

*БУТКАРЕВ АЛЕКСЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ, КАНДИДАТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК, ДИРЕКТОР ПО ИННОВАЦИЯМ И СТРАТЕГИЧЕСКОМУ РАЗВИТИЮ ОАО «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ТЕПЛОТЕХНИКИ» (ОАО «ВНИИМТ»)* [BUTKAREV@YANDEX.RU](mailto:BUTKAREV@YANDEX.RU)

## РЕЗЕРВЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЯЧЕГО ДУТЬЯ ЗА СЧЕТ ВНЕДРЕНИЯ ПОДСИСТЕМЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДОМЕННЫМИ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯМИ

*В статье представлены основы построения подсистемы оптимального управления доменными воздухонагревателями, внедрение которой позволяет увеличить температуру горячего дутья не менее чем на 30-40 °С.*

Увеличение температуры нагрева дутья в доменном производстве является одним из эффективных путей сокращения расхода дорогостоящего кокса и улучшения других технико-экономических показателей работы доменных печей. Оценить эффективность работы блока доменных воздухонагревателей, а также определить резервы увеличения температуры горячего дутья можно на основе его теплотехнического обследования. При этом известно, что наряду с совершенствованием конструкции воздухонагревателей (ВН) и насадки, требующей сравнительно высоких капитальных затрат, существенным резервом увеличения температуры горячего дутья и повышения эффективности работы воздухонагревателей является создание современных высокоэффективных автоматизированных систем управления с решением задач оптимального управления процессом получения горячего дутья на основе детерминированных математических моделей.

На основе опыта математического моделирования и разработки оптимальных конструкций доменных воздухонагревателей, в институте ОАО «ВНИИМТ» разработана подсистема оптимального управления – верхний имитационно-оптимизирующий уровень доменных воздухонагревателей (ВИОУ-ВН), позволяющая обеспечить увеличение температуры горячего дутья на 30-40 °С.

При разработке ВИОУ-ВН важнейшими принципами являются:

функционирование в системе управления обобщенной прогнозирующей детерминированной математической модели получения горячего дутья в доменных воздухонагревателях различных конструкций;

автоматическая идентификация параметров модели;

при формировании критериев и постановок задач оптимизации и создании соответствующей модели управления исходили из важнейших для процесса подготовки горячего дутья показателей – температура горячего дутья и расход энергоресурсов, определяющих показатели работы доменного цеха.

### *ОБОБЩЕННАЯ ПРОГНОЗИРУЮЩАЯ ДЕТЕРМИНИРОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ*

Прогнозирующая детерминированная математическая модель, строится на основе законов физики процессов, происходящих в газовой и дутьевой периоды работы воздухонагревателей и включает основные уравнения теплообмена и аэродинамики воздухонагревателей и усилена комплексным дополнением прогнозирующих элементов модели (расхода газа, температуры горячего дутья и пр.), что позволяет:

- с высокой точностью, быстро и надежно определять значения параметров недоступных для прямого измерения (“косвенные измерения”);
- прогнозировать значения показателей (например, температура горячего дутья, удельный расход газа) при изменении значений управляющих параметров.

Обобщенная прогнозирующая детерминированная математическая модель включает в себя следующие компоненты, настраиваемые на конкретные характеристики блока доменных воздухонагревателей (используемый тип и марка насадочного кирпича по высоте доменного ВН насадки и ее отдельные элементы и др.) [1]:

- модель теплообмена воздухонагревателей в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных;
- модель аэродинамики воздухонагревателей;
- модель прогнозирования расхода газа, построенную на основе уравнений теплового и материального балансов процесса горения, параметрически настраиваемую на конкретный вид топлива (доменный, коксовый, природный или смешанный газ) с учетом предельных параметров работы горелочных устройств.

#### *АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ*

Параметрами модели, подлежащими идентификации (поиск реальных коэффициентов уравнений модели) являются наиболее сложные трудно определяемые и часто изменяющиеся величины (коэффициент теплоотдачи, поверхность теплообмена, коэффициенты газодинамического сопротивления, теплофизические характеристики насадки воздухонагревателя). Алгоритмы идентификации построены таким образом, что позволяют в реальном масштабе времени корректировать значения параметров уравнений модели, при меняющейся технологической ситуации на объекте управления.

Тем самым достигается высокая точность прогнозирования показателей и максимальная адекватность модели реальному процессу, что создает условия для эффективного решения задач оптимального управления.

#### *АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ*

Алгоритмы позволяют решить следующие важнейшие задачи оптимального управления технологическим процессом при ограничениях на максимальные и минимальные температуры купола, стыков зон насадки, поднасадочного устройства, скорости нагрева и охлаждения, расходы газа и воздуха на горелочные устройства, времена газового и дутьевого периодов по основному критерию, диктуемому доменным производством:

- максимум температуры горячего дутья;
- минимум затрат на получение дутья заданных параметров;
- максимум экономического эффекта с учетом затрат на нагрев дутья и выгод от повышения температуры дутья

Это позволяет обеспечить необходимые параметры горячего дутья, низкое энергопотребление и долговечность работы оборудования.

Разработанные алгоритмы реализуются на основе прогнозирующей детерминированной математической модели и позволяют в реальном масштабе времени, учитывая текущую технологическую ситуацию на объекте управления, определять такие значения управляющих параметров, при которых достигается максимум температуры горячего дутья или максимум экономического эффекта при технологических ограничениях на значения управляющих параметров.

ВНОУ-ВН функционирует следующим образом (рис. 1).



Рис. № 1. Структура ВНОУ-ВН

Измеряемые значения параметров технологического процесса подаются в прогнозирующую детерминированную математическую модель. Параметры модели постоянно корректируются алгоритмом идентификации. Такая корректировка осуществляется путем минимизации отклонений величин показателей, рассчитанных по модели и соответствующих измеренных величин, с целью обеспечения высокой точности прогнозирования показателей и максимальной адекватности модели реальному процессу.

Адекватная процессу математическая модель рассчитывает и выдает оператору значения параметров процесса, недоступных для прямого измерения (например, температурные поля в насадке (рис. 2), КПД воздухонагревателя, доля вредных перетоков и пр.).

Это так называемые «косвенные измерения», которые позволяют оператору более эффективно управлять технологическим процессом.

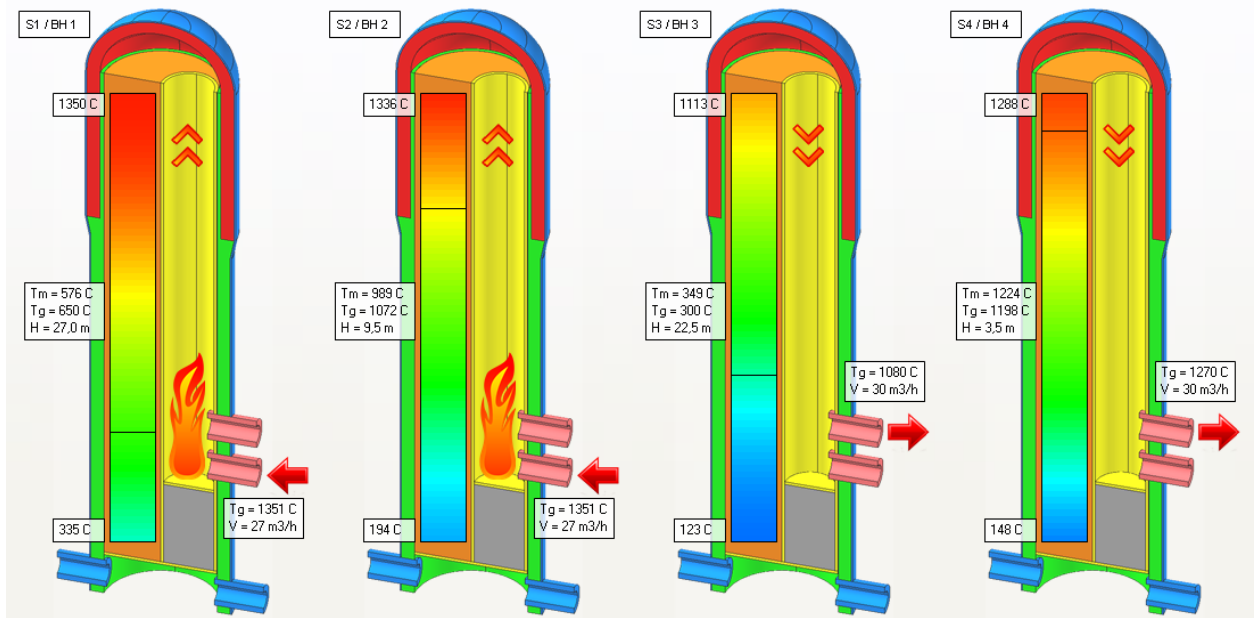


Рис. № 2. Пример работы ВИОУ-ВН

С использованием алгоритма оптимизации и обращением к математической модели рассчитываются в режиме реального времени оптимальные температурно-временные режимы работы ВН в соответствии с заданным критерием оптимизации (максимум температуры горячего дутья), которые, поступая в контуры регулирования, автоматически воздействуют на процесс, оптимизируя работу блока воздухонагревателей (режим работы on-line), либо выдаются в качестве информации (совета) оператору (режим работы off-line).

Технологический процесс получения горячего дутья характеризуется большими колебаниями калорийности доменного газа (до 40 %), различным износом и повреждением воздухонагревателей, включая («короткие замыкания», оплавления и засорение насадки и пр.), сезонными колебаниями температуры воздуха на горение и температуры холодного дутья, влиянием режимов работы воздухонагревателей друг на друга и пр. Это приводит к неполному сгоранию газа и его перерасходу, пониженной температуре купола в газовый период, большим колебаниям максимальных температур в поднасадочном пространстве к концу газового периода и др. В результате блок доменных воздухонагревателей имеет пониженную температуру горячего дутья, а доменный процесс - перерасход дорогостоящего кокса. Поэтому АСУ ТП с подсистемой ВИОУ-ВН включает решение следующих задач:

- максимизация температуры купола в газовый период – в связи с колебаниями химического состава доменного газа и соотношения «газ-воздух»;
- стабилизация соотношения «газ-воздух» в условиях колебания состава газа;
- максимизация температуры горячего дутья путем определение оптимальных температурно-временных режимов работы каждого воздухонагревателя;
- определение оптимального расхода продуктов сгорания и его корректировка с целью достижения предельной температуры в поднасадочном пространстве к концу газового периода;
- косвенные измерения параметров, включая:
  - температурные поля в насадке ВН в различных режимах его работы;
  - КПД ВН;
  - определение доли «коротких замыканий» (вредных перетоков «камера горения-насадка») и др.

В [2] на примере теплотехнического обследования работы блока воздухонагревателей доменной печи (ДП) № 1 ОАО «Челябинский металлургический комбинат» были обоснованы резервы, позволяющие увеличить температуру горячего дутья не менее чем на 30-40 °С, за счет внедрения ВИОУ-ВН путем снижения влияния следующих возмущающих факторов и решения следующих задач:

1. большие колебания калорийности доменного газа (до 44%) требуют непрерывной корректировки соотношения «газ-воздух» с целью поддержания максимальной температуры купола. Такая автоматическая корректировка возможна в случае реализации эффективной АСУ ТП с внедрением ВИОУ-ВН с автоматическим определением оптимального по максимальной температуре купола соотношения «газ-воздух» и его автоматического поддержания.

2. существенным резервом увеличения температуры горячего дутья является максимальный прогрев доменного воздухонагревателя. Работа с пониженными температурами в поднасадочном пространстве (менее предельной температуры 400 °С) приводит к снижению температуры дутья. Превышение же предельной температуры 400 °С недопустимо, так как приводит к снижению срока службы воздухонагревателя.

Использование ВИОУ-ВН позволяет снизить существующие на практике колебания температуры в поднасадочном пространстве в конце газового периода (рис. 3) и увеличить температуру горячего дутья.

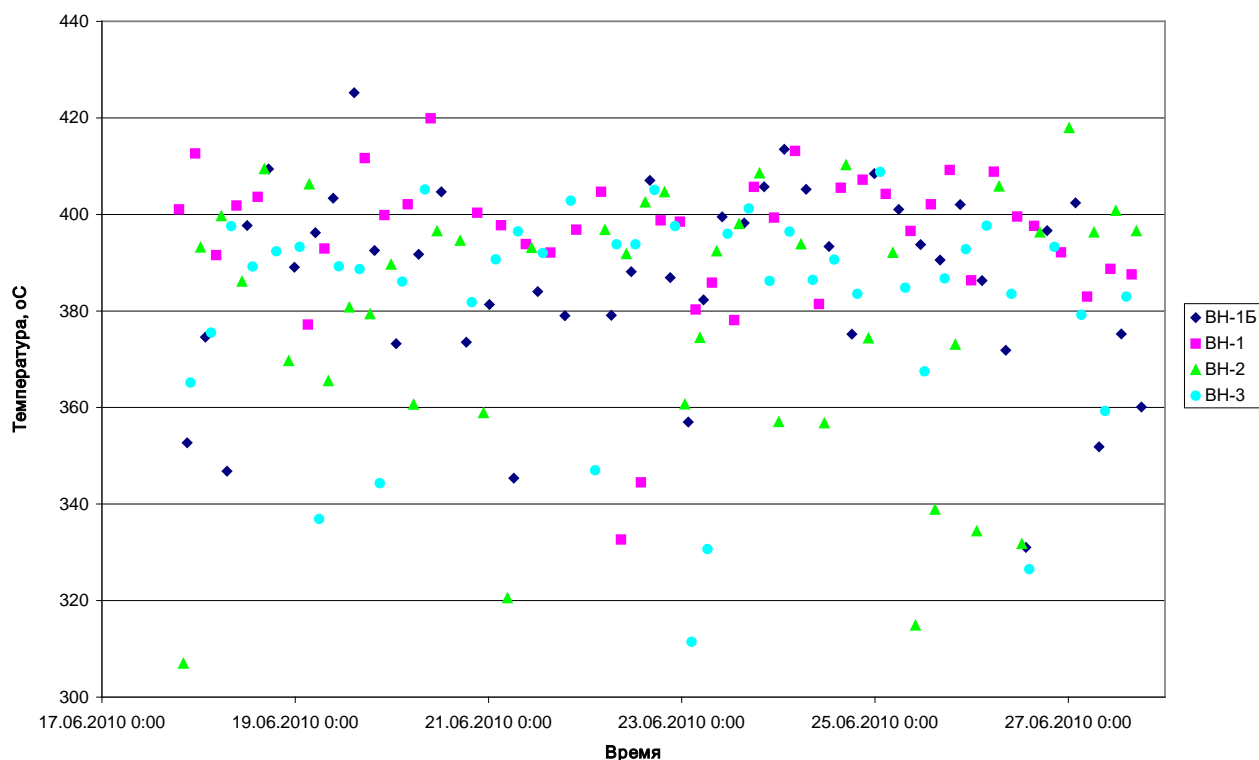


Рис. № 3. Пример температуры отходящих газов в поднасадочном пространстве в конце газового периода

Численные эксперименты, выполненные с использованием математической модели ОАО «ВНИИМТ», показывают, что работа при максимальной температуре в поднасадочном пространстве 400 °С против 380 °С позволит увеличить температуру дутья на 11 °С.

Это достигается, за счет непрерывного (в режиме on-line) определения необходимого количества продуктов сгорания в газовый период, которые необходимо подавать в насадку ВН для того, чтобы к концу газового периода обеспечить предельную температуру 400 °С в поднасадочном пространстве, с учетом текущей производственной ситуации и состояния конкретного ВН и блока в целом.

Таким образом, внедрение высокоэффективной АСУ ТП с подсистемой «Верхний имитационно-оптимизирующий уровень доменных воздухонагревателей», разработанной в ОАО «ВНИИМТ» позволит оперативно с минимальными затратами увеличить температуру горячего дутья не менее, чем на 30-40 °С. Конкретные значения увеличения температуры горячего дутья и оценка экономической эффективности для конкретного блока доменных воздухонагревателей могут быть определены в результате проведения комплексного теплотехнического обследования по методике ОАО «ВНИИМТ».

### Список литературы

1. Shklyar, F.R., Malkin, V.M., Kashtanova, S.P., et al., *Domennye vozdukhonagrevateli (konstruktsii, teoriya, rezhimy raboty)* [Hot blast stoves: Design, Theory, Operation], Moscow: Metallurgiya, 1982, 176 p.
2. Butkarev A.A., Butkarev A.P., Ptichnikov A.G., Tumanov V.P. An increase the temperature of hot blast of blast-furnace stoves with the help of the optimal control subsystem. *Stal* [Steel], 2015, no. 5, pp. 28-34.

### Контактная информация

Данная статья была опубликована в сборник статей IX международного конгресса доменщиков: «Металлургия чугуна. Перспективы развития до 2025 года», проходившего 25-27 сентября 2018 года в г. Нижний Тагил.

Если вас заинтересовала информация, приведенная в данной статье, свяжитесь с нами по следующим координатам:

ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ»)

620137, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, д. 16

Директор по инновациям и стратегическому развитию

Буткарев Алексей Анатольевич

Тел. +7 (343) 383-75-81

Email: [butkarev@yandex.ru](mailto:butkarev@yandex.ru)    [aup@vniimt.ru](mailto:aup@vniimt.ru)