



С. П. Еронько  
Е. В. Ошовская  
М. Ю. Ткачев  
С. А. Бедарев  
Б. И. Стародубцев



# ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

«Инфра-Инженерия» 

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*Учебное пособие*

Москва    Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2021

УДК 669.18.013  
ББК 34.327  
Ф50

*Рекомендовано ученым советом Донецкого национального  
технического университета в качестве учебного пособия  
для обучающихся образовательных учреждений  
высшего профессионального образования*

**Авторы:**

*С. П. Еронько, Е. В. Ошовская, М. Ю. Ткачев,  
С. А. Бедарев, Б. И. Стародубцев*

**Рецензенты:**

доктор технических наук, заведующий кафедрой наземных транспортно-технологических комплексов и средств Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (г. Макеевка) *Пенчук Валентин Алексеевич;*

доктор технических наук, профессор кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии Донецкого национального университета (г. Донецк) *Недопекин Федор Викторович;*

доктор технических наук, профессор кафедры основ проектирования машин Донецкого национального технического университета (г. Донецк) *Ченцов Николай Александрович*

**Ф50 Физическое моделирование технических систем сталеплавильного производства** : учебное пособие / [С. П. Еронько и др.]. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 324 с. : ил., табл.  
ISBN 978-5-9729-0699-4

Изложены основы теории подобия и практические аспекты ее использования при физическом моделировании в процессе разработки передовых технологий металлургического производства и механического оборудования для их реализации. Приведены практические примеры решения различных задач, связанных с повышением эффективности создаваемых и находящихся в эксплуатации металлургических машин и агрегатов. Описаны оригинальные методики проведения лабораторных экспериментов и применяемая при этом контрольно-измерительная аппаратура.

Для студентов технических специальностей высших учебных заведений, аспирантов и молодых специалистов.

УДК 669.18.013  
ББК 34.327

ISBN 978-5-9729-0699-4

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021  
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	6
<b>РАЗДЕЛ I</b>	
<b>ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ</b> .....	8
<b>ГЛАВА 1. Общая характеристика металлургических процессов и оборудования для их реализации</b> .....	8
1.1. Особенности развития металлургического производства в современных условиях .....	8
1.2. Особенности физических процессов, протекающих при выплавке, внепечной обработке и разливке стали .....	10
1.3. Методы изучения металлургических процессов и оборудования .....	15
<b>ГЛАВА 2. Физическое моделирование как метод исследования металлургических процессов и технологического оборудования</b> .....	17
2.1. Краткие сведения из теории подобия .....	17
2.2. Критерии подобия .....	19
2.3. Метод анализа размерностей .....	21
2.4. Основные этапы физического моделирования .....	23
<b>ГЛАВА 3. Практические особенности физического моделирования</b> .....	26
3.1. Выбор масштаба, конструкции и материала модели .....	26
3.2. Моделирующие среды .....	28
3.3. Визуализация жидкостных и газовых потоков .....	29
3.4. Видео- и фотосъемка при проведении экспериментов .....	31
3.5. Организация рабочего места и техника безопасности при модельных исследованиях .....	32
<b>ГЛАВА 4. Контрольно-измерительные средства и аппаратура</b> .....	34
4.1. Сущность процесса измерения, термины и определения .....	34
4.2. Виды и методы измерений .....	35
4.3. Типы измерительных преобразователей .....	36
4.4. Устройства регистрации измерительной информации .....	42
<b>ГЛАВА 5. Методы исследования напряженно-деформированного состояния деталей металлургических машин</b> .....	45
5.1. Метод сеток .....	45
5.2. Метод муаровых полос .....	46
5.3. Метод хрупких покрытий .....	46
5.4. Поляризационно-оптический метод .....	47

5.5. Электротензометрический метод .....	47
<b>ГЛАВА 6. Методы исследования газо-гидродинамических процессов.....</b>	<b>50</b>
6.1. Методы определения времени гомогенизации модельной жидкости .....	50
6.2. Методы измерения скорости газовых и жидкостных потоков.....	57
6.3. Методы определения коэффициента рециркуляции .....	64
6.4. Контроль газосодержания барботируемой жидкости .....	68
6.5. Контроль давления .....	71
6.6. Контроль вязкости жидкостей .....	73
6.7. Способы измерения температуры .....	77
<b>ГЛАВА 7. Математическое обеспечение физического моделирования .....</b>	<b>84</b>
7.1. Планирование эксперимента .....	84
7.2. Оценка погрешности полученных результатов.....	93
7.3. Представление результатов экспериментов .....	97
7.4. Программные средства, применяемые при физическом моделировании .....	105
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>107</b>

## **РАЗДЕЛ II**

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ И РАЗРАБОТКЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА .....**

.....	110
<b>ГЛАВА 8. Моделирование процессов подготовки материалов к плавлению .....</b>	<b>110</b>
8.1. Моделирование работы зубчатой дробилки .....	110
8.2. Моделирование процесса окускования мелкодисперсного материала на двухвалковом брикетном прессе .....	122
<b>ГЛАВА 9. Моделирование работы структурных механизмов кислородного конвертера с вращающимся корпусом относительно наклонной продольной оси .....</b>	<b>134</b>
9.1. Моделирование условий работы механизма вращения корпуса конвертера относительно наклонной продольной оси .....	134
9.2. Моделирование функционирования комбинированного привода механизма качания фурмы для вдувания порошкообразных реагентов в ванну конвертера .....	146
9.3. Модельные исследования работы системы донной продувки расплава в конвертере .....	158
<b>ГЛАВА 10. Моделирование процесса отсечки конечного технологического шлака при выпуске стали из кислородного конвертера в разливочный ковш .....</b>	<b>169</b>

10.1. Основные способы удержания шлака в кислородном конвертере во время выпуска стали и их сравнительный анализ .....	169
10.2. Физическое моделирование процесса отсечки конвертерного шлака с помощью элементов поплавкового типа .....	183
10.3. Модельные исследования на физической модели параметров системы газодинамической отсечки конечного шлака при выпуске стали из кислородного конвертера .....	203
<b>ГЛАВА 11. Исследование параметров работы системы перелива стали из разливноковша в промежуточный .....</b>	<b>222</b>
11.1. Модельные исследования влияния вибрационного воздействия на процесс затягивания канала шибберного затвора сталеразливочного ковша .....	222
11.2. Исследование на физической модели работы манипулятора для замены огнеупорных труб, экранирующих струю стали при ее переливе из разливочного ковша в промежуточный ковш .....	233
<b>ГЛАВА 12. Исследование на физических моделях параметров работы разливочных систем промежуточного ковша сортовой МНЛЗ .....</b>	<b>245</b>
12.1. Моделирование функционирования устройств быстрой замены стаканов-дозаторов промежуточных ковшей сортовых МНЛЗ .....	245
12.2. Модельные исследования работы устройства аварийного закрытия сталевыпускного канала промежуточного ковша .....	256
<b>ГЛАВА 13. Модельные исследования условий работы разливочной системы промежуточного ковша слябовой МНЛЗ .....</b>	<b>266</b>
13.1. Исследование на физической модели влияния условий проведения замены погружных стаканов на гидродинамику потоков металла в кристаллизаторе .....	266
13.2. Моделирование функционирования системы быстрой смены погружного стакана на слябовой МНЛЗ .....	279
13.3. Модельные исследования параметров работы 3-х плитного затвора, снабженного системой быстрой смены погружных стаканов .....	289
<b>ГЛАВА 14. Исследование эффективных систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы слябовой МНЛЗ .....</b>	<b>300</b>
14.1. Изучение на действующей модели функционирования механизмов установки для ввода шлакообразующих смесей в кристаллизатор слябовой МНЛЗ .....	300
14.2. Моделирование работы системы механизированной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор МНЛЗ для отливки слябовых заготовок особо крупного сечения .....	312