{cm}}$

будет отличаться от значений, на которых была обучена модель.

Как показали результаты сравнения прогноза и расчетных данных, (рис.5), максимальная погрешность прогноза была показана RBF – равная 36,65% (при минимальной температуре исследования 100 C). Учитывая, что температура

уходящих газов на выходе из регенератора стекловаренной печи редко бывает ниже 400°C, то максимальное отклонение прогнозирования интенсивности теплообмена составит: для RBF – 8,74 %, для MLP – 5,36 %. Такая точность является вполне допустимой для расчета коэффициентов сложного теплообмена в регенераторах.

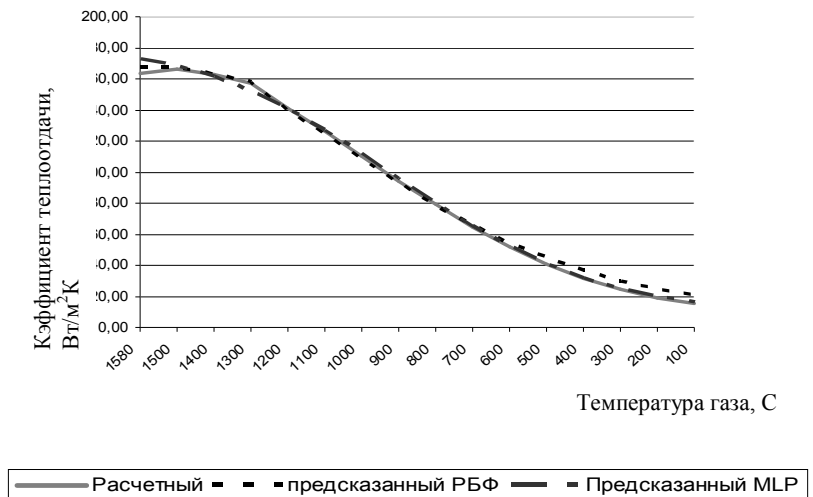


Рис. 5. Сравнение прогноза с расчетными данными определения зависимости коэффициента теплоотдачи от температуры газа в насадке регенератора

**Выводы.** Таким образом, в работе впервые был применен анализ данных с использованием искусственных нейронных сетей, для прогнозирования показателей интенсивности теплообмена в высокотемпературных регенеративных воздухонагревателях стекловаренных печей. Полученные результаты свидетельствуют о возможности применимости данного метода для расчетов интенсивности теплообмена конвекцией и излучением в каналах регенеративных теплообменных аппаратов стекловаренных печей, что позволит использовать их при проектировании новых теплообменников и оптимизации параметрических характеристик регенераторов действующих стекловаренных печей.

**Список литературы:** 1. Стратегія енергозбереження в Україні: Аналітично-довідкові матеріали в 2-х т. / За ред. В.А. Жовтянського, М.М. Кулика, Б.С. Стогнія. – К.: Академперіодика, 2006. – Т.1: Загальні засади енергозбереження. – 510 с. 2. Ключников А.Д. Энергетика теплотехнологии и вопросы энергосбережения.- М.: Энергоатомиздат, 1986. –128 с. 3. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л. Интегрированные энергосберегающие теплотехнологии в стекольном производстве: монография / [Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, В.М. КОШЕЛЬНИК, В.В. СОЛОВЕЙ, А.В. КОШЕЛЬНИК]. Под ред. В.М. Кошельника – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 628 с. 4. Кошельник А.В. Повышение эффективности теплоиспользования на основе совершенствования параметрических характеристик системы регенерации стекловаренной печи: дис...канд. техн. наук: 05.14.06 / А.В. Кошельник. – Харьков, 2001. – 176 с. 5. Кошельник А. В. Математическая модель многокамерных регенераторов плавильных агрегатов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – №1/2 (25). – С. 51 – 54. 6. Кошельник О.В. Особливості розрахунків процесів складного теплообміну в регенеративних теплообмінниках з нерухомою вогнетривкою насадкою нагрівальних і плавильних печей // Промышленная теплотехника. – Т. 30, № 3. – 2008.– С. 33 – 40. 7. Koshelnik A. Modeling of thermal processes in the packing of regenerative heat exchangers in industrial glass-melting furnaces / A. Koshelnik // Glass and ceramics. – 2008. – V. 65, № 9–10. – P. 301–304.. 8. Вороновский Г.К. Усовершенствование практики оперативного управления крупными теплофикационными системами в новых экономических условиях / Г.К. Вороновский. Х: Харьков, 2002. – 240 с. 9. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / А.Б. Барский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с. 10. Нейронные сети. STATISTICA Neural Networks: Методология и технологии современного анализа данных: под редакцией В.П. Боровикова. – М.: Горячая линия, Телеком, 2008. – 392 с.

Поступила в редколлегию 07.03.12