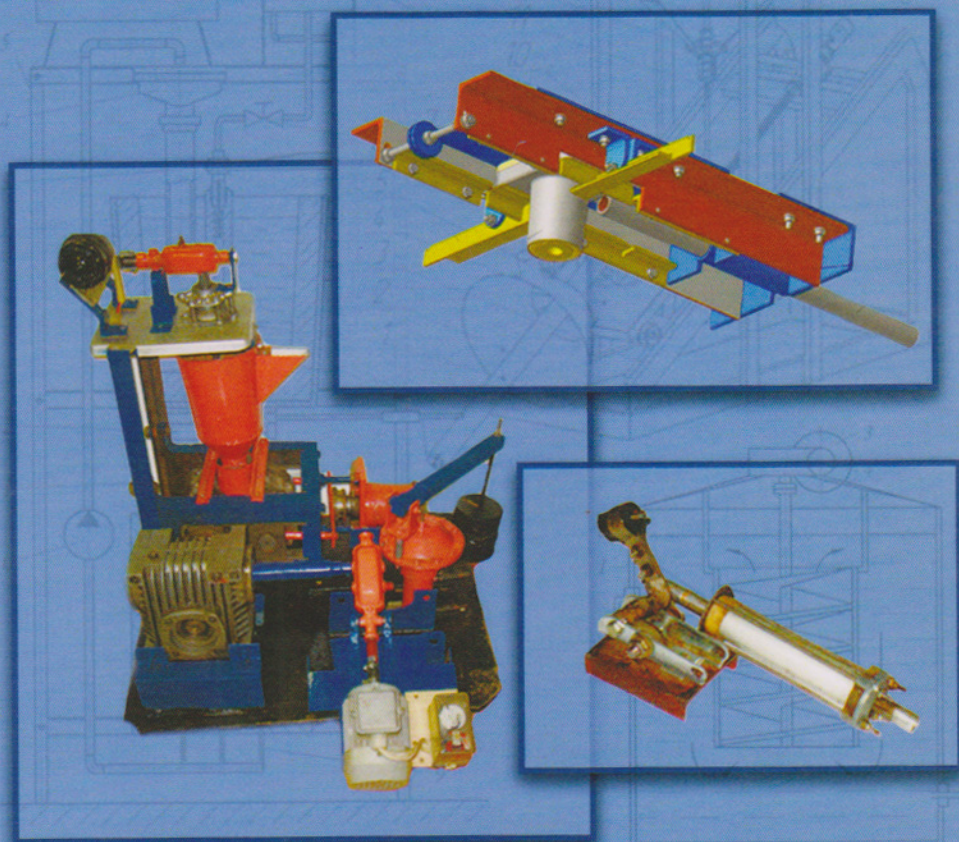


С.П.ЕРОНЬКО, Е.В.ОШОВСКАЯ, М.Ю.ТКАЧЕВ,  
С.А.БЕДАРЕВ, Б.И.СТАРОДУБЦЕВ

669.08  
950

# ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

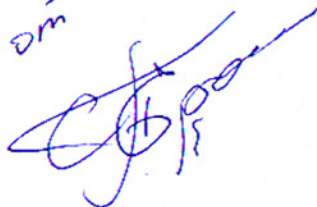
УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ



С.П. ЕРОНЬКО, Е.В. ОШОВСКАЯ, М.Ю. ТКАЧЕВ, С.А. БЕДАРЕВ,  
Б.И. СТАРОДУБЦЕВ

# ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Библиотеке  
разного вида от  
авторов  
10.08.2020



66908  
950  
УДК 669.002.5:53.07(075.8)

ББК 65.304.12:22.3я73

Ф50

669.08(075.8)  
ОБЯЗАТЕЛЬНЫЙ ЭКЗ.

Рекомендовано Ученым советом  
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИ-  
ТЕТ» в качестве учебного пособия для обучающихся образовательных уч-  
реждений высшего профессионального образования  
(Протокол № 2 от 26.06.2020 г.)

**Рецензенты:**

**Пенчук Валентин Алексеевич** - доктор технических наук, заведующий кафедрой «Наземные транспортно-технологические комплексы и средства» ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» (г. Макеевка).

**Недопекин Федор Викторович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Физика неравновесных процессов, метрология и экология» ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет» (г. Донецк).

**Ченцов Николай Александрович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Основы проектирования машин» ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (г. Донецк).

1426044  
Ф50 Физическое моделирование технических систем: учеб. пособие / С. П. Еронько [и др.]; ГОУВПО «ДОННТУ». – Донецк: ДОННТУ, 2020. – 259 с.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
БИБЛИОТЕКА  
ДОННТУ

В учебном пособии 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 ученых.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....                                                                                                               | 5  |
| <b>РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ<br/>ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ</b> .....                                       | 6  |
| <b>ГЛАВА 1.</b> Общая характеристика металлургических<br>процессов и оборудования для их реализации .....                           | 6  |
| 1.1. Особенности развития металлургического производства в современных условиях ...                                                 | 6  |
| 1.2. Особенности физических процессов, протекающих при выплавке,<br>внепечной обработке и разливе стали .....                       | 7  |
| 1.3. Методы изучения металлургических процессов и оборудования .....                                                                | 11 |
| <b>ГЛАВА 2.</b> Физическое моделирование как метод исследования<br>металлургических процессов и технологического оборудования ..... | 13 |
| 2.1. Краткие сведения из теории подобия .....                                                                                       | 13 |
| 2.2. Критерии подобия .....                                                                                                         | 14 |
| 2.3. Метод анализа размерностей .....                                                                                               | 16 |
| 2.4. Основные этапы физического моделирования .....                                                                                 | 18 |
| <b>ГЛАВА 3.</b> Практические особенности физического моделирования .....                                                            | 20 |
| 3.1. Выбор масштаба, конструкции и материала модели .....                                                                           | 20 |
| 3.2. Моделирующие среды .....                                                                                                       | 21 |
| 3.3. Визуализация жидкостных и газовых потоков .....                                                                                | 22 |
| 3.4. Видео- и фотосъемка при проведении экспериментов .....                                                                         | 23 |
| 3.5. Организация рабочего места и техника безопасности при модельных<br>исследованиях .....                                         | 24 |
| <b>ГЛАВА 4.</b> Контрольно-измерительные средства и аппаратура .....                                                                | 26 |
| 4.1. Сущность процесса измерения, термины и определения .....                                                                       | 26 |
| 4.2. Виды и методы измерений .....                                                                                                  | 27 |
| 4.3. Типы измерительных преобразователей .....                                                                                      | 28 |
| 4.4. Устройства регистрации измерительной информации .....                                                                          | 32 |
| <b>ГЛАВА 5.</b> Методы исследования напряженно-деформированного состояния<br>деталей металлургических машин .....                   | 35 |
| 5.1. Метод сеток .....                                                                                                              | 35 |
| 5.2. Метод муаровых полос .....                                                                                                     | 35 |
| 5.3. Метод хрупких покрытий .....                                                                                                   | 36 |
| 5.4. Поляризационно-оптический метод .....                                                                                          | 36 |
| 5.5. Электротензометрический метод .....                                                                                            | 37 |
| <b>ГЛАВА 6.</b> Методы исследования газо- гидродинамических процессов .....                                                         | 39 |
| 6.1. Методы определения времени гомогенизации модельной жидкости .....                                                              | 39 |
| 6.2. Методы измерения скорости газовых и жидкостных потоков .....                                                                   | 44 |
| 6.3. Методы определения коэффициента рециркуляции .....                                                                             | 50 |
| 6.4. Контроль газосодержания барботируемой жидкости .....                                                                           | 54 |
| 6.5. Контроль давления .....                                                                                                        | 56 |
| 6.6. Контроль вязкости жидкостей .....                                                                                              | 57 |
| 6.7. Способы измерения температуры .....                                                                                            | 61 |
| <b>ГЛАВА 7.</b> Математическое обеспечение физического моделирования .....                                                          | 66 |
| 7.1. Планирование эксперимента .....                                                                                                | 66 |
| 7.2. Оценка погрешности полученных результатов .....                                                                                | 73 |
| 7.3. Представление результатов экспериментов .....                                                                                  | 76 |
| 7.4. Программные средства, применяемые при физическом моделировании .....                                                           | 83 |
| <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.</b> .....                                                                                                     | 85 |

|                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>РАЗДЕЛ ВТОРОЙ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ И РАЗРАБОТКЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ СТАЛЕПЛАВЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА</b>              | 87  |
| <b>ГЛАВА 8. Моделирование процессов подготовки материалов к плавлению</b>                                                                                                    | 87  |
| 8.1. Моделирование работы зубчатой дробилки                                                                                                                                  | 87  |
| 8.2. Моделирование процесса окускования мелкодисперсного материала на двухвалковом брикетном прессе                                                                          | 96  |
| <b>ГЛАВА 9. Моделирование работы структурных механизмов кислородного конвертера с вращающимся корпусом относительно наклонной продольной оси</b>                             | 106 |
| 9.1. Моделирование условий работы механизма вращения корпуса конвертера относительно наклонной продольной оси                                                                | 106 |
| 9.2. Моделирование функционирования комбинированного привода механизма качания фурмы для вдувания порошкообразных реагентов в ванну конвертера                               | 115 |
| 9.3. Модельные исследования работы системы донной продувки расплава в конвертере                                                                                             | 125 |
| <b>ГЛАВА 10. Моделирование процесса отсечки конечного технологического шлака при выпуске стали из кислородного конвертера в разливочный ковш</b>                             | 135 |
| 10.1. Основные способы удержания шлака в кислородном конвертере во время выпуска стали и их сравнительный анализ                                                             | 135 |
| 10.2. Физическое моделирование процесса отсечки конвертерного шлака с помощью элементов поплавокотипа                                                                        | 146 |
| 10.3. Модельные исследования на физической модели параметров системы газодинамической отсечки конечного шлака при выпуске стали из кислородного конвертера                   | 169 |
| <b>ГЛАВА 11. Исследование параметров работы системы перелива стали из разливочного ковша в промежуточный</b>                                                                 | 179 |
| 11.1. Модельные исследования влияния вибрационного воздействия на процесс затягивания канала пинберного затвора сталеразливочного ковша                                      | 179 |
| 11.2. Исследование на физической модели работы манипулятора для замены огнеупорных труб, экранирующих струю стали при ее переливе из разливочного ковша в промежуточный ковш | 187 |
| <b>ГЛАВА 12. Исследование на физических моделях параметров работы разливочных систем промежуточного ковша сортовой МНЛЗ</b>                                                  | 198 |
| 12.1. Моделирование функционирования устройств быстрой замены стаканов-дозаторов промежуточных ковшей сортовых МНЛЗ                                                          | 198 |
| 12.2. Модельные исследования работы устройства аварийного закрытия сталевыпускного канала промежуточного ковша                                                               | 206 |
| <b>ГЛАВА 13. Модельные исследования условий работы разливочной системы промежуточного ковша слябовой МНЛЗ</b>                                                                | 215 |
| Исследование на физической модели влияния условий проведения замены погружных стаканов на гидродинамику потоков металла в кристаллизаторе                                    | 215 |
| 13.2. Моделирование функционирования системы быстрой смены погружного стакана на слябовой МНЛЗ                                                                               | 226 |
| 13.3. Модельные исследования параметров работы 3-х плитного затвора, снабженного системой быстрой смены погружных стаканов                                                   | 234 |
| <b>ГЛАВА 14. Исследование эффективных систем механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизаторы слябовой МНЛЗ</b>                                              | 243 |
| 14.1. Изучение на действующей модели функционирования механизмов установки для ввода шлакообразующих смесей в кристаллизатор слябовой МНЛЗ                                   | 243 |
| 14.2. Моделирование работы системы механизированной подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор МНЛЗ для отливки слябовых заготовок особо крупного сечения                 | 252 |