

Е.Г. ЕГОРОВА, А.А. МУСАЕВ  
**СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССА  
АГЛОМЕРАЦИИ**

---

*Егорова Е.Г., Мусаев А.А. Система диагностики процесса агломерации.*

**Аннотация.** В связи со сложностью процесса агломерации возникает необходимость создания системы наблюдения и мониторинга. В статье представлен подход к разработке двухуровневой нейросетевой модели, обеспечивающей диагностику процесса спекания аглошихты. Нейронная сеть содержит информацию о нарушениях в ходе процесса. Сеть верхнего уровня выполняет задачу распознавания места возникновения нарушения. Идентификация нештатной ситуации производится сетями нижнего уровня.

**Ключевые слова:** диагностика, нарушение, искусственная нейронная сеть, процесс агломерации.

*Egorova E.G., Musaev A.A. Diagnostic system of sintering process.*

**Abstract.** The complexity of a sintering process in an iron- and steel-making plant always tends to create a problem in monitoring and supervision system. This paper reviews the approach of implementing of the two level neuronet model. The neural network with normal and faulty event is executed on the data collected from the experiment. The upper level network is used for the detection of faulty machine and lower level networks are executed the identification of the abnormal situations.

**Keywords:** diagnostics, fault, artificial neural network, sintering process.

---

**1. Введение.** Сложность большинства металлургических процессов приводит к необходимости создания систем мониторинга и наблюдения. Отсутствие системы контроля за ходом металлургических процессов может приводить к различным нарушениям хода процесса, что влечёт за собой выход продукции неудовлетворительного качества, приносит серьёзный ущерб оборудованию.

Процесс агломерации шихты характеризуется большим числом неконтролируемых возмущений, его физическая природа трудно формализуема, поэтому создать единую комплексную математическую модель процесса довольно сложно; не представляется возможным разработать систему традиционного регулирования, обеспечивающую стабильный выход годного продукта. Таким образом, хотя процесс хорошо автоматизирован, качество получаемого агломерата — основного компонента для выплавки металла, часто не достаточно высоко, что вызывает ежегодные финансовые потери.

Опрос экспертов и анализ регламента позволил выделить ряд нарушений, с которыми система автоматизации не справляется. Следует отметить, что различные нарушения на процессе часто имеют

сходные проявления, что приводит к несвоевременному обнаружению предпосылок аварий обслуживающим персоналом и служит причиной ошибочных решений по управлению процессом.

В этих условиях проблема разработки автоматизированной системы оперативного управления на основе непрерывной диагностики процесса агломерации на агломерационных машинах аглофабрики, которая позволит по результатам контроля объекта выявлять нарушения, а главное выдавать рекомендации оператору по их устранению до наступления аварий, тем самым корректируя ход процесса в сторону увеличения выхода годной продукции, представляется актуальной научно-технической задачей.

**2. Описание процесса.** Процесс агломерации, представленный на рис. 1, состоит в спекании руд, концентратов и измельчённого топлива в прочные пористые куски — агломерат.

На агломерационной фабрике шихту, состоящую из рудной части, флюсов возврата и топлива, загружают на конвейерную агломерационную машину (аглоленту), зажигают сверху и спекают, просасывая воздух через слой спекаемых материалов. Подготовленную шихту непрерывно подают системой загрузки на аглоленту и укладывают на бесконечную движущуюся цепь колосниковых тележек, предварительно поместив на неё «постель». Зажигание шихты происходит при прохождении её под зажигательным горном. По мере движения тележек горение топлива и, следовательно, процесс спекания распространяется в нижние слои за счёт атмосферного воздуха, просасываемого с помощью размещённых под тележками вакуум-камер, в которых создаётся разрежение. Готовый агломерат после машины дробят и охлаждают [1].

Процесс спекания характеризуется следующими параметрами: температура поверхности зажженной шихты, высота слоя, вертикальная скорость спекания, температура в зоне горения, время пребывания шихты на ленте — продолжительность процесса спекания (скорость ленты) и степень законченности спекания.

Тщательная подготовка шихты должна обеспечить постоянство работы агломерационной машины с возможно более постоянной скоростью и с неизменной высотой слоя шихты.

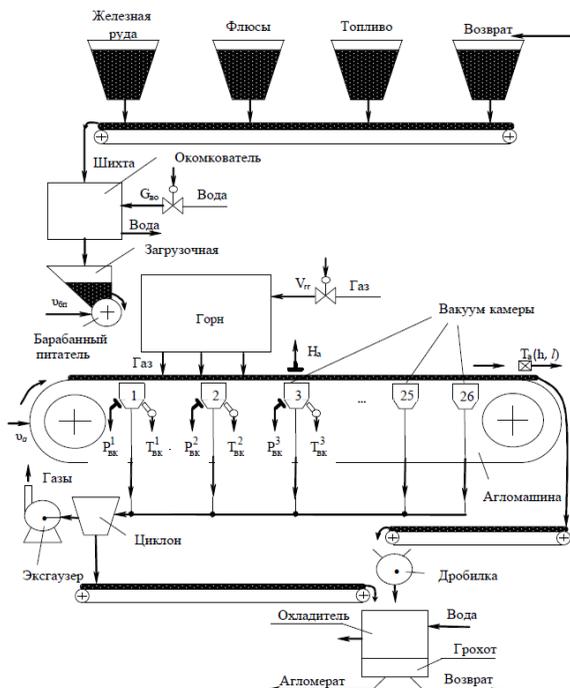


Рис. 1 Упрощённая схема агломерационного процесса

**3. Система диагностики.** В основу разрабатываемой системы диагностики заложена концепция, заключающаяся в своевременном предупреждении и раннем обнаружении нарушений в ходе процесса спекания агломерата, определении причин этих нарушений и выдаче рекомендаций оператору по способам их ликвидации, препятствуя развитию аварий. Такая система позволит увеличить время для оперативных действий по изменению хода процесса, переконфигурирования, обслуживания, а также существенно повысит эффективность процесса, уменьшит число простоев и остановок на ремонт оборудования.

Для диагностики нарушений должны использоваться знания о причинно-следственных отношениях в процессе, т.е. связь между наблюдаемыми параметрами (симптомами), характеризующими нарушения на процессе, и причинами нарушений. Опрос экспертов и анализ процесса агломерации и технологических инструкций позволил выявить нарушения.

Функции контроля и оперативного управления в системах автоматического регулирования срабатывают только после относительно больших изменений в характеристиках процесса, то есть после или неожиданного отказа, или длительного, постепенно увеличивающегося нарушения [2]. Поэтому необходимы усовершенствованные методы оперативного управления и диагностики нарушений.

Разрабатываемая диагностическая система должна выполнять следующие функции:

- определять место нарушения;
- устанавливать само нарушение;
- выявлять причину конкретного нарушения.

Из разных типов диагностических моделей, возможных для решения задач диагностирования сложных систем, к которым следует отнести процесс агломерации, выбрана нейросетевая модель [3]. В классической постановке задачи распознавания предполагается, что на этапе моделирования имеется априорная информация о нормальном и аномальном режимах работы. Если нарушение данного типа устойчиво проявляется в некотором наборе измеряемых параметров, то, используя методологию нейронных сетей, можно построить модель, распознающую такую ситуацию в дальнейшем. Для обучения нейронной сети распознаванию нарушения на ранней стадии его развития необходимы данные с процесса при отсутствии и наличии нарушения.

**4. Нейросетевая модель.** Система реализована на основе нейронной сети с прямым распространением ошибки. Структура нейронной сети выбиралась экспериментально исходя из специфики поставленной задачи. Для уменьшения времени переобучения сети, которое потребовалось бы для единой большой сети, и упрощения локализации нарушений сформирована двухуровневая нейросетевая диагностическая модель (ДМ) для процесса подготовки аглошихты, при этом сеть верхнего уровня (СВУ) выполняет задачу распознавания места возникновения нарушения. Идентификация нарушения производится сетями нижнего уровня (СНУ). При этом, если возникнет новое нарушение, сеть верхнего уровня локализует его. И хотя сети нижнего уровня могут не суметь диагностировать его причину, некоторая полезная информация о месте его возникновения будет получена. Структура разрабатываемой диагностической системы приведена на рисунке 2.

В агломерационном производстве можно выделить три стадии: подготовка шихты, спекание шихты, охлаждение и разделение агломе-

рата. Именно по данному функциональному принципу происходит декомпозиция сети на блоки.

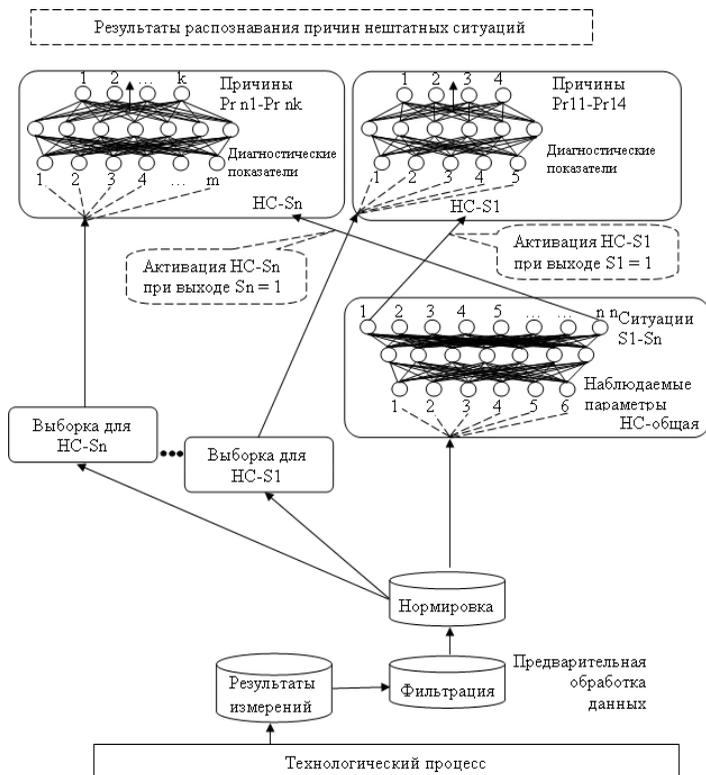


Рис. 2 Структура диагностической модели

Количество СНУ определяется соответственно числом ситуаций, а их функции состоят в определении причин, вызвавших такие ситуации, соответственно число выходных нейронов определяется числом возможных причин, вызывающих нештатную ситуацию в данном структурном блоке. Входными переменными являются исходные переменные.

На предварительном этапе работы системы диагностики происходит обработка архивных данных, содержащих динамику развития нарушений. Для устойчивой работы сети, во-первых, необходимо выполнить предварительную фильтрацию исходных данных. Для этого был использован комбинированный фильтр из скользящей медианы и

фильтра экспоненциального сглаживания. Первый позволяет отфильтровывать не очень протяженные выбросы, а второй – производит достаточно эффективное подавление флуктуационных шумов.

Во-вторых, необходимо предотвратить ситуацию, когда сеть теряет опознанную причину из-за отсутствия результатов действий оператора, т.е. когда ситуация продолжает развиваться. В этом случае целесообразно ввести нормировку исходных данных, т.к. параметры имеют разные единицы измерения, то для дальнейшей работы их необходимо привести к безразмерному виду.

Исследование производилось в среде MATLAB с пакетом моделирования динамических систем – Simulink.

На основании реальных экспертных данных были сформированы обучающие массивы с входными данными: *Wob* – который хранит наблюдаемые параметры и выходной массив желаемых выходов сети *Wi*. *Wob* включает 20 наблюдаемых параметров и информацию о 8 состояниях процесса (7 ситуаций ( $S1 - S7$ ) и одно, соответствующее нормальному ходу процесса), на каждое состояние набирается массив из 50 точек. Таким образом, размер массива *Wob* [20x400]. Массив *Wi* состоит из значений (-1) и 1 (-1 означает что ситуация не выявлена, а 1 что ситуация выявлена), и так как в работе принято 7 ситуаций, то массив имеет размерность *Wi* [7x400].

Аналогичным образом были сформированы по два массива для обучения каждой сети нижнего уровня.

Функция активации СВУ может быть различной, но в данной модели выбрана радиально-базисная [4].

После обучения сетей система готова к работе.

Для тестирования ДМ используется другой массив с данными. Процедура отладки ДМ проводилась в пакете Simulink.

Тестирование ДМ проведено на результатах имитационного моделирования развития ситуации  $S1$ . Развитие ситуации  $S1$  начинается на 200 минуте. За счет предварительной фильтрации данных динамика работы системы достаточно стабильная, т.е. отсутствуют ложные срабатывания (результаты обнаружения остальных ситуаций близки к нулю). Моментом обнаружения ситуации  $S1$  считается состояние соответствующего выхода СВУ равное 0,8. Именно с этого момента начинают работу СНУ1-СНУ4.

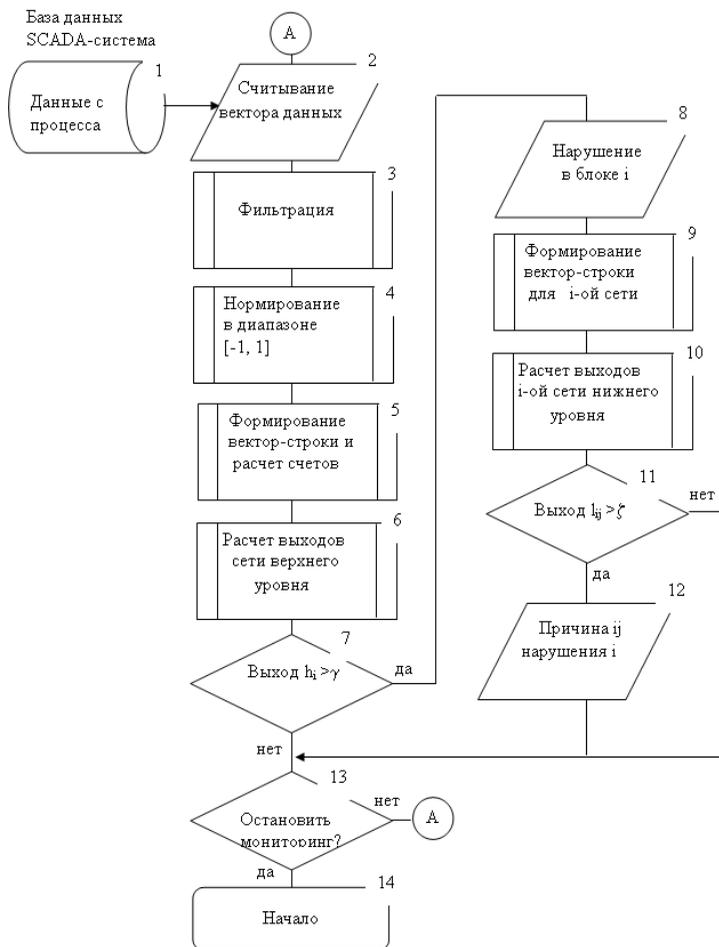


Рис. 3 Изображение алгоритма работы системы на втором этапе

Введение пороговых значений для выходных нейронов СВУ позволяет более гибко оценить результаты работы системы диагностики. Так причину можно считать идентифицированной, если значение выходного сигнала с нейронов сети превышает порог  $\zeta = 0,8$ . Причину нарушения процесса будем считать неидентифицированной, если значение выходного сигнала сети ниже порога  $\zeta = 0,3$ . Нахождение сиг-

нала нейрона в диапазоне между этими порогами означает необходимость дополнительного контроля ситуации оператором.

Тогда алгоритм работы системы будет включать два этапа: первый этап предварительный – подготовка данных, обучение по входным переменным сети верхнего уровня и обучение по исходным данным сетей нижнего уровня; второй этап основной – собственно диагностика процесса. Алгоритм второго этапа работы системы представлен на рисунке 3.

**5. Заключение** Разработана нейросетевая модель, обеспечивающая проведение диагностики процесса спекания аглошихты. Диагностическая система позволяет распознавать аномалию в поведении агломерационного процесса на ранней стадии развития, что даёт возможность своевременно принять меры для устранения причин нестабильной работы и предотвратить аварию.

Предложена система непрерывного мониторинга и диагностики процесса спекания аглошихты. Система использует двухуровневую нейросетевую диагностическую модель. Такая модель обеспечивает минимизацию времени переобучения и позволяет обнаруживать (но не идентифицировать) новые нарушения на процессе, не учтенные в обучающем массиве.

В основе модели лежит нейронная сеть прямого распространения с радиально-базисными функциями в качестве функций активации. Экспериментальное исследование работоспособности системы методом имитационного моделирования на реальных данных с процесса показало ее работоспособность.

## Литература

1. *Доронин Д.Н., Жилкин В.П.* Производство агломерата. Технология, оборудование, автоматизация. Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы, 2004. 292 с.
2. *K.Isermann.* Supervision, fault detection and fault-diagnosis methods // *AICH E Journal* 35(11), 1989. PP. 643–650.
3. *Venkatasubramanian V., Rengaswamy R., Yin K., Kavuri S. N.* A review of process fault detection and diagnosis Part III: Quantitative model-based methods // *Computers and Chemical Engineering*, 2003. V. 27. PP. 327–346.
4. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс 2-е издание: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2008. 1104с.

**Егорова Екатерина Геннадьевна** — аспирант факультета информационных технологий и управления Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) (СПбГТИ (ТУ)). Область научных интересов: оперативное управление процессом агломерации. Число научных публикаций — 6. [egorova@energy.spb.ru](mailto:egorova@energy.spb.ru); Московский проспект, д. 26, г. Санкт-Петербург, 190013, РФ; р.т. +7(812)494-9245, факс +7(812)712-7791. Научный руководитель — Л.А.Русинов.

**Egorova Ekaterina Gennadyevna** — the post-graduate student of IT and Control faculty of St. Petersburg State Institute of Technology. Research interests: operational control of sintering process. The number of publications — 6. egorova@energy.spb.ru; 26, Moskovsky Prospect, Saint-Petersburg, 190013, Russia; office phone +7(812)494-9245, fax +7(812)712-7791. The scientific supervisor — L.A.Rusinov.

**Мусаев Александр Азерович** — д.т.н., профессор; ведущий научный сотрудник научно-исследовательской группы информационных технологий в образовании СПИИРАН, научный консультант ОАО Специализированная инжиниринговая компания «Севзапмонтажавтоматика». Область научных интересов: анализ данных, управление и прогнозирование в сложных динамических системах, стохастические хаотические системы. Число научных публикаций — 188. amusaev@szma.com, www.szma.com; СПИИРАН, 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812)350-5885, факс +7 (812)350-1113.

**Musaev Alexander Azerovich** — Dr. in Appl. Math., professor; leading researcher, Education Information Technology Group, SPIIRAS, expert, public corporation Specialized engineering company "Sevzapmontageautomatica". Research interests: data analysis, complicated dynamic systems prognosis and control, stochastic chaos systems. The number of publications — 188. amusaev@szma.com, www.szma.com; SPIIRAS, 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)350-5885, fax +7(812)350-1113.

Рекомендовано ИГИТО СПИИРАН, рук. ктн, доц. А.В. Тишков.  
Статья поступила в редакцию 15.04.2011.

## РЕФЕРАТ

*Егорова Е.Г., Мусаев А.А.* Система диагностики процесса агломерации.

Задачей агломерационного процесса является подготовка высококачественного сырья для доменного производства из концентратов обогащения руд, шламов и других железосодержащих материалов путем спекания их с соответствующим количеством топлива в прочные и пористые куски (агломерат). Эффективность процесса агломерации напрямую зависит от использования различного рода ресурсов, обеспечивающих достижение конкурентно способных технико-экономических показателей и выпуск сертифицированной товарной продукции. Снижение технико-экономических потерь, обусловленных нестабильностью качества агломерата, является задачей разрабатываемой системы диагностики состояния процесса подготовки аглошихты.

Процесс автоматизирован, однако опрос экспертов и анализ регламента позволяет выделить ряд нештатных ситуаций, с которыми система автоматизации не справляется. В основу системы диагностики заложена концепция, заключающаяся в своевременном предупреждении и обнаружении нарушений в ходе процесса спекания агломерата, определении причин этих нарушений и способа их ликвидации. Сформирована двухуровневая нейросетевая диагностическая модель для процесса подготовки аглошихты. Сеть верхнего уровня выполняет задачу распознавания места возникновения нарушения, а сети нижнего уровня производят идентификацию нештатных ситуаций, т.е. выявление причин их вызвавших.

На предварительном этапе работы системы диагностики происходит обработка архивных данных, содержащих динамику развития всех нештатных ситуаций. Полученные данные фильтруются и нормируются. Алгоритм работы системы диагностики процесса подготовки аглошихты включает два этапа: первый этап предварительный — подготовка данных, обучение сети верхнего уровня и обучение по исходным данным сетей нижнего уровня; второй этап основной — собственно диагностика процесса.

Применение разработанной системы диагностики позволяет гарантировать соблюдение такого технологического режима, который обеспечивает достижение заданного качества агломерата, а также достижение максимальной производительности, снижение технико-экономических потерь из-за производства агломерата несоответствующего качества за счет своевременной локализации места возникновения нарушения.

## SUMMARY

*Egorova E.G., Musaev A.A.* **Diagnostic system of sintering process.**

The aim of the agglomeration process is the preparation of high-quality raw materials for blast furnace production of ore concentrates, sludge and other iron-containing materials by sintering them with the appropriate amount of fuel in the rugged and porous chunks (agglomerate). The effectiveness of agglomeration process depends on the use of various resources ensuring the achievement of competitive techno-economic indicators and the issue of certified commercial products. Reduction of technical and economic losses caused by the uneven quality of agglomerate is a task of the developed diagnostic system of the preparation process status of agglomerate.

The process is automated, but a poll of experts and analysis of the regulation allow marking out some abnormal situations, which an automation system can not cope with. The basis of diagnostic system is formed by the concept of timely prevention and detection of faults in the process of agglomerate sintering, determination of causes of these faults and ways of their elimination. Two-tier neural diagnostic model for the agglomerate preparation process is formed. The net of top-level performs the task of fault localization, and nets of lower level produce identification of abnormal situations, in other words identify their causes. At the preliminary stage of the diagnostic system work there is the archival data processing containing the dynamics of all abnormal situations. Then the received data are filtered and normalized.

The diagnostic system algorithm of agglomerate preparation process includes two phases: the first preliminary phase is the data preparation, training of the top-level network and training on the original data of lower level networks, the second basic phase is diagnosis of the process proper.

The use of the developed diagnostic systems allows providing for maintenance of such technological regime that achieves a program quality of the agglomerate and maximizes productivity by the way of reduction of technical and economic loss caused by the production of the agglomerate of inadequate quality with the use of timely localization of the place of the fault.