

*Розглянуто основні режимні та конструктивні параметри, що впливають на ефективність роботи регенераторів скловарних печей. Розроблено та проаналізовано нейронна мережа для вибору оптимальних видів вогнетривких матеріалів насадки регенератора в залежності від температури та типу насадки. Надано рекомендації щодо вибору архітектури нейромережевої моделі для прогнозування різноманітних характеристик регенератора*

*Ключові слова: скловарна піч, регенератор, насадка, вогнетрив, прогнозування, нейронні мережі, активаційна функція*

*Рассмотрены основные режимные и конструктивные параметры, влияющие на эффективность работы регенераторов стекловаренных печей. Разработана и проанализирована нейронная сеть для выбора оптимальных видов огнеупорных материалов насадки регенератора в зависимости от температуры и типа насадки. Даны рекомендации для выбора архитектуры нейросетевой модели для прогнозирования различных характеристик регенератора*

*Ключевые слова: стекловаренная печь, регенератор, насадка, огнеупор, прогнозирование, нейронные сети, активационная функция*

# РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ НЕЙРОСЕТИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАСАДКИ РЕГЕНЕРАТОРА СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

**А. А. Мигура**

Младший научный сотрудник  
Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»  
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002  
E-mail: migura.j@mail.ru

**А. В. Кошельник**

Кандидат технических наук, доцент  
Институт проблем машиностроения  
им. А. Н. Подгорного НАН Украины  
ул. Дм. Пожарского, 2/10, г. Харьков, Украина, 61046  
E-mail: pishti@mail.ru

## 1. Введение

В настоящее время актуальным направлением исследования сложных процессов нестационарного теплообмена является математическое моделирование, в котором реальный процесс заменяется соответствующей математической моделью. Математическое моделирование позволяет обнаружить новые физические закономерности в сложных неравновесных системах [1].

Стекловаренная отрасль, являясь одной из наиболее энергоемких, являясь значительным потребителем природного газа. Более 60 % стекломассы получают сегодня в топливных печах ванного типа непрерывного действия [2]. Для разработки новых технических решений по уменьшению удельного показателя затрат энергии на долю выпущенной единицы продукции необходимо применять весь спектр существующих методов моделирования и прогнозирования рабочих параметров теплоутилизационных систем.

В стекольном производстве используется большое количество различных по химическому составу огнеупорных материалов. Мировое потребление огнеупоров для стекольной промышленности составляет 0,75–1 млн. т/год или 3–4 % от всего глобального рынка огнеупоров [3].

Сегодня стекольные предприятия проводят активную модернизацию тепловых агрегатов, вызванную ростом требований потребителей к качеству стекольной продукции. Поэтому, как проектировщики печей,

так и сами стекольные заводы, прилагают ныне немалые усилия для снижения энерго- и трудозатрат, наращивания съема стекломассы, продления кампании печей. Первоочередная роль в решении этих подобных задач отводится получению и внедрению новых огнеупорных материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками [4].

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Для утилизации теплоты уходящих газов после стекловаренных печей применяются различные типы теплообменного оборудования. Для печей большой производительности наибольшее распространение для печей ванного типа получили регенеративные теплообменники с неподвижной насадкой [5–7]. Регенератор стекловаренной печи представляет собой теплообменный аппарат, функция которого заключается в нагреве воздуха горения перед подачей его в стекловаренную печь. Высота регенератора не превышает высоту печи. Горячий теплоноситель (дымовые газы) с температурой 1100–1350 °С, проходя через каналы насадки регенератора, выполненной из огнеупорного кирпича или формовых элементов, отдает часть тепла теплоаккумулирующей насадке (до температуры ее нагрева до 400–550 °С). После периода нагрева следует период охлаждения, при котором холодный теплоноситель (воз-

дух) с температурой на входе в среднем 80–100 °С подается в каналы нагретой насадки, в результате чего его температура увеличивается до 900–1100 °С. Таким образом, часть теплоты возвращается обратно в топочную зону стекловаренной печи. Значительные капитальные затраты, связанные с установкой регенераторов, позволяют утверждать о целесообразности применения такой конструкции печей при производительности по стекломассе более 100 т/сут [2].

В настоящее время остается нерешенной проблема увеличения кампании стекловаренных печей в производстве основных типов промышленных стекол до 8–10 лет. Основной причиной этого является неспособность регенеративных подогревателей эксплуатироваться на протяжении всего времени работы непосредственно печи. Для увеличения срока службы насадки регенератора требуется использование для кладки регенеративных камер, особенно насадки регенераторов, таких огнеупорных материалов, которые обеспечивают успешную эксплуатацию регенераторов на протяжении всей кампании печи без замены. Время горячего ремонта отдельных участков огнеупорной кладки ограничено 20–30 мин в условиях изменения температуры и высокой концентрации в отходящих дымовых газах пылевидных компонентов шихты, агрессивных газообразных компонентов [7].

Начиная с 90х годов XX века, с резким ростом цен на энергоносители и огнеупорные материалы учеными и инженерами всего мира уделяется повышенное внимание к решению задач увеличения срока службы стекловаренного агрегата и математическому моделированию теплотехнических процессов печи для повышения энергоэффективности. В работе [8] описаны мероприятия по повышению срока кампании агрегата до 16 лет за счет использования горелок Alglass. Значительного увеличения эффективности работы печи до 45 % можно добиться за счет добавки стеклобоя в шихту. Качественные и количественные показатели зависимости добавления стеклобоя в шихту приведены в работе [9]. Моделирование процессов коррозии огнеупоров и воздействие на конструкцию печи описано в работе [10]. Упрощенная модель тепловых процессов стекловаренной печи с использованием эмпирических коэффициентов предложена в работе [11]. В зависимости от конструкции регенератора ванной стекловаренной печи в работе [12] проанализированы основные теплотехнические параметры различных типов насадки и даны рекомендации для выбора конструкции кладки. Возможность применения искусственного интеллекта для задач прогнозирования теплотехнических параметров регенератора стекловаренной печи описана в работе [13].

### 3. Цель и задачи исследования

Целью работы является:

- сравнительный анализ использования различных, наиболее распространенных в стекловаренном производстве, типов насадок регенераторов, выполненных из современных огнеупорных материалов;
- разработка нейросетевой модели для прогнозирования и определения параметров насадок регенератора.

В настоящей работе исследования проводятся для различных типов огнеупоров на примере регенеративных подогревателей стекловаренной печи с подковообразным направлением пламени производительностью по стекломассе 64 т/сут.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- проанализировать свойства огнеупоров насадки регенератора в рабочих условиях;
- разработать нейросетевую модель решения обратной задачи расчета теплотехнических параметров регенератора в зависимости от конструкции насадки и типа огнеупорного материала;
- провести сравнительный анализ для разработанной нейросетевой модели и выявить зависимости структуры сети от вида входных и выходных данных по отношению к сетям, обученным для решения задач прогнозирования численных и классификационных типов.

### 4. Методика расчета и прогнозирования режимных параметров регенератора

В настоящее время в крупных стекловаренных печах используется несколько типов насадок регенераторов. Насадки, выполненные из стандартного огнеупорного кирпича, имеют более низкую стоимость, материал является общедоступным, они просты в эксплуатации и ремонте. В свою очередь, формовые элементы обладают более высокими теплотехническими характеристиками за счет уменьшения толщины стенки с 65–90 мм у стандартного кирпича до 20–40 мм. Обладая более развитой структурой поверхности насадочного элемента для улучшения процесса теплоотдачи, формовые элементы находят все более широкое применение. Основные типы насадок регенераторов представлены на рис. 1, а–г.

Для определения эффективности регенераторов необходимо учитывать ряд параметров: использование насадок с различной геометрией канала; применение разнообразных огнеупорных материалов; необходимость учета изменения теплофизических свойств теплоносителей и материала насадки в течение нестационарного протекания процесса нагрева и охлаждения. В каналах регенеративной насадки имеет место совместное действие конвективного и лучистого теплообмена.

Использовавшиеся ранее на протяжении длительного времени для кладки регенеративных камер алюмосиликатные (шамотные, в меньшей степени высокоглиноземистые) огнеупоры подвергаются весьма интенсивному износу. Отмечается значительное оплавление насадочных кирпичей, что сопровождается уменьшением их толщины с 65–75 до 20–30 мм с обвалом всей насадки или ее отдельных участков. На поверхности изделий в результате воздействия агрессивных компонентов, содержащихся в отходящих дымовых газах, образуется толстый (до 10 мм) остеклованный слой продуктов коррозии, обогащенный щелочными (до 22 %) и щелочноземельными (до 15 %) компонентами, включающий новообразованные фазы различных щелочных алюмосиликатов [7].

Быстрое разрушение шамотной (в меньшей степени высокоглиноземистой) насадки вызывает необходимость проведения каждые 9–15 месяцев горячих ремонтов регенераторов печи с заменой насадки – длительной (3–4 суток) трудоемкой операции, что нарушает стабильность технологического режима варки стекла, увеличивает расход огнеупоров и топлива. Для устойчивой работы регенератора необходимо обеспечить рациональное использование огнеупоров по всей высоте насадки, исходя из особенной коррозионной среды в ее различных зонах.

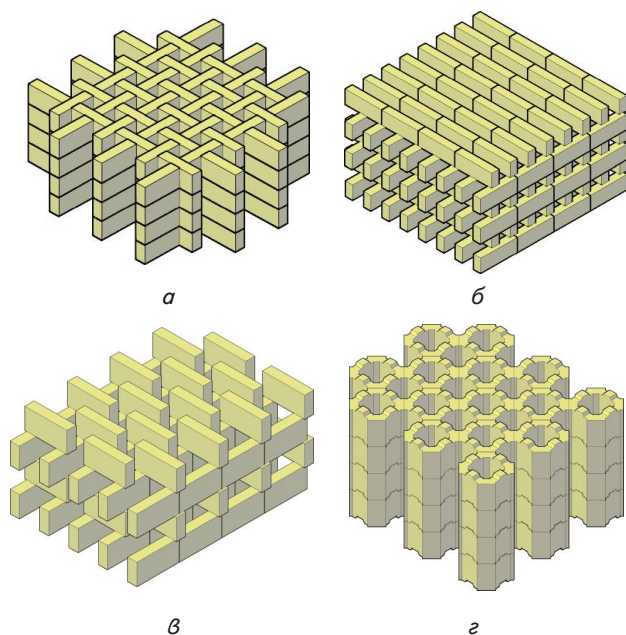


Рис. 1. Основные типы насадок регенераторов стекловаренных печей: *а* – насадка Каупера; *б* – насадка Сименса без смещения каналов; *в* – насадка Лихте; *г* – корзиночная насадка из формовых элементов

По типу агрессивного воздействия и характеру разрушения насадку регенератора стекловаренной печи можно разделить по высоте на три зоны. Огнеупоры верхней зоны (10–20 % общей высоты) подвержены воздействию градиента температур, легкоплавких щелочных компонентов, твердых летучих компонентов шихты (главным образом соды) и твердых летучих компонентов шихты (песка, доломита, известняка, полевого шпата). В средней зоне (60–80 % общей высоты) осаждается значительно меньшее количество щелочных компонентов; разрушение огнеупоров в основном связано с взаимодействием серного ангидрида с периклазом в верхних участках этой зоны и с конденсацией агрессивных летучих компонентов, главным образом сульфатов щелочных металлов, в средних и нижних участках этой зоны при 800–900 °С. В нижней зоне (10–20 % общей высоты) насадка может быть частично подвержена коррозионному воздействию конденсирующихся сульфатных соединений, но в основном она подвергается воздействию градиента температур, особенно самые нижние ряды.

Исходя из приведенных особенностей условий службы, кладку различных зон насадки необходимо выполнять из наиболее соответствующих имеющимся

условиям работы огнеупоров. В работах [14–17] приведены методики расчета тепловой модели регенератора. В работе [12] были проанализированы основные факторы, влияющие на теплотехнические характеристики насадки регенератора, с учетом использования различных типов огнеупоров и типоразмеров насадок.

Для определения теплотехнических параметров работы регенератора стекловаренной печи с успехом используется вычислительный комплекс, подробно описанный в работе [18]. Однако при условии обратной задачи, в которой неизвестен огнеупор насадки и предъявляются жесткие требования к обеспечению определенных значений температур теплоносителей на выходе из насадки, алгоритм расчета усложняется введением дополнительного переменного параметра, что увеличивает время решения задачи.

Интеллектуальные системы на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) позволяют с успехом решать проблемы распознавания образов, прогнозирования, оптимизации, ассоциативной памяти и управления. Известны и иные, более традиционные подходы к решению этих проблем, однако они не обладают необходимой гибкостью за пределами ограниченных условий. Статистические методы требуют, чтобы объем обучающей выборки был достаточно велик. Если же размер обучающей выборки мал (в случаях, когда из-за уникальности или дороговизны изделий и сложности испытаний невозможно или нежелательно проводить большое количество экспериментов), статистические и эвристические алгоритмы, как правило, не позволяют решать задачу классификации с достаточной достоверностью [19]. Кроме того, эти системы не обладают самоорганизацией и не способны в планировании эксперимента.

Одним из важнейших свойств ИНС является способность к аппроксимации многомерных функций, что позволяет использовать их для моделирования сложных процессов и объектов. Не менее важное свойство ИНС – обучаемость дает возможность строить на их основе адаптивные системы.

## 5. Результаты исследования создания нейросетевой модели для прогнозирования параметров регенератора

Для решения подобной задачи предлагается использовать нейронную сеть, обученную на результатах расчета вычислительного комплекса. Структура исходных данных для обучающей выборки приведена на рис. 2. Таким образом, обучающая выборка состоит из 960 наборов параметров с пятью переменными в каждом, три из которых численные – текущий момент времени, температура воздуха на выходе из насадки и температура дымовых газов на выходе из насадки, а две – переменные классификационного типа (текстовые) – вид насадки регенератора, тип огнеупора.

Перед обучением нейронной сети в вычислительном комплексе Statistica 10 сети были заданы следующие параметры:

- тип выходных данных – классификация;
- архитектура сети – многослойный персептрон (MLP) и радиально-базисная функция RBF.

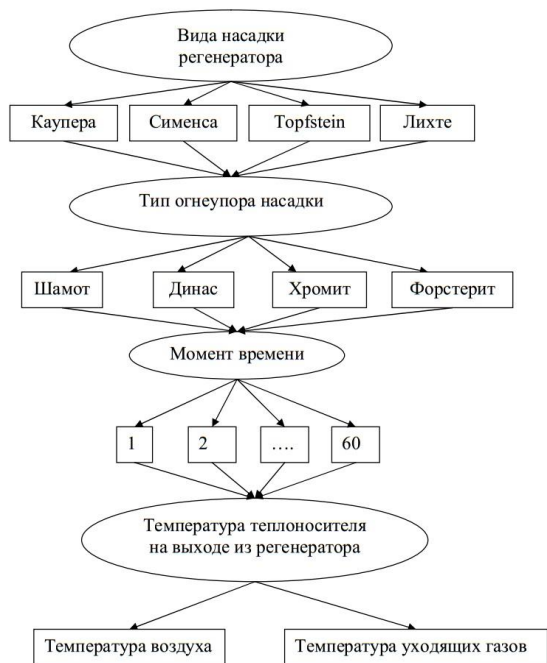


Рис. 2. Структура обучающей выборки для прогнозирования типа огнеупора нейронной сети

**6. Обсуждение результатов анализа структуры нейронной сети для прогнозирования параметров регенератора**

В результате обучения была получена и отобрана сеть с наилучшими параметрами, приведенными в табл. 1.

Анализ параметров полученной нейронной сети выявил структуру и качественную характеристику модели прогнозирования рабочих данных регенератора стекловаренной печи. Нейросеть представляет собой многослойный персептрон типа MLP 7-7-4, у которого три слоя. Первый и второй состоит из семи нейронов, третий слой – четырехнейронный. Полученные нейросети типа радиально-базисная функция показали значительно худшие показатели, где основной критерий – тестируемое попадание – не превышал 30 %, в то время как для прогнозирования численных параметров регенератора RBF показывала лучшие результаты [19].

Вследствие сильной нелинейности нейросетей, обучение производится итерационными методами, сеть для прогнозирования параметров регенератора стекловаренной печи имеет тип оптимизирующей функции BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) [20], количество итераций 229.

Здесь функция ошибки используется для оценки работы нейронной сети во время обучения и для определения попадания сети при прогно-

зах на целевые показатели. Таким образом, функция ошибки – это «глаза и уши» сети. Истинный нейросетевой классификатор должен иметь функцию ошибки отличную, чем сумма квадратов, а именно функцию ошибки кросс-энтропии (cross entropy error – CE).

Входные нейроны они используют идентифицирующую функцию – функцию активации, что означает, что входные сигналы не трансформируются вообще. Вместо этого они объединяются во взвешенную сумму (взвешенных по входным-скрытым слоям весов) и передаются нейронами в слое выше (обычно называемый скрытый слой). Скрытая активационная функция обученной нейросети представляет собой логистический сигмоид, имеющий следующий вид:

$$\phi(S) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha S}}, \tag{1}$$

где  $\alpha$  – параметр, который определяет наклон функции.

Выходная активационная функция обученной нейросети представляет собой многопеременную логистическую функцию (Softmax). Следует отметить, что во всех пяти обученных нейросетях с лучшими показателями в качестве выходной активационной функции, в отличие от скрытой активационной, использовалась функция типа Softmax, которая имеет следующий вид:

$$\phi(S) = \frac{\exp(\alpha_i)}{\sum \exp(\alpha_i)}. \tag{2}$$

Важным наглядным показателем обучения нейронной сети является поверхность отклика. Она представляет собой двумерный срез N-мерной поверхности отклика, где N – число входных переменных, в нашем случае размерность обучающей выборки равна четырем (рис. 3).

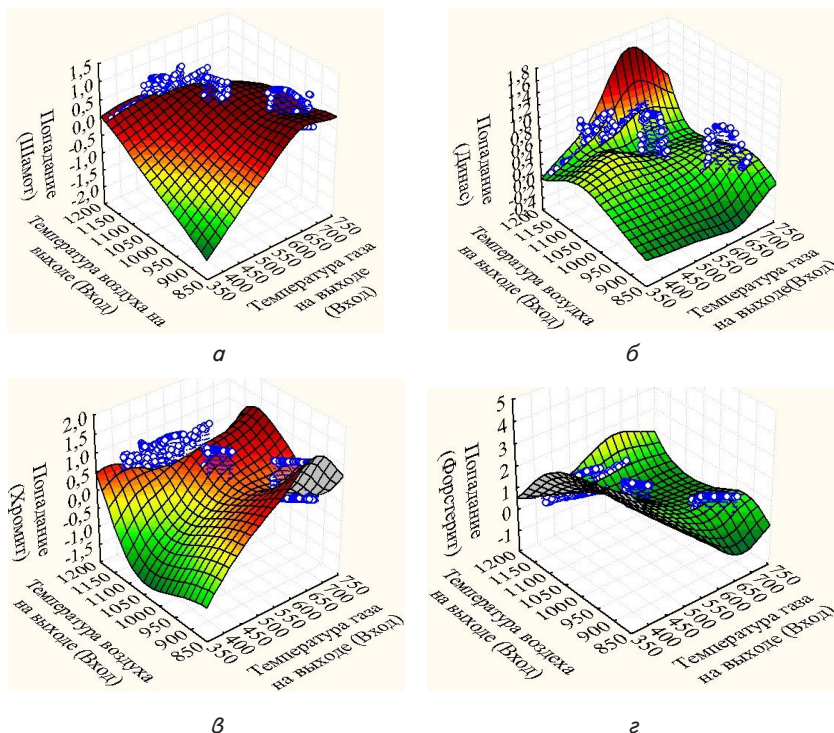


Рис. 3. Поверхности отклика нейронной сети в зависимости от температур теплоносителя: а – шамот; б – динас; в – хромит; г – форстерит

Таблица 1

Структура нейронной сети

Тип модели	Тренировочное попадание, %	Тестируемое попадание, %	Проверочное попадание, %	Алгоритм итерации	Функция ошибки	Скрытая активационная функция	Выходная активационная функция
MLP 7-7-4	91,2	93,06	86,1	BFGS 229	CE	Логистический сигмоид	Softmax

**7. Выводы**

В результате проведенных исследований:

1. Выявлены особенности применения различных типов огнеупорных материалов в зависимости от высоты конструкции насадки регенератора, так самые высокие требования к огнеупорному материалу предъявляются на нижних рядах кладки регенератора.

2. Для прогнозирования работы регенеративных теплообменников системы утилизации теплоты стекловаренных печей была обучена нейронная сеть, предназначенная для классификации и выбора огнеупорных материалов регенеративных теплообменных аппаратов. В результате обучения нейросеть показала удовлетвори-

тельные показатели при прогнозировании типа огнеупоров для насадки регенераторов стекловаренной печи, который не превышает 7 % при тестируемом попадании и 13 % при проверочном попадании, что говорит об абсолютном попадании при прогнозировании для трех и более наборов входных параметров.

3. При анализе структуры параметров обученной нейронной сети для классификации огнеупоров регенера-

тора было выявлено, что сети типа многослойный перцептрон показывают более высокие результаты по сравнению с RBF-нейросетями, в то время как для прогнозирования численных параметров сети типа RBF показывали более высокие попадания. Также было выявлено, что для классификации параметров выходная активационная многопеременная логистическая функция показывает лучшие результаты, чем все другие виды активационных функций.

4. Доказана возможность применения методов нейросетевого прогнозирования для анализа работы и выбора оптимальных типов огнеупорных материалов для насадки регенеративных теплообменников стекловаренных печей с учетом особенностей их эксплуатации.

Литература

- Алемасов, В. Е. Математическое моделирование высокотемпературных процессов в энергосиловых установках [Текст] / В. Е. Алемасов и др. – М.: Наука, 1989. – 256 с.
- Энергопотребление в производстве сортового, боросиликатного и специального стекла [Текст]. – М.: Эколайн, 2005. – 16 с.
- Справочник по наилучшим доступным техническим методам использования энергоресурсов в стекольной промышленности: производство сортового и тарного стекла [Текст]. – М.: Эколайн, 2005. – 30 с.
- Боярунец, А. Увеличивающаяся потребность украинских стекольных предприятий в высококачественных огнеупорах открывает дорогу импорту [Текст] / А. Боярунец // *Металл*. – 2006. – Спец. вып.: *Металл+огнеупоры*. – С. 14–24.
- Trier, W. Glassmelzofen. Konstruktion und Betriebsverhalten [Text] / W. Trier. – Berlin–Heidelberg–New York–Tokyo: Springer Verlag, 1984. – 338 p. doi: 10.1007/978-3-642-82067-0
- Gramatte, W. Measurement of Convective Heat Transfer Coefficient for Various Checker Systems in Glass Tank Regenerators [Text] / W. Gramatte, J. Horak, G. Moegling, A. Triessing // *Interceram*. – 1986. – Vol. 35 – P. 38–41.
- Аксельрод, Л. М. Служба огнеупоров : справ. изд. [Текст] / Л. М. Аксельрод [и др.]. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – 656 с.
- Schep, J. Practical experiences with an all oxygen-gas fired container glass furnace during its 16 years campaign [Text] / J. Schep, G. Kers // 10<sup>th</sup> ESG Conference, May 30<sup>th</sup>–June 2<sup>nd</sup>. – Magdeburg, 2010.
- Worrell, E. Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Glass Industry [Text] / E. Worrell, C. Galitsky, E. Masanet, W. Graus // *An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers*. – Berkeley, 2008. – 113 p. doi: 10.2172/927883
- Lankhorst, A. Simulation study of impact furnace design on specific energy consumption, NOx emission levels, volatilization rates and refractory corrosion [Text] / A. Lankhorst, H. van Limpt, A. Habraken, R. Beerkens // 10<sup>th</sup> ESG Conference. – Magdeburg, 2010.
- Auchet, O. Contribution to simplified modeling of glass furnaces [Text] / O. Auchet. – Institut National Polytechnique de Lorraine. – Lorraine, 2005.
- Кошельник, О. В. Вибір ефективних конструктивних і експлуатаційних параметрів регенеративних теплообмінників скловарних печей ванного типу [Текст] / О. В. Кошельник // *Енерготехнології та ресурсосбереження*. – 2008. – № 6. – С. 17–23.
- Кошельник, А. В. Прогнозирование и выбор рациональных режимов работы теплообменников систем утилизации теплоты стекловаренных печей [Текст]: сб. тр. II Межотраслевой науч.-практ. конф. / А. В. Кошельник, А. А. Мигура // *Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей природной сред*. – Харьков: Энергосталь, 2013. – С. 77–83.
- Heinlingstaed, W. Die Berechnung von Wärmespeichern [Text] / W. Heinlingstaed // *Arch. Eisenhüttenw.* – 1928/29. – Bd. 2. – P. 330.
- Rummel, K. Berechnung der Wärmespeichern [Text] / K. Rummel // *Arch. Eisenhüttenw.* – 1930/31. – Bd. 4. – P. 367.
- Schack, A. Die Berechnung der Regeneratoren [Text] / A. Schack. – *Arch. Eisenhüttenw.* – 1943/44. – Bd. 17. – P. 101–118.
- Stuke, B. Berechnung des Wärmeaustausches in Regeneratoren mit zylindrischen oder kegelförmigen Füllmaterial [Text] / B. Stuke // *Angewandte Chemie*. – 1948. – Vol. 20, Issue 10. – P. 262–268. doi: 10.1002/ange.19480201004
- Кошельник, А. В. Универсальный вычислительный комплекс для моделирования тепловых режимов регенераторов стекловаренных печей [Текст] / А. В. Кошельник // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – 1999. – № 2. – С. 88–95.
- Haykin, S. *Neural Networks: A Comprehensive Foundation* [Text] / S. Haykin. – New York: MacMillan Publishing Co., 1994. – 696 p.
- Bishop, C. M. *Neural networks for pattern Recognition* [Text] / C. M. Bishop. – Oxford: Clarendon Press, 1995. – 482 p.