

## **ОТЗЫВ**

*официального оппонента на диссертационную работу Гнитиева Павла Александровича на тему «Совершенствование технологических и конструктивных параметров процессов воздушного охлаждения металла в камерных печах», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика.*

### **1. Актуальность темы**

В настоящее время контроль за процессом воздушного охлаждения в печах осуществляется посредственно, что влечет за собой снижение качества выпускаемой продукции, а также перерасход электроэнергии.

Механизм охлаждения заготовок в сложных условиях воздушного обтекания исследован недостаточно. Исследование механизма теплосъема с металла с учетом доли конвективной и лучистой составляющих при тепловой обработке металла в печи безусловно представляет научный и практический интерес. В литературе отсутствуют общепринятые инженерные методики проектного расчета элементов технологии воздушного охлаждения для правильного выбора нагнетающих устройств. В связи с этим тема диссертационного исследования является актуальной.

### **2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций**

Работа состоит из четырех глав, основных выводов, списка использованных источников и трех приложений.

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость результатов, личный вклад соискателя и приведены сведения о научных публикациях и об апробации результатов диссертации.

**В первой главе** представлен аналитический обзор технологий термической обработки металлов. Показана эволюция и важность воздушного охлаждения на качество и свойства обрабатываемых заготовок. Рассмотрен основной способ контроля за процессом термической обработки в печах – «метод термограмм». Проанализированы существующие способы расчета воздушного охлаждения. Обосновано, что имеющиеся методики расчета



обладают некоторой условностью при выборе коэффициента конвективной теплоотдачи от металла к охлаждающему воздуху. Показана необходимость в получении критериальных уравнений, описывающих теплообмен при различных схемах натекания воздуха.

**Во второй главе** приводится математическая формулировка задачи. Показано, что основная сложность при моделировании заключается в корректном задании граничных условий. Обосновано, что для поиска коэффициента конвективной теплоотдачи от металла к охлаждающему воздуху необходимо проводить физическое моделирование в геометрически подобной камерной печи. Для решения математической модели выбран конечно-разностный метод и неявная схема аппроксимации с целью получения безусловно устойчивого решения. Выполнена постановка задачи математического моделирования технологии воздушного охлаждения металла в камерной печи. Обосновано, что применительно к данной технологии допустимо и целесообразно рассматривать уравнение нестационарной теплопроводности в одномерном виде. Подробно описана методика проведения физического эксперимента по установлению критериальных уравнений и коэффициентов конвективной теплоотдачи, при этом выбран оригинальный способ определения характерной скорости воздуха для расчета критериального числа Рейнольдса, основанный на определении средней скорости воздуха в каждый момент времени на основании теории турбулентных струй Г.Н. Абрамовича. Представлена методика оценки погрешности косвенного измерения коэффициента конвективной теплоотдачи.

**В третьей главе** приведены результаты физического моделирования по исследованию тел кубической формы, получено критериальное уравнение со степенью при Рейнольдсе 0,62 и множителем уравнения 0,14. Аналогичным образом, согласно методике проведения эксперимента, исследован процесс воздушного обдува цилиндрического тела. В данном случае средняя скорость взята как средняя скорость по сечению на расстоянии удаления оси цилиндра от сопла истечения. Полученное критериальное уравнение характеризуется показателем степени при  $Re$  равном 0,5 и множителе уравнения 1,49. Экспериментально полученные коэффициенты конвективной теплоотдачи для двустороннего режима обдува сравнивались соответствующими коэффициентами, полученными для аналогичных условий, используя традиционное критериальное уравнение, описывающее односторонний обдув



тел. Результаты справедливо соотносятся. Полученные критериальные уравнения позволят с большей точностью описывать конвективную составляющую теплообмена при воздушном охлаждении в математической модели.

Приведены результаты математического моделирования, которые позволили установить доли конвективной и лучистой составляющих в общем количестве тепла, снимаемого с металла; исследовать влияние параметров футеровки на длительность воздушного охлаждения металла в камерных печах. На основании полученных результатов автором отмечено закономерное ускорение воздушного охлаждения при использовании керамоволокнистого покрытия на стенах и своде в среднем на 31-45% при сравнении длительности операции, проводимых в печи футерованной шамотным огнеупором. При сравнении полностью керамоволокнистой и шамотной футеровок сокращение длительности воздушного охлаждения находится в диапазоне 44-52% в зависимости от расхода воздуха и массы садки печи.

Проведенные автором исследования по количественному влиянию параметров футеровки на длительность процесса охлаждения позволили оценить необходимость в применении керамоволокна в качестве покрытия подины печи.

**В четвертой главе** автор проводит теплотехнический анализ различных способов интенсификации конвективного теплообмена при воздушном охлаждении металла в камерных печах. Данный анализ наглядно показывает недостаточную энергетическую эффективность наиболее распространенного способа, связанного с увеличением расхода воздуха, в сравнении с подачей воздуха с дополнительной пульсацией потока. Показано, что более эффективным способом интенсификации является подача воздуха в пульсирующем режиме. Для получения значений коэффициентов конвективной теплоотдачи в условиях подачи воздуха с дополнительными пульсациями автором проведено аналогичное исследование на физической модели при воздушном обдуве тела цилиндрической формы с последующим получением критериального уравнения. Показана интенсификация процесса конвективного теплообмена на уровне 17%.

Приведена методика определения коэффициента местного сопротивления нестандартных вращающихся заслонок и методика проектного расчета



воздушного охлаждения. Данные методики безусловно будут полезны при проектировании и проведении реконструкции камерных печей.

Выводы автора справедливо согласуются с результатами, полученными другими исследователями.

### **3. Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций**

Достоверность положений и выводов подтверждается корректным использованием теорий турбулентных струй, обработки результатов инженерного эксперимента и подобия физических процессов при получении критериальных уравнений, анализом погрешностей измерений, современных методов математического моделирования, а также достаточной согласованностью полученных результатов с производственными данными (погрешность до 5%).

**Научная новизна** диссертации не вызывает сомнений и определяется следующими положениями:

- получены критериальные уравнения, описывающие конвективный теплообмен в камерных печах для тел кубической и цилиндрической формы при  $Re > 3000$ ;

- систематизированы представления о влиянии параметров футеровки на длительность воздушного охлаждения металла в печах;

- установлено, что при создании дополнительных пульсаций потока при помощи вращающейся заслонки коэффициент конвективного теплообмена усиливается в среднем на 17%;

- определено значение коэффициента местного сопротивления нестандартной вращающейся заслонки неполного перекрытия. Установлено, что при 87 % перекрытия канала  $K_{мс}$  заслонки в процессе ее вращения составляет порядка 21.

**Практическая значимость** результатов диссертационного исследования заключается в создании энергоресурсосберегающей технологии воздушного охлаждения металла в камерных печах за счет создания дополнительных пульсаций воздуха при помощи вращающейся заслонки в воздушном коллекторе; разработан способ определения среднего по поверхности обдуваемых тел коэффициента конвективной теплоотдачи, различной геометрической формы; предложена инженерная методика проектного расчета



процесса воздушного охлаждения с целью определения требуемого расхода воздуха для поддержания заданной скорости охлаждения; определены пути совершенствования и оптимизации технологии интенсификации теплообмена при воздушном обдуве металла.

#### 4. Основные замечания по работе

1. Некорректно использовать термин «безимпульсный режим» течения воздуха, поскольку практически любой поток обладает импульсом.
2. В работе (стр. 47) не достаточно обоснованы положения, позволяющие пренебречь продольным и радиальным тепловыми потоками при переходе к одномерной задаче.
3. При постановке задачи математического моделирования заложены граничные условия 1-го рода для условий теплообмена внешней стенки печи с воздухом, что ставит жесткие условия фиксации температуры и делает задачу консервативной.
4. Считаю целесообразным проводить решение сквозной задачи теплообмена для системы «футеровка – воздушная среда печной камеры – стальные заготовки».
5. Не до конца раскрыт физический механизм интенсификации конвективного теплообмена при воздушном охлаждении тел в импульсном режиме с использованием вращающейся заслонки в воздушном патрубке.
6. В работе не проведено сравнение результатов математического моделирования влияния параметров футеровки на длительность процесса охлаждения с результатами других авторов.
7. Читателю не ясно приведен ли доверительный интервал на экспериментально полученных кривых.
8. Присутствуют грамматические и орфографические ошибки. Например, на странице 34 первое предложение последнего абзаца не согласовано. Здесь же для одного и того же диапазона критерия Рейнольдса приведены различные условия обтекания. В приведенных критериальных уравнениях индексы при числе Прандтля представлены как позицией «с» так и «ст», а в некоторых уравнениях (стр. 36, 37, 110, 112, 130, 132) индекс и вовсе отсутствует. В формуле (2.11) при рассмотрении коэффициента конвективной теплоотдачи от металла к воздуху некорректно использовать индекс «ф», относящийся к футеровке.



9. На странице 53 отсутствует расшифровка температур в формуле. В расшифровке величин, входящих в формулу (2.16) присутствуют лишние значения. Отсутствует нумерация выводов к разделу 1.

## 5. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным

Несмотря на приведенные замечания диссертация Гнителиева П.А. «Совершенствование технологических и конструктивных параметров процессов воздушного охлаждения металла в камерных печах» является законченной научно-квалификационной работой, в которой представлено решение актуальной научно-практической задачи повышения точности поддержания заданного теплового состояния металла, увеличения производительности печи, интенсификации конвективного теплообмена в камерных печах. Данные результаты являются востребованными для машиностроительных предприятий и металлургической промышленности.

Диссертация Гнителиева П.А. соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям и паспорту научной специальности, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика.

Официальный оппонент  
профессор кафедры физики неравновесных  
процессов, метрологии и экологии,  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,  
д.т.н., профессор,  
83001, г. Донецк, ул. Университетская, 24,  
+38 (062) 302-06-00  
donnu.canc@mail.ru  
<http://donnu.ru/>

Недопекин Федор Викторович



УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ

М.Н. МИХАЛЬЧЕНКО