

Пахомов В.С., Шевченко А.А.

ХИМИЧЕСКОЕ  
СОПРОТИВЛЕНИЕ  
МАТЕРИАЛОВ  
И ЗАЩИТА  
ОТ КОРРОЗИИ

2-е издание

В. С. Пахомов,  
А. А. Шевченко

# ХИМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ И ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ

*2-е издание, дополненное и расширенное*

*Допущено Учебно-методическим объединением по образованию в области химической технологии и биотехнологии в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Машины и аппараты химических производств»*

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
**ПРОФЕССИЯ**

Санкт-Петербург  
2016

ЦЕНТР  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ  
ПРОГРАММ  
**ПРОФЕССИЯ**

УДК 620.193:66(075.8)

ББК 34.663я73

П12

*Рецензенты:* кафедра «Материаловедение и защита от коррозии» Российского государственного химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева (зав. кафедрой – докт. хим. наук, проф. *Т. А. Ваграмян*); зав. лабораторией Института физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН докт. техн. наук *В. А. Головин*

**П12 Пахомов В. С.** Химическое сопротивление материалов и защита от коррозии / В. С. Пахомов, А. А. Шевченко. – 2-е изд., доп. и расш. – СПб. : ЦОП «Профессия», 2016. – 480 с., ил.

ISBN 978-5-91884-076-4

Первое за последние сорок лет учебное пособие, содержащее современные представления о механизмах и кинетике взаимодействия металлических и неметаллических материалов с агрессивными средами. Приведены сведения о химическом сопротивлении, номенклатуре и эксплуатационных свойствах конструкционных материалов, а также о применении их в качестве защитных покрытий технологического оборудования. Специальная глава посвящена проектированию и расчетам футерованных аппаратов.

Предназначено для студентов вузов по специальностям «Машины и аппараты химических производств», «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов», «Инженерная защита окружающей среды», может быть полезно инженерно-техническим работникам, занимающимся проектированием, эксплуатацией и ремонтом оборудования для работы в агрессивных средах.

ББК 34.663я73

УДК 620.193:66(075.8)

ISBN 978-5-91884-076-4

© В. С. Пахомов, А. А. Шевченко, 2016

© ЦОП «Профессия», 2016

© Оформление: ЦОП «Профессия», 2016

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

<i>Предисловие</i> .....	9
<i>Введение</i> .....	12
1. Определение понятий «коррозия металлов» и «химическая стойкость неметаллических материалов» .....	12
2. Значение борьбы с коррозией .....	13
3. Классификация разрушения материалов под действием агрессивных сред .....	16
4. Количественная оценка коррозионного разрушения материалов .....	20
<b>Раздел I. КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ</b> .....	25
<b>Часть 1. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ</b> .....	25
<b>Глава 1. Основы теории электрохимической коррозии</b> .....	25
1.1. Процессы на границе металл—раствор .....	25
1.2. Равновесные электродные системы .....	28
1.3. Коррозия как неравновесный процесс .....	30
1.4. Механизм электрохимической коррозии .....	32
1.5. Термодинамика электрохимической коррозии .....	36
1.6. Общая кинетика электрохимической коррозии .....	38
1.7. Влияние электродного потенциала на скорость коррозии .....	43
1.8. Контролирующая стадия .....	48
1.9. Коррозия при восстановлении катионов водорода .....	51
1.10. Коррозия при восстановлении кислорода .....	56
1.11. Коррозия при восстановлении нескольких окислителей .....	62
1.12. Пассивность металлов .....	63
1.13. Нарушение пассивного состояния .....	69
1.13.1. Перепассивация .....	69
1.13.2. Локальная анодная активация .....	70
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	74
<b>Глава 2. Влияние внутренних факторов на коррозионное поведение металлов</b> .....	75
2.1. Природа металла .....	75
2.2. Содержание легирующих элементов в сплаве .....	76
2.3. Структура сплава .....	78
2.4. Состояние и обработка поверхности .....	81
2.5. Механические напряжения .....	82
2.5.1. Общая коррозия напряженного металла .....	82
2.5.2. Коррозионное растрескивание .....	83
2.5.3. Коррозионная усталость .....	88
2.5.4. Коррозионная кавитация .....	91
2.5.5. Коррозионная эрозия .....	93
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	95

Глава 3. Влияние внешних факторов на коррозионное поведение металлов .....	95
3.1. Состав и характер (pH) агрессивной среды .....	95
3.2. Температура .....	99
3.3. Теплопередача .....	102
3.4. Давление .....	104
3.5. Скорость и характер движения среды .....	104
3.6. Контакт нескольких металлов .....	106
3.7. Контакт металлов с неметаллическими материалами .....	108
Контрольные вопросы и задания .....	109
<b>Часть 2. ХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ .....</b>	<b>111</b>
Глава 4. Газовая коррозия металлов .....	111
4.1. Механизм газовой коррозии .....	112
4.2. Термодинамика газовой коррозии .....	115
4.3. Общая кинетика газовой коррозии .....	117
Контрольные вопросы и задания .....	119
Глава 5. Влияние внутренних факторов на газовую коррозию металлов .....	120
5.1. Состав сплава .....	120
5.2. Структура сплава .....	122
5.3. Механические напряжения и деформация металла .....	123
5.4. Обработка поверхности .....	124
Контрольные вопросы и задания .....	125
Глава 6. Влияние внешних факторов на газовую коррозию металлов .....	125
6.1. Состав среды .....	125
6.2. Температура .....	131
6.3. Давление .....	132
6.4. Скорость движения среды .....	133
Контрольные вопросы и задания .....	133
Глава 7. Химическая коррозия металлов в жидких средах .....	134
Контрольные вопросы и задания .....	137
<b>Часть 3. КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ .....</b>	<b>138</b>
Глава 8. Общие сведения .....	138
8.1. Требования к конструкционным материалам .....	138
8.2. Способы повышения коррозионной стойкости металлов и сплавов .....	140
Контрольные вопросы и задания .....	143
Глава 9. Стали и сплавы на основе железа .....	144
9.1. Железо и нелегированные железуглеродистые сплавы .....	144
9.2. Низколегированные стали и чугуны .....	146
9.3. Среднелегированные стали и чугуны .....	148
9.4. Высоколегированные стали .....	149
9.4.1. Хромистые стали .....	150
9.4.2. Хромоникелевые стали .....	153
9.4.3. Безникелевые стали и стали с пониженным содержанием никеля .....	158
9.4.4. Высокопрочные нержавеющие стали .....	161
9.4.5. Межкристаллитная коррозия нержавеющих сталей .....	162
9.4.6. Жаростойкость и жаропрочность нержавеющих сталей .....	165
9.5. Высоколегированные чугуны .....	167
Контрольные вопросы и задания .....	170
Глава 10. Сплавы на железоникелевой основе .....	170
10.1. Коррозионно-стойкие сплавы на железоникелевой основе .....	170

10.2. Жаростойкость и жаропрочность сплавов на железоникелевой основе .....	172
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	174
<b>Глава 11. Медь и сплавы меди</b> .....	174
11.1. Общие сведения .....	174
11.2. Коррозионная характеристика меди .....	176
11.3. Сплавы меди .....	179
11.3.1. Латунь .....	179
11.3.2. Бронзы .....	182
11.3.3. Сплавы меди с никелем .....	184
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	185
<b>Глава 12. Никель и никелевые сплавы</b> .....	186
12.1. Общие сведения .....	186
12.2. Коррозионная характеристика никеля .....	187
12.3. Сплавы никеля .....	188
12.3.1. Сплавы никеля с медью .....	188
12.3.2. Сплавы никеля с молибденом .....	189
12.3.3. Сплавы никеля с хромом .....	191
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	192
<b>Глава 13. Алюминий и алюминиевые сплавы</b> .....	192
13.1. Общие сведения .....	192
13.2. Коррозионная характеристика алюминия .....	193
13.3. Сплавы алюминия .....	195
13.3.1. Сплавы, не упрочняемые термической обработкой .....	196
13.3.2. Сплавы, упрочняемые термической обработкой .....	197
13.3.3. Литьевые сплавы .....	201
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	203
<b>Глава 14. Свинец и сплавы свинца</b> .....	203
14.1. Общие сведения .....	203
14.2. Коррозионная характеристика свинца .....	204
14.3. Сплавы свинца .....	206
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	206
<b>Глава 15. Редкие металлы и их сплавы</b> .....	207
15.1. Титан и сплавы на его основе .....	207
15.1.1. Общие сведения .....	207
15.1.2. Коррозионная характеристика титана .....	209
15.1.3. Сплавы титана .....	212
15.2. Тантал .....	215
15.3. Цирконий .....	217
15.4. Молибден .....	220
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	222
<b>Глава 16. Металлы для защитных покрытий</b> .....	223
16.1. Цинк .....	223
16.2. Олово .....	225
16.3. Кадмий .....	227
16.4. Хром .....	228
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	229
<b>Раздел II. РАЗРУШЕНИЕ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ</b> .....	230
<b>Часть 4. ХИМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ И ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ</b> .....	230

Глава 17. Взаимодействие неметаллических материалов с агрессивными средами .....	230
17.1. Классификация и общие представления о неметаллических материалах .....	230
17.2. Особенности взаимодействия неметаллических материалов с агрессивными средами .....	231
17.3. Взаимодействие неметаллических материалов с газами .....	238
17.3.1. Взаимодействие силикатных материалов с газами .....	238
17.3.2. Взаимодействие полимеров с газами .....	242
17.4. Взаимодействие неметаллических материалов с водой .....	245
17.4.1. Физико-химическое воздействие воды на неметаллические материалы .....	245
17.4.2. Водостойкость силикатных материалов .....	249
17.4.3. Водостойкость полимерных и композиционных материалов .....	251
17.5. Взаимодействие неметаллических материалов с растворами электролитов и другими жидкими средами .....	254
17.5.1. Перенос растворов электролитов в неметаллических материалах .....	255
17.5.2. Стойкость силикатных материалов к действию кислот и щелочей .....	258
17.5.3. Химическая деструкция полимерных материалов под действием растворов электролитов .....	260
17.5.4. Взаимодействие неметаллических материалов с органическими растворителями, расплавами металлов и солей .....	265
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	267
Глава 18. Прочность и разрушение неметаллических материалов в агрессивных средах .....	268
18.1. Физические аспекты прочности и разрушения твердых тел .....	268
18.2. Влияние напряженно-деформированного состояния на процессы взаимодействия неметаллических материалов с агрессивными средами .....	272
18.3. Влияние агрессивной среды на прочность и разрушение неметаллических материалов .....	273
18.4. Ползучесть неметаллических материалов .....	277
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	283
<b>Часть 5. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ</b> .....	284
Глава 19. Силикатные материалы .....	285
19.1. Общие сведения .....	285
19.2. Материалы, получаемые плавлением природных силикатов .....	286
19.2.1. Каменное литье .....	286
19.2.2. Плавленный кварц .....	288
19.2.3. Силикатные стекла .....	289
19.2.4. Ситаллы .....	291
19.2.5. Силикатные эмали .....	292
19.3. Материалы, получаемые спеканием природных силикатов .....	294
19.3.1. Кислотоупорная керамика и фарфор .....	294
19.3.2. Пористые керамические материалы .....	296
19.4. Вяжущие силикатные материалы .....	299
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	301
Глава 20. Материалы на основе полимеров .....	301
20.1. Общие сведения .....	301
20.2. Полимеризационные пластмассы .....	307
20.2.1. Полиэтилен .....	307

20.2.2. Полипропилен .....	308
20.2.3. Поливинилхлорид .....	309
20.2.4. Пентапласт .....	311
20.2.5. Фторполимеры (фторопласты) .....	311
20.2.6. Полиизобутилен .....	314
20.3. Поликонденсационные смолы и защитные композиции на их основе .....	315
20.3.1. Фенолоформальдегидные смолы .....	316
20.3.2. Эпоксидные смолы .....	318
20.3.3. Полиэфирные смолы .....	320
20.3.4. Фурановые (фуриловые) смолы .....	321
20.3.5. Кремнийорганические смолы .....	321
20.4. Вяжущие материалы на органической основе .....	322
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	323
<b>Глава 21. Каучуки и резины</b> .....	323
21.1. Резины для гуммирования .....	324
21.2. Клеи для гуммировочных работ .....	325
21.3. Гуммировочные материалы на основе жидких каучуковых составов .....	327
21.4. Материалы, применяемые для ремонта гуммированного оборудования .....	327
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	328
<b>Глава 22. Углеродистые материалы</b> .....	328
22.1. Пропитанный графит .....	329
22.2. Композиции на основе графита и синтетических смол .....	330
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	331
<b>Глава 23. Лакокрасочные материалы</b> .....	331
23.1. Общие сведения .....	331
23.2. Лакокрасочные материалы, используемые для защиты от коррозии .....	333
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	341
<b>Глава 24. Композиционные материалы</b> .....	341
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	348
<b>Глава 25. Материалы для прокладок</b> .....	349
25.1. Требования к прокладкам .....	349
25.2. Выбор материала прокладки .....	349
25.3. Неметаллические прокладочные материалы .....	350
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	354
<b>Раздел III. ЗАЩИТА КОНСТРУКЦИЙ ОТ КОРРОЗИИ</b> .....	355
<b>Часть 6. МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ</b> .....	355
<b>Глава 26. Защита от коррозии обработкой среды</b> .....	356
26.1. Удаление агрессивных компонентов .....	356
26.2. Добавление ингибиторов коррозии .....	358
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	363
<b>Глава 27. Электрохимическая защита</b> .....	363
27.1. Катодная электрохимическая защита .....	364
27.1.1. Катодная защита от внешнего источника тока .....	364
27.1.2. Катодно-протекторная защита .....	366
27.2. Анодная электрохимическая защита .....	368
27.2.1. Анодная защита от внешнего источника тока .....	369
27.2.2. Анодно-протекторная защита .....	371
<i>Контрольные вопросы и задания</i> .....	373



Глава 28. Защитные покрытия.....	373
28.1. Металлические защитные покрытия .....	374
28.2. Конверсионные защитные покрытия .....	380
28.3. Биметаллы .....	381
<i>Контрольные вопросы и задания .....</i>	<i>389</i>
Глава 29. Защита химических аппаратов неметаллическими материалами .....	389
29.1. Аппаратура из неметаллических материалов.....	389
29.2. Защита неметаллическими покрытиями .....	390
29.2.1. Нанесение лакокрасочных покрытий .....	398
29.2.2. Нанесение покрытий из порошков, суспензий и жидких композиций.....	399
29.2.3. Нанесение покрытий из листов (плакирование, футеровка).....	404
29.3. Защита стальной и бетонной аппаратуры футеровкой штучными материалами .....	414
29.3.1. Общие требования к конструкции корпуса, штуцеров и люков....	414
29.3.2. Жесткость корпуса и допускаемые отклонения по форме.....	419
29.3.3. Монтаж корпуса и установка аппаратов на фундамент .....	420
<i>Контрольные вопросы и задания .....</i>	<i>424</i>
Глава 30. Проектирование и расчет футерованных аппаратов .....	426
30.1. Особенности проектирования футеровок химического оборудования.....	426
30.2. Основные стадии проектирования футерованного оборудования.....	427
30.2.1. Выбор материалов футеровочного покрытия.....	427
30.2.2. Теплотехнический расчет футеровки .....	428
30.2.3. Проверка футеровок на статическую устойчивость .....	432
30.2.4. Проверка футеровок на совместную работу с корпусом аппарата .....	433
30.2.5. Прочностной расчет футеровки .....	434
30.3. Проектирование футеровок плоских днищ химического оборудования .....	439
30.3.1. Схемы установки оборудования с плоским днищем на фундамент.....	439
30.3.2. Прочностной расчет футеровки плоского днища .....	440
30.3.3. Проектирование футеровок цилиндрических горизонтальных аппаратов и газоходов .....	442
Приложения .....	446
Часть 7. КОРРОЗИОННЫЙ МОНИТОРИНГ .....	462
Глава 31. Назначение коррозионного мониторинга.....	462
<i>Контрольные вопросы и задания .....</i>	<i>465</i>
Глава 32. Организация коррозионного мониторинга .....	465
32.1. Методы коррозионного мониторинга.....	465
32.2. Системы коррозионного мониторинга.....	474
<i>Контрольные вопросы и задания .....</i>	<i>477</i>
<i>Литература .....</i>	<i>478</i>