



# Lubricants and Lubrication

*Edited by*  
*Theo Mang and Wilfried Dresel*

Second, Completely Revised and Extended Edition



WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

# Смазки

## Производство, применение, свойства

### *Справочник*

Под редакцией Тео Манга и Уилфрида Дрезеля

*Перевод 2-го англ. изд.  
под редакцией Школьниковой В. М.*

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
**ПРОФЕССИЯ**

Санкт-Петербург  
2010

 ЦЕНТР  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ  
ПРОГРАММ  
**ПРОФЕССИЯ**

**ББК 34.44я2**  
**УДК 621.89(035)**  
**С50**

**Т. Манг, У. Дрезель (ред.)**  
**С50** Смазки. Производство, применение, свойства. Справочник: пер. 2-го англ. изд. под ред. В. М. Школьникова — СПб.: ЦОП «Профессия», 2010. — 944 с., ил.

ISBN 978-5-91884-012-2  
ISBN 978-3-527-31497-3 (англ.)

В справочнике описывается весь жизненный цикл смазочных материалов — от разработки до утилизации. Большое внимание уделено гидравлическим маслам, жидкостям для металлообработки, маслам для формовки, а также вопросам влияния смазочных материалов на окружающую среду. В издании содержатся обширные сведения практически обо всех типах смазочных материалов и областях их применения, а также приведены необходимые теоретические и эмпирические данные о свойствах смазок и закономерностях их изменения.

Справочник предназначен для инженеров и специалистов предприятий, производящих и использующих смазочные масла, а также для научных сотрудников, аспирантов и студентов, изучающих такое относительно новое направление в науке, как трибология и смежные с ним дисциплины.

**ББК 34.44я2**  
**УДК 621.89(035)**

*Originally published in the English language by WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstrasse 12, D-69469 Weinheim, Federal Republic of Germany, under the title "Lubricants and Lubrication". Copyright 2007 by WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.*

*All rights reserved (including those of translation into other languages). No part of this book may be reproduced in any form by photoprinting, microfilm or any other means — nor transmitted or translated into a machine language without written permission from the publishers. Registered names, trademarks, etc. used in this book, even when not specifically marked as such, are not to be considered unprotected by law.*

*Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.*

Информация, содержащаяся в данной книге, получена из источников, рассматриваемых издательством как надежные. Тем не менее, имея в виду возможные человеческие или технические ошибки, издательство не может гарантировать абсолютную точность и полноту приводимых сведений и не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

ISBN 978-3-527-31497-3 (англ.)  
ISBN 978-5-91884-012-2

© WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim/Germany, 2007  
© ЦОП «Профессия», 2010  
© Перевод, оформление: ЦОП «Профессия», 2010

## Предисловие к русскому изданию

Издание такого справочника продиктовано актуальностью насыщения книжного рынка технической, профессиональной литературой, содержащей новейшую информацию о смазках, технологии их производства, экологически безопасном применении и утилизации.

Современные требования по повышению надежности и эффективности работы машин и механизмов повлекли за собой ужесточение эксплуатационных характеристик и экологических норм, применяемых к смазочным материалам.

Сделав поправку на различие подходов в законодательных актах, регулирующих вопросы экологии за рубежом, авторам удалось сформировать представление о системе разработки, производства и применения экологически безопасных смазок и родственных им продуктов. В книге подробным образом описаны процессы получения основных компонентов смазок: базовых масел — основы всех смазочных материалов, а также присадок, улучшающих их свойства и дающих возможность использования конечных продуктов в разных условиях эксплуатации. Важным вопросом является вопрос выбора смазочных материалов на основе результатов предварительных испытаний для обеспечения эффективной и безопасной работы техники и оборудования. Исследованиям и изучению свойств смазок уделяется большое значение, так как при правильном применении смазок с определенными свойствами и с оптимальным составом исключается возможность выхода из строя ценного оборудования, заклинивания металлических движущихся частей и выхода из строя дорогостоящих авиационных и автомобильных двигателей, турбин, компрессорного оборудования и др.

В справочнике приведены ссылки на международные стандарты *ISO*, *DIN*, *ASTM*, приводятся международные классификации *NLGI*, *SAE*, *API*, которые активно используются в современных нормативах и гармонизированных стандартах на нефтепродукты, в том числе и в нашей стране.

В некоторых главах приведены теоретические и научные аспекты применения смазок в узле трения для полноты представления механизма и химизма процесса. Совокупность таких факторов, как давление, скорость и температура соприкасающихся поверхностей, может существенно влиять на свойства и качество, а следовательно, и на срок службы смазочных материалов, с которым, в свою очередь, связана экономическая эффективность их использования.

Коллектив редакторов, работавших над данным изданием, надеется, что читатели и специалисты, проявившие интерес к справочнику, найдут в нем ответы на вопросы, возникшие в процессе применения и переработки смазочных материалов, а также методические рекомендации по использованию, утилизации отработанных продуктов. Наряду с этим, в книге приведена обширная информация о международных организациях и стандартах, регулирующих экологические аспекты применения смазок.

Книга будет полезна не только специалистам, но и широкому кругу читателей, стремящихся расширить свои знания в области трибологии и триботехники.

## Список авторов

### **Торстен Бартелс**

Доктор-инженер (канд. техн. наук)  
Вайзенхайм-ам-Занд, Германия  
Управление техническими службами и  
испытательными лабораториями

### **Вольфганг Бук**

Инженер,  
Вайнхайм, Германия  
Международное управление  
производством промышленных масел

### **Юрген Браун**

Доктор естественных наук  
Шпейер, Германия  
Исследования и разработки  
промышленных масел

### **Кристиан Буш**

Доктор-инженер (канд. техн. наук),  
Кайзерслаутерн, Германия  
Директор-распорядитель

### **Вольфганг Бусс**

Доктор естественных наук  
Фрайншайм, Германия  
Исследования и разработки и управление  
производством смазочных масел,  
используемых при формовке

### **Уилфрид Дрезель**

Доктор естественных наук  
Людвигсшлаген, Германия  
Исследования и разработки  
(международные) пластичных смазок

### **Кармен Фрейлер**

Инженер, Хюттенфельд, Германия  
Исследования и разработки и управление  
производством жидкостей  
для металлообработки

### **Манфред Харпеншайд**

Доктор естественных наук  
Ромерберг, Германия  
Исследования и разработки  
моторных масел

### **Рольф-Петер Хеклер**

Инженер  
Нойе-Изенбург, Германия  
Международное управление производством  
пластичных смазок

### **Дейтрих Хорнер**

Доктор естественных наук  
Хасслок, Германия  
Международное управление производством  
жидкостей для металлообработки и  
закалочных масел

### **Франц Кубицки**

Инженер  
Хокенхайм, Германия  
Международное управление производством  
антикоррозийных материалов и листового  
металла

### **Георг Линг**

Доктор-инженер (канд. техн. наук)  
Мангейм, Германия  
Член исполнительного совета  
Технология и каналы поставок

### **Ахим Лосх**

Доктор естественных наук  
Вестхофен, Германия  
Исследования и разработки  
антикоррозийных материалов, очистителей  
и в области металлообработки

### **Рольф Лютер**

Физик  
Шпейер, Германия  
Руководитель испытаний и перспективных  
разработок

### **Тео Манг**

Профессор, доктор-инженер (доктор. техн.  
наук) Вайнхайм, Германия  
Член совета директоров, технологии,  
закупки, управление кадрами (до 2001 г.)

### **Роман Мюллер**

Мангейм, Германия  
Международный обмен знаниями

### **Зигфрид Нолл**

Химик  
Мангейм, Германия  
Спецификации сырья  
Центральное управление закупками и об-  
щий менеджмент (†2003)

### **Юрген Омайс**

Доктор естественных наук  
Цвингенбкерг, Германия  
Исследования и разработки моторных масел  
(до 2004 г.)

## Оглавление

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Предисловие к русскому изданию .....                                   | 6         |
| Список авторов .....                                                   | 7         |
| Предисловие ко второму изданию .....                                   | 32        |
| Благодарности .....                                                    | 33        |
| Таблица используемых в тексте аббревиатур и сокращений .....           | 34        |
| <b>Глава 1. Рынок смазочных материалов .....</b>                       | <b>41</b> |
| <i>Тео Манг</i>                                                        |           |
| 1.1. Предисловие .....                                                 | 41        |
| 1.2. Объем продаж смазочных материалов .....                           | 41        |
| 1.3. Производство смазочных материалов .....                           | 44        |
| 1.4. Системы смазочных материалов .....                                | 45        |
| <b>Глава 2. Смазочные материалы в трибологической системе .....</b>    | <b>48</b> |
| <i>Тео Манг</i>                                                        |           |
| 2.1. Смазочные материалы как часть трибологических исследований .....  | 48        |
| 2.2. Трибологическая система .....                                     | 48        |
| 2.3. Трение .....                                                      | 49        |
| 2.3.1. Типы трения .....                                               | 49        |
| 2.3.1.1. Трение скольжения .....                                       | 50        |
| 2.3.1.2. Трение качения .....                                          | 50        |
| 2.3.1.3. Статическое трение .....                                      | 52        |
| 2.3.1.4. Кинетическое трение .....                                     | 52        |
| 2.3.1.5. Прерывистое перемещение при трении .....                      | 52        |
| 2.3.2. Трение и условия смазки .....                                   | 53        |
| 2.3.2.1. Трение твердых тел (сухое трение) .....                       | 53        |
| 2.3.2.2. Граничная смазка .....                                        | 53        |
| 2.3.2.3. Жидкостное трение .....                                       | 53        |
| 2.3.2.4. Смешанное трение .....                                        | 54        |
| 2.3.2.5. Трение при применении твердых смазочных материалов .....      | 54        |
| 2.3.2.6. Диаграмма Штрибека .....                                      | 54        |
| 2.3.2.7. Гидродинамическая смазка .....                                | 55        |
| 2.3.2.8. ЭГД смазка (ЭГД режим) .....                                  | 55        |
| 2.3.2.9. Термоэластогидродинамическая (ТЭГД) смазка (ТЭГД режим) ..... | 57        |
| 2.4. Изнашивание .....                                                 | 57        |
| 2.4.1. Механизмы изнашивания .....                                     | 57        |
| 2.4.1.1. Абразивное изнашивание .....                                  | 57        |
| 2.4.1.2. Адгезионное изнашивание .....                                 | 58        |
| 2.4.1.3. Трибохимические реакции .....                                 | 58        |
| 2.4.1.4. Усталостное изнашивание .....                                 | 58        |
| 2.4.1.5. Эрозионное изнашивание .....                                  | 58        |
| 2.4.1.6. Фреттинг — коррозионное изнашивание .....                     | 58        |
| 2.4.1.7. Кавитационное изнашивание .....                               | 59        |
| 2.4.2. Типы изнашивания .....                                          | 59        |
| 2.4.3. Процесс износа .....                                            | 59        |
| 2.4.4. Трибомутация .....                                              | 59        |
| 2.4.5. Нанотрибология .....                                            | 62        |
| 2.4.6. Трибосистемы будущего .....                                     | 63        |

**Глава 3. Реология смазочных материалов. . . . . 64***Тео Манг*

|          |                                                                                |    |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1.     | Вязкость . . . . .                                                             | 64 |
| 3.2.     | Влияние температуры на вязкость (вязкостно-температурная зависимость). . . . . | 65 |
| 3.2.1.   | Индекс вязкости . . . . .                                                      | 67 |
| 3.3.     | Зависимость вязкости от давления. . . . .                                      | 68 |
| 3.4.     | Влияние скорости сдвига на вязкость . . . . .                                  | 70 |
| 3.5.     | Особые реологические эффекты . . . . .                                         | 71 |
| 3.5.1.   | Пластичные смазки . . . . .                                                    | 72 |
| 3.6.     | Классы вязкости . . . . .                                                      | 72 |
| 3.6.1.   | Сорта вязкости по классификации <i>ISO</i> . . . . .                           | 72 |
| 3.6.2.   | Прочие сорта вязкости . . . . .                                                | 73 |
| 3.6.2.1. | Моторные масла . . . . .                                                       | 73 |
| 3.6.2.2. | Автомобильные трансмиссионные масла . . . . .                                  | 73 |
| 3.6.2.3. | Индустриальные трансмиссионные масла . . . . .                                 | 73 |
| 3.6.2.4. | Классы вязкости для базовых масел . . . . .                                    | 73 |
| 3.6.2.5. | Сравнение классов вязкости . . . . .                                           | 73 |

**Глава 4. Базовые масла . . . . . 75***Тео Манг и Георг Линг*

|          |                                                                                                   |    |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.     | Базовые масла — исторический экскурс и перспективы . . . . .                                      | 75 |
| 4.2.     | Химические исследования минеральных базовых масел . . . . .                                       | 76 |
| 4.2.1.   | Грубая химическая оценка . . . . .                                                                | 76 |
| 4.2.1.1. | Вязкостно-весовая константа (ВВК) . . . . .                                                       | 76 |
| 4.2.1.2. | Анилиновая точка . . . . .                                                                        | 76 |
| 4.2.2.   | Распределение углерода . . . . .                                                                  | 76 |
| 4.2.3.   | Углеводородный состав . . . . .                                                                   | 77 |
| 4.2.4.   | Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ)<br>в базовых маслах. . . . .                     | 77 |
| 4.2.4.1. | Ароматические соединения в белых минеральных маслах. . . . .                                      | 78 |
| 4.3.     | Очистка базовых масел. . . . .                                                                    | 79 |
| 4.3.1.   | Перегонка . . . . .                                                                               | 79 |
| 4.3.2.   | Деасфальтизация . . . . .                                                                         | 81 |
| 4.3.3.   | Традиционные процессы очистки. . . . .                                                            | 82 |
| 4.3.3.1. | Кислотная очистка . . . . .                                                                       | 82 |
| 4.3.3.2. | Селективная очистка. . . . .                                                                      | 82 |
| 4.3.4.   | Селективная депарафинизация . . . . .                                                             | 85 |
| 4.3.5.   | Доочистка . . . . .                                                                               | 86 |
| 4.3.5.1. | Нефти, пригодные для получения смазочных масел. . . . .                                           | 86 |
| 4.4.     | Производство базовых масел с использованием процессов гидрогенизации<br>и гидрокрекинга . . . . . | 86 |
| 4.4.1.   | Производство нафтеновых базовых масел посредством гидрогенизации . . . . .                        | 88 |
| 4.4.2.   | Производство белых масел . . . . .                                                                | 90 |
| 4.4.3.   | Гидрокрекинг машинного масла . . . . .                                                            | 91 |
| 4.4.4.   | Каталитическая депарафинизация . . . . .                                                          | 92 |
| 4.4.5.   | Изомеризация парафинов . . . . .                                                                  | 93 |
| 4.4.6.   | Гибридная очистка смазочных масел . . . . .                                                       | 95 |
| 4.4.7.   | Полностью гидрогенизационный процесс . . . . .                                                    | 96 |
| 4.4.8.   | Технология конверсии природного газа в жидкие углеводороды . . . . .                              | 98 |



|                                                      |                                                                           |            |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.5.                                                 | Характеристики кипения и испаряемости базовых масел . . . . .             | 99         |
| 4.6.                                                 | Категории базовых масел и различные нефтяные базовые масла . . . . .      | 103        |
| <b>Глава 5. Синтетические базовые масла. . . . .</b> |                                                                           | <b>107</b> |
| <i>Уилфрид Дрезель</i>                               |                                                                           |            |
| 5.1.                                                 | Синтетические углеводороды . . . . .                                      | 108        |
| 5.1.1.                                               | ПАО . . . . .                                                             | 108        |
| 5.1.2.                                               | Продукты олигомеризации олефинов с внутренними двойными связями . . . . . | 111        |
| 5.1.3.                                               | Полибутены (ПБ) . . . . .                                                 | 112        |
| 5.1.4.                                               | Алкилированные ароматические соединения . . . . .                         | 113        |
| 5.1.5.                                               | Прочие углеводороды . . . . .                                             | 114        |
| 5.2.                                                 | Галогенизированные углеводороды . . . . .                                 | 115        |
| 5.3.                                                 | Синтетические сложные эфиры . . . . .                                     | 116        |
| 5.3.1.                                               | Сложные эфиры карбоновых кислот . . . . .                                 | 116        |
| 5.3.1.1.                                             | Сложные эфиры дикарбоновых кислот . . . . .                               | 117        |
| 5.3.1.2.                                             | Сложные эфиры полиололов . . . . .                                        | 118        |
| 5.3.1.3.                                             | Прочие сложные эфиры карбоновых кислот . . . . .                          | 119        |
| 5.3.1.4.                                             | Комплексные сложные эфиры . . . . .                                       | 120        |
| 5.3.1.5.                                             | Сложные эфиры фторированных карбоновых кислот . . . . .                   | 121        |
| 5.3.2.                                               | Сложные эфиры фосфорной кислоты . . . . .                                 | 121        |
| 5.4.                                                 | Полиалкиленгликоли . . . . .                                              | 122        |
| 5.5.                                                 | Прочие полиэфиры . . . . .                                                | 125        |
| 5.5.1.                                               | Перфторированные полиэфиры . . . . .                                      | 125        |
| 5.5.2.                                               | Полифенилэфиры . . . . .                                                  | 126        |
| 5.5.3.                                               | Полисилоксаны (силиконовые масла) . . . . .                               | 127        |
| 5.6.                                                 | Прочие синтетические базовые масла . . . . .                              | 130        |
| 5.7.                                                 | Сравнение синтетических базовых масел . . . . .                           | 134        |
| 5.8.                                                 | Смеси синтетических смазочных материалов . . . . .                        | 135        |
| <b>Глава 6. Присадки . . . . .</b>                   |                                                                           | <b>136</b> |
| <i>Юрген Браун</i>                                   |                                                                           |            |
| 6.1.                                                 | Антиоксиданты . . . . .                                                   | 136        |
| 6.1.1.                                               | Механизм окисления и антиоксиданты . . . . .                              | 137        |
| 6.1.2.                                               | Соединения . . . . .                                                      | 139        |
| 6.1.2.1.                                             | Фенольные антиоксиданты . . . . .                                         | 139        |
| 6.1.2.2.                                             | Ароматические амины . . . . .                                             | 139        |
| 6.1.2.3.                                             | Соединения, содержащие серу и фосфор . . . . .                            | 140        |
| 6.1.2.4.                                             | Сероорганические соединения . . . . .                                     | 140        |
| 6.1.2.5.                                             | Фосфорорганические соединения . . . . .                                   | 140        |
| 6.1.2.6.                                             | Прочие соединения . . . . .                                               | 141        |
| 6.1.2.7.                                             | Синергетические смеси . . . . .                                           | 141        |
| 6.1.3.                                               | Испытание на стойкость к окислению . . . . .                              | 141        |
| 6.2.                                                 | Модификаторы вязкости . . . . .                                           | 142        |
| 6.2.1.                                               | Физическое описание ИВ . . . . .                                          | 142        |
| 6.2.2.                                               | Механизм улучшения ИВ . . . . .                                           | 142        |
| 6.2.3.                                               | Структура и химизм модификаторов вязкости . . . . .                       | 145        |
| 6.3.                                                 | Присадки, снижающие температуру застывания . . . . .                      | 147        |
| 6.4.                                                 | Детергенты (моющие присадки) и дисперсанты . . . . .                      | 147        |
| 6.4.1.                                               | Механизм действия моюще-диспергирующих присадок . . . . .                 | 148        |

|                                                                            |                                                                                 |            |
|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.4.2.                                                                     | Металлсодержащие соединения (детергенты) . . . . .                              | 148        |
| 6.4.2.1.                                                                   | Феноляты . . . . .                                                              | 148        |
| 6.4.2.2.                                                                   | Салицилаты . . . . .                                                            | 149        |
| 6.4.2.3.                                                                   | Тиофосфонаты . . . . .                                                          | 150        |
| 6.4.2.4.                                                                   | Сульфонаты . . . . .                                                            | 150        |
| 6.4.3.                                                                     | Беззольные диспергаторы . . . . .                                               | 151        |
| 6.5.                                                                       | Противовспенивающие присадки . . . . .                                          | 153        |
| 6.5.1.                                                                     | Силиконовые противовспенивающие присадки . . . . .                              | 154        |
| 6.5.2.                                                                     | Противопенные присадки, не содержащие силиконов . . . . .                       | 154        |
| 6.6.                                                                       | Деэмульгаторы и эмульгаторы . . . . .                                           | 155        |
| 6.6.1.                                                                     | Деэмульгаторы . . . . .                                                         | 155        |
| 6.6.2.                                                                     | Эмульгаторы . . . . .                                                           | 155        |
| 6.7.                                                                       | Красители . . . . .                                                             | 155        |
| 6.8.                                                                       | Противоизносные и противозадирные присадки . . . . .                            | 155        |
| 6.8.1.                                                                     | Функция ПИП и ПЗП . . . . .                                                     | 156        |
| 6.8.2.                                                                     | Соединения . . . . .                                                            | 156        |
| 6.8.2.1.                                                                   | Соединения фосфора . . . . .                                                    | 156        |
| 6.8.2.2.                                                                   | Соединения, содержащие серу и фосфор . . . . .                                  | 157        |
| 6.8.2.3.                                                                   | Соединения, содержащие серу и азот . . . . .                                    | 159        |
| 6.8.2.4.                                                                   | Сернистые соединения . . . . .                                                  | 160        |
| 6.8.2.5.                                                                   | Пассивные противозадирные присадки . . . . .                                    | 162        |
| 6.8.2.6.                                                                   | Соединения хлора . . . . .                                                      | 162        |
| 6.8.2.7.                                                                   | Добавки к твердым смазкам . . . . .                                             | 162        |
| 6.9.                                                                       | Модификаторы трения . . . . .                                                   | 162        |
| 6.10.                                                                      | Ингибиторы коррозии . . . . .                                                   | 163        |
| 6.10.1.                                                                    | Механизм действия ингибиторов коррозии . . . . .                                | 164        |
| 6.10.2.                                                                    | Антикоррозионные присадки для черных металлов . . . . .                         | 164        |
| 6.10.2.1.                                                                  | Сульфонаты . . . . .                                                            | 164        |
| 6.10.2.2.                                                                  | Производные карбоновых кислот . . . . .                                         | 165        |
| 6.10.2.3.                                                                  | Амины неполных сложных эфиров нейтрализованной алкилфосфорной кислоты . . . . . | 166        |
| 6.10.2.4.                                                                  | Ингибиторы коррозии в паровой фазе . . . . .                                    | 167        |
| 6.10.3.                                                                    | Пассиваторы поверхности цветных металлов . . . . .                              | 167        |
| <b>Глава 7. Влияние смазочных материалов на окружающую среду . . . . .</b> |                                                                                 | <b>169</b> |
| <i>Рольф Лютер</i>                                                         |                                                                                 |            |
| 7.1.                                                                       | Определение экологически безопасных смазочных материалов . . . . .              | 169        |
| 7.2.                                                                       | Текущая ситуация . . . . .                                                      | 170        |
| 7.2.1.                                                                     | Статистические данные . . . . .                                                 | 170        |
| 7.2.2.                                                                     | Экономические последствия и возможности замещения . . . . .                     | 170        |
| 7.2.3.                                                                     | Сельское хозяйство, экономика и политика . . . . .                              | 173        |
| 7.2.4.                                                                     | Политические инициативы . . . . .                                               | 175        |
| 7.3.                                                                       | Оценка воздействия на биосферу . . . . .                                        | 176        |
| 7.3.1.                                                                     | Биоразложение . . . . .                                                         | 176        |
| 7.3.2.                                                                     | Экотоксичность . . . . .                                                        | 177        |
| 7.3.3.                                                                     | Предельно допустимые выбросы . . . . .                                          | 178        |
| 7.3.4.                                                                     | Загрязнение водной среды . . . . .                                              | 178        |
| 7.3.4.1.                                                                   | Принятая в Германии классификация опасности загрязнения водной среды . . . . .  | 178        |

|       |           |                                                                                                                                                      |     |
|-------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|       | 7.3.4.2.  | Принятые в Германии нормативные акты по использованию смазочных материалов, представляющих опасность для водной среды ( <i>VAwS</i> ) . . . . .      | 179 |
| 7.4.  |           | Экологическое законодательство 1: регистрация, оценка и выдача разрешений на производство и применение химических веществ ( <i>REACH</i> ) . . . . . | 182 |
|       | 7.4.1.    | Регистрация . . . . .                                                                                                                                | 184 |
|       | 7.4.2.    | Оценка . . . . .                                                                                                                                     | 185 |
|       | 7.4.3.    | Выдача разрешений . . . . .                                                                                                                          | 186 |
|       | 7.4.4.    | Обязательства, связанные с регистрацией . . . . .                                                                                                    | 187 |
| 7.5.  |           | Упорядоченная в глобальном масштабе система классификации и маркировки ( <i>GHS</i> ) . . . . .                                                      | 189 |
| 7.6.  |           | Экологический законодательный акт 2: Директива (1999/45/EC) по опасным препаратам . . . . .                                                          | 192 |
| 7.7.  |           | Экологический законодательный акт 3: регулярное применение . . . . .                                                                                 | 194 |
|       | 7.7.1.    | Закон об экологической ответственности . . . . .                                                                                                     | 194 |
|       | 7.7.2.    | Закон о химических веществах. Закон об опасных веществах . . . . .                                                                                   | 195 |
|       | 7.7.3.    | Транспортные нормативные документы . . . . .                                                                                                         | 196 |
|       | 7.7.4.    | Утилизация (законы об отходах и регенерации) . . . . .                                                                                               | 196 |
|       | 7.7.5.    | Способы утилизации растительных масел, не вызывающих загрязнения водной среды . . . . .                                                              | 197 |
| 7.8.  |           | Экологическое законодательство 4: выбросы . . . . .                                                                                                  | 198 |
|       | 7.8.1.    | Загрязнение воздуха . . . . .                                                                                                                        | 198 |
|       | 7.8.2.    | Загрязнение воды . . . . .                                                                                                                           | 198 |
|       | 7.8.3.    | Законодательство Германии об охране почвы . . . . .                                                                                                  | 199 |
|       | 7.8.4.    | Законодательство Германии об охране водных ресурсов . . . . .                                                                                        | 199 |
|       | 7.8.5.    | Штрафы за сброс сточных вод в канализацию . . . . .                                                                                                  | 201 |
|       | 7.8.6.    | Чистый воздух: Закон Германии о выбросах . . . . .                                                                                                   | 201 |
|       | 7.8.7.    | Директива о питьевой воде . . . . .                                                                                                                  | 201 |
| 7.9.  |           | Стандартизация экологически совместимых гидравлических жидкостей . . . . .                                                                           | 202 |
|       | 7.9.1.    | Нормативный документ <i>VDMA 24568</i> . . . . .                                                                                                     | 202 |
|       | 7.9.2.    | Нормативный документ <i>ISO 15380</i> . . . . .                                                                                                      | 202 |
| 7.10. |           | Экологическая маркировка . . . . .                                                                                                                   | 207 |
|       | 7.10.1.   | Системы глобальной экомаркировки . . . . .                                                                                                           | 207 |
|       | 7.10.2.   | Европейский экологический знак . . . . .                                                                                                             | 207 |
|       | 7.10.3.   | Программа « <i>Blue Angel</i> » . . . . .                                                                                                            | 211 |
|       | 7.10.4.   | Северные страны (Норвегия, Швеция, Финляндия, Исландия) — награда «Белый Лебедь» (« <i>White Swan</i> ») . . . . .                                   | 213 |
|       | 7.10.4.1. | Требования к возобновляемым ресурсам . . . . .                                                                                                       | 214 |
|       | 7.10.4.2. | Требования к регенерированным маслам . . . . .                                                                                                       | 215 |
|       | 7.10.4.3. | Требования к экологически вредным компонентам . . . . .                                                                                              | 215 |
|       | 7.10.4.4. | Требования к гидравлическим жидкостям, маслам для опалубок формовочных масел, СОЖ для металлообработки . . . . .                                     | 215 |
|       | 7.10.5.   | Канадская программа «экологический выбор» («Кленовый лист») . . . . .                                                                                | 215 |
|       | 7.10.6.   | Другие виды экомаркировки . . . . .                                                                                                                  | 217 |
|       | 7.10.6.1. | Австрия . . . . .                                                                                                                                    | 217 |
|       | 7.10.6.2. | Франция . . . . .                                                                                                                                    | 218 |
|       | 7.10.6.3. | Япония . . . . .                                                                                                                                     | 218 |
|       | 7.10.6.4. | США . . . . .                                                                                                                                        | 218 |
|       | 7.10.6.5. | Нидерланды . . . . .                                                                                                                                 | 219 |

|                                                                   |                                                                                      |            |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.11.                                                             | Базовые жидкости . . . . .                                                           | 220        |
| 7.11.1.                                                           | Биоразлагаемые базовые жидкости для смазочных масел . . . . .                        | 220        |
| 7.11.2.                                                           | Синтетические сложные эфиры . . . . .                                                | 221        |
| 7.11.3.                                                           | Полигликоли . . . . .                                                                | 221        |
| 7.11.4.                                                           | ПАО . . . . .                                                                        | 222        |
| 7.11.5.                                                           | Эфирные масла и их соответствующие свойства . . . . .                                | 222        |
| 7.11.5.1.                                                         | Потери на испарение . . . . .                                                        | 222        |
| 7.11.5.2.                                                         | Вязкостно-температурные характеристики . . . . .                                     | 222        |
| 7.11.5.2.                                                         | Граничная смазка . . . . .                                                           | 223        |
| 7.12.                                                             | Присадки . . . . .                                                                   | 223        |
| 7.12.1.                                                           | Противозадирные /противоизносные присадки . . . . .                                  | 223        |
| 7.12.2.                                                           | Защита от коррозии . . . . .                                                         | 224        |
| 7.12.3.                                                           | Антиоксиданты . . . . .                                                              | 224        |
| 7.13.                                                             | Примеры . . . . .                                                                    | 224        |
| 7.13.1.                                                           | Гидравлические жидкости . . . . .                                                    | 224        |
| 7.13.2.                                                           | Масла для металлообработки (СОЖ) . . . . .                                           | 224        |
| 7.13.3.                                                           | Система освежения масла . . . . .                                                    | 225        |
| 7.14.                                                             | Вопросы безопасности при обращении со смазочными материалами . . . . .               | 226        |
| 7.14.1.                                                           | Токсикологическая терминология и индикаторы опасности . . . . .                      | 227        |
| 7.14.1.1.                                                         | Острая токсичность . . . . .                                                         | 227        |
| 7.14.1.2.                                                         | Субхроническая и хроническая токсичность . . . . .                                   | 227        |
| 7.14.1.3.                                                         | Категории ядов . . . . .                                                             | 228        |
| 7.14.1.4.                                                         | Едкие вещества, щелочи . . . . .                                                     | 228        |
| 7.14.1.5.                                                         | Пожаро- и взрывоопасность . . . . .                                                  | 228        |
| 7.14.1.6.                                                         | Канцерогенность . . . . .                                                            | 228        |
| 7.14.1.7.                                                         | Тератогены, мутагены . . . . .                                                       | 229        |
| 7.14.2.                                                           | Максимально допустимая концентрация на рабочих местах (МАК) . . . . .                | 229        |
| 7.14.3.                                                           | ПАУ . . . . .                                                                        | 230        |
| 7.14.4.                                                           | Нитрозамины в составе СОЖ . . . . .                                                  | 230        |
| 7.14.5.                                                           | Закон об огнеопасных жидкостях . . . . .                                             | 231        |
| 7.15.                                                             | Угроза для кожных покровов, связанная с применением смазочных материалов . . . . .   | 232        |
| 7.15.1.                                                           | Структура и функция кожи . . . . .                                                   | 232        |
| 7.15.2.                                                           | Повреждения кожи . . . . .                                                           | 233        |
| 7.15.2.1.                                                         | Воспаление сальных желез вследствие контакта с СОЖ<br>(твердыми частицами) . . . . . | 233        |
| 7.15.2.2.                                                         | Экзема, вызываемая маслами ( <i>Oil Eczema</i> ) . . . . .                           | 234        |
| 7.15.3.                                                           | Испытание на кожную совместимость . . . . .                                          | 235        |
| 7.15.4.                                                           | Функциональные исследования кожи . . . . .                                           | 237        |
| 7.15.5.                                                           | Уход за кожей и защита кожи . . . . .                                                | 239        |
| <b>Глава 8. Утилизация отработанных смазочных масел . . . . .</b> |                                                                                      | <b>240</b> |
| <i>Тео Манг</i>                                                   |                                                                                      |            |
| 8.1.                                                              | Возможные области применения отработанных масел . . . . .                            | 240        |
| 8.2.                                                              | Влияние законодательных актов на сбор и регенерацию отработанных масел . . . . .     | 241        |
| 8.3.                                                              | Регенерация отработанных масел . . . . .                                             | 242        |
| 8.3.1.                                                            | Сернокислотная очистка по Майнкену . . . . .                                         | 243        |
| 8.3.2.                                                            | Процесс экстракции пропаном ( <i>IFP, Snamprogetti</i> ) . . . . .                   | 243        |
| 8.3.3.                                                            | Технология <i>Mohawk (CEP–Mohawk)</i> . . . . .                                      | 243        |
| 8.3.4.                                                            | Процесс <i>КТИ</i> . . . . .                                                         | 244        |
| 8.3.5.                                                            | Процесс <i>PROP</i> . . . . .                                                        | 245        |
| 8.3.6.                                                            | Технология <i>Safety Kleen</i> . . . . .                                             | 245        |

|                                                                                   |                                                                                       |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.3.7.                                                                            | Технология с применением диэтанолamina (ДЭА) . . . . .                                | 245        |
| 8.3.8.                                                                            | Прочие технологии регенерации отработанных масел . . . . .                            | 247        |
| <b>Глава 9. Смазочные материалы для двигателей внутреннего сгорания . . . . .</b> |                                                                                       | <b>248</b> |
| <i>Манфред Харпеншайд и Юрген Омайс</i>                                           |                                                                                       |            |
| 9.1.                                                                              | Моторные масла для четырехтактных двигателей . . . . .                                | 248        |
| 9.1.1.                                                                            | Общий обзор . . . . .                                                                 | 248        |
| 9.1.1.1.                                                                          | Фундаментальные принципы . . . . .                                                    | 248        |
| 9.1.1.2.                                                                          | Классы вязкости . . . . .                                                             | 250        |
| 9.1.1.3.                                                                          | Спецификации на эксплуатационные характеристики . . . . .                             | 252        |
| 9.1.1.4.                                                                          | Состав моторных масел . . . . .                                                       | 253        |
| 9.1.1.5.                                                                          | Присадки . . . . .                                                                    | 254        |
| 9.1.1.6.                                                                          | Функциональные присадки . . . . .                                                     | 254        |
| 9.1.1.7.                                                                          | Вязкостные присадки . . . . .                                                         | 255        |
| 9.1.2.                                                                            | Характеризация и испытания . . . . .                                                  | 255        |
| 9.1.2.1.                                                                          | Физические и химические методы испытаний . . . . .                                    | 255        |
| 9.1.2.2.                                                                          | Моторные испытания . . . . .                                                          | 256        |
| 9.1.2.3.                                                                          | Моторные масла для легковых автомобилей . . . . .                                     | 256        |
| 9.1.2.4.                                                                          | Моторные масла для коммерческих автотракторных средств . . . . .                      | 259        |
| 9.1.3.                                                                            | Классификация моторных масел по спецификациям . . . . .                               | 260        |
| 9.1.3.1.                                                                          | Военные спецификации . . . . .                                                        | 260        |
| 9.1.3.2.                                                                          | Классификация <i>API</i> и <i>ILSAC</i> . . . . .                                     | 261        |
| 9.1.3.3.                                                                          | <i>CCMC</i> спецификации . . . . .                                                    | 264        |
| 9.1.3.4.                                                                          | <i>ACEA</i> спецификации . . . . .                                                    | 264        |
| 9.1.3.5.                                                                          | Одобрение моторных масел для легковых автомобилей со стороны производителей . . . . . | 268        |
| 9.1.3.6.                                                                          | Будущие тенденции . . . . .                                                           | 273        |
| 9.1.3.7.                                                                          | Топливосберегающая эффективность . . . . .                                            | 274        |
| 9.1.3.8.                                                                          | Удлиненные интервалы между заменами масла . . . . .                                   | 276        |
| 9.1.3.9.                                                                          | Низкие выбросы . . . . .                                                              | 277        |
| 9.2.                                                                              | Масла для двухтактных двигателей . . . . .                                            | 278        |
| 9.2.1.                                                                            | Применение и характеристики масел для двухтактных двигателей . . . . .                | 278        |
| 9.2.2.                                                                            | Классификация масел для двухтактных двигателей . . . . .                              | 280        |
| 9.2.2.1.                                                                          | <i>API</i> функциональные группы . . . . .                                            | 280        |
| 9.2.2.2.                                                                          | <i>JASO</i> классификация . . . . .                                                   | 280        |
| 9.2.2.3.                                                                          | <i>ISO</i> классификация . . . . .                                                    | 281        |
| 9.2.3.                                                                            | Масла для двухтактных подвесных двигателей . . . . .                                  | 282        |
| 9.2.4.                                                                            | Экологически чистые масла для двухтактных двигателей [9.31] . . . . .                 | 283        |
| 9.3.                                                                              | Тракторные масла . . . . .                                                            | 284        |
| 9.4.                                                                              | Масла для газовых двигателей [9.32–9.34] . . . . .                                    | 286        |
| 9.4.1.                                                                            | Использование газа в качестве топлива в газовых двигателях . . . . .                  | 286        |
| 9.4.2.                                                                            | Смазочные материалы для газовых двигателей . . . . .                                  | 287        |
| 9.5.                                                                              | Масла для судовых дизельных двигателей . . . . .                                      | 288        |
| 9.5.1.                                                                            | Тихоходные крейцкопфные дизельные двигатели . . . . .                                 | 288        |
| 9.5.2.                                                                            | Среднескоростные двигатели . . . . .                                                  | 289        |
| 9.5.3.                                                                            | Смазочные материалы . . . . .                                                         | 290        |
| <b>Глава 10. Трансмиссионные масла . . . . .</b>                                  |                                                                                       | <b>291</b> |
| <i>Торстен Бартелс</i>                                                            |                                                                                       |            |
| 10.1.                                                                             | Введение . . . . .                                                                    | 291        |

|                                                 |                                                                                                    |            |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 10.2.                                           | Требования к трансмиссионным смазочным маслам . . . . .                                            | 292        |
| 10.3.                                           | Трибология зубчатых передач . . . . .                                                              | 295        |
| 10.3.1.                                         | Условия трения в различных типах зубчатых передач . . . . .                                        | 295        |
| 10.3.1.1.                                       | Зубчатые колеса . . . . .                                                                          | 295        |
| 10.3.1.2.                                       | Условия нагрузок и скоростей во время зубчатого зацепления . . . . .                               | 295        |
| 10.3.1.3.                                       | Распределение статистических и динамических нагрузок<br>в зубчатом зацеплении . . . . .            | 297        |
| 10.3.1.4.                                       | Образование смазочной пленки в зоне зацепления зубьев . . . . .                                    | 298        |
| 10.3.1.5.                                       | Условия смазки . . . . .                                                                           | 300        |
| 10.3.2.                                         | Специфические отказы зубчатых передач и трансмиссий . . . . .                                      | 302        |
| 10.3.2.1.                                       | Износ . . . . .                                                                                    | 302        |
| 10.3.2.2.                                       | Образование царапин и задиров . . . . .                                                            | 303        |
| 10.3.2.3.                                       | Микропиттинг (микроточечная коррозия) . . . . .                                                    | 305        |
| 10.3.2.4.                                       | Питтинг (точечная коррозия) . . . . .                                                              | 306        |
| 10.3.2.5.                                       | Растрескивание зубьев . . . . .                                                                    | 307        |
| 10.4.                                           | Трансмиссионные масла для автомобилей . . . . .                                                    | 307        |
| 10.4.1.                                         | Смазочные масла для ведущей передачи коммерческих автомобилей . . . . .                            | 309        |
| 10.4.2.                                         | Трансмиссионные масла для легковых автомобилей . . . . .                                           | 313        |
| 10.4.3.                                         | Смазочные масла для автоматических трансмиссий и бесступенчатых<br>коробок передач (CVT) . . . . . | 317        |
| 10.4.3.1.                                       | Требования к жидкостям для гидродинамических трансмиссий . . . . .                                 | 317        |
| 10.4.3.2.                                       | Требования к V-жидкостям для мокрых муфт сцепления и<br>тормозов . . . . .                         | 319        |
| 10.4.3.3.                                       | Требования к жидкостям для бесступенчатых коробок<br>передач (CVT) . . . . .                       | 322        |
| 10.4.3.4.                                       | Ременные и зубчатые передачи для B-CVT . . . . .                                                   | 323        |
| 10.4.3.5.                                       | T-CVT фрикционные передачи . . . . .                                                               | 324        |
| 10.4.3.6.                                       | H-CVT гидростатические динамические бесступенчатые<br>силовые передачи . . . . .                   | 325        |
| 10.5.                                           | Многофункциональные жидкости в автомобильных трансмиссиях . . . . .                                | 326        |
| 10.6.                                           | Трансмиссионные масла для промышленных зубчатых передач . . . . .                                  | 326        |
| 10.6.1.                                         | Вязкостно-температурные характеристики . . . . .                                                   | 330        |
| 10.6.2.                                         | Стойкость жидкости к сдвигу . . . . .                                                              | 330        |
| 10.6.3.                                         | Защита от коррозии и ржавления . . . . .                                                           | 331        |
| 10.6.4.                                         | Окислительная стабильность . . . . .                                                               | 331        |
| 10.6.5.                                         | Температура вспышки и температура застывания . . . . .                                             | 331        |
| 10.6.6.                                         | Деэмульгируемость и водоотделение . . . . .                                                        | 331        |
| 10.6.7.                                         | Деаэрация . . . . .                                                                                | 332        |
| 10.6.8.                                         | Совместимость с красителями . . . . .                                                              | 332        |
| 10.6.9.                                         | Совместимость с уплотнениями . . . . .                                                             | 332        |
| 10.6.10.                                        | Вспенивание . . . . .                                                                              | 332        |
| 10.6.11.                                        | Смешиваемость с минеральными маслами . . . . .                                                     | 332        |
| 10.6.12.                                        | Совместимость с окружающей средой и с кожным покровом . . . . .                                    | 332        |
| 10.6.13.                                        | Открытые зубчатые передачи . . . . .                                                               | 333        |
| 10.7.                                           | Отношение «затраты/прибыль» при разработке трансмиссионных<br>смазочных масел . . . . .            | 333        |
| <b>Глава 11. Гидравлические масла . . . . .</b> |                                                                                                    | <b>338</b> |
| <i>Вольфганг Бук</i>                            |                                                                                                    |            |
| 11.1.                                           | Введение . . . . .                                                                                 | 338        |

|            |                                                                                                    |     |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 11.2.      | Принцип гидравлики — закон Паскаля . . . . .                                                       | 339 |
| 11.3.      | Гидравлические системы, контуры, компоненты . . . . .                                              | 339 |
| 11.3.1.    | Элементы гидравлической системы . . . . .                                                          | 340 |
| 11.3.2.    | Гидравлические цилиндры . . . . .                                                                  | 341 |
| 11.3.2.3.  | Клапаны . . . . .                                                                                  | 343 |
| 11.3.2.4.  | Компоненты контура . . . . .                                                                       | 343 |
| 11.3.2.5.  | Уплотнения, прокладки и эластомеры. . . . .                                                        | 343 |
| 11.4.      | Гидравлические жидкости . . . . .                                                                  | 345 |
| 11.4.1.    | Состав гидравлических жидкостей (базовые жидкости, присадки) . . . . .                             | 345 |
| 11.4.1.1.  | Базовое масло, базовая жидкость . . . . .                                                          | 345 |
| 11.4.1.2.  | Присадки к гидравлическим жидкостям. . . . .                                                       | 346 |
| 11.4.2.    | Первичные, вторичные и третичные характеристики гидравлических жидкостей . . . . .                 | 346 |
| 11.4.3.    | Критерии отбора гидравлических жидкостей . . . . .                                                 | 347 |
| 11.4.4.    | Классификация и стандартизация гидравлических жидкостей. . . . .                                   | 349 |
| 11.4.5.    | Гидравлические жидкости на основе минеральных масел . . . . .                                      | 350 |
| 11.4.5.1.  | Гидравлические масла типа <i>H</i> . . . . .                                                       | 350 |
| 11.4.5.2.  | Гидравлические масла типа <i>HL</i> . . . . .                                                      | 350 |
| 11.4.5.3.  | Гидравлические масла типа <i>HLP</i> . . . . .                                                     | 350 |
| 11.4.5.4.  | Гидравлические масла типа <i>HLVP</i> . . . . .                                                    | 353 |
| 11.4.5.5.  | Гидравлические масла типа <i>HLPD</i> . . . . .                                                    | 362 |
| 11.4.6.    | Огнестойкие гидравлические жидкости. . . . .                                                       | 362 |
| 11.4.6.1.  | Жидкости типа <i>HFA</i> . . . . .                                                                 | 362 |
| 11.4.6.2.  | Жидкости типа <i>HFB</i> . . . . .                                                                 | 363 |
| 11.4.6.3.  | Жидкости типа <i>HFC</i> . . . . .                                                                 | 363 |
| 11.4.6.4.  | Жидкости типа <i>HFD</i> . . . . .                                                                 | 363 |
| 11.4.7.    | Биоразлагаемые жидкости . . . . .                                                                  | 364 |
| 11.4.7.1.  | <i>HETG</i> : триглицериды, типы растительных масел . . . . .                                      | 364 |
| 11.4.7.2.  | <i>HEES</i> : типы синтетических сложных эфиров . . . . .                                          | 366 |
| 11.4.7.3.  | <i>HEPG</i> : типы полигликолей . . . . .                                                          | 367 |
| 11.4.7.4.  | <i>HEPR</i> : Полиальфаолефины и родственные им углеводородные продукты . . . . .                  | 371 |
| 11.4.8.    | Гидравлические жидкости для гидравлических систем пищевой промышленности . . . . .                 | 371 |
| 11.4.8.1.  | Смазочные масла <i>NSF H2</i> . . . . .                                                            | 371 |
| 11.4.8.2.  | Смазочные масла <i>NSF H1</i> . . . . .                                                            | 371 |
| 11.4.9.    | Жидкость для автоматических коробок передач ( <i>ATF</i> ). . . . .                                | 372 |
| 11.4.10.   | Жидкости для тракторов и сельскохозяйственной техники . . . . .                                    | 372 |
| 11.4.11.   | Гидравлические жидкости для самолетов. . . . .                                                     | 372 |
| 11.4.12.   | Международные требования к гидравлическим маслам . . . . .                                         | 373 |
| 11.4.13.   | Физические свойства гидравлических масел и их влияние на эксплуатационные характеристики . . . . . | 376 |
| 11.4.13.1. | Вязкость, вязкостно-температурные характеристики. . . . .                                          | 376 |
| 11.4.13.2. | Зависимость вязкости от давления. . . . .                                                          | 377 |
| 11.4.13.3. | Плотность . . . . .                                                                                | 379 |
| 11.4.13.4. | Сжимаемость . . . . .                                                                              | 380 |
| 11.4.13.5. | Растворимость газов, кавитация . . . . .                                                           | 381 |
| 11.4.13.6. | Деаэрация . . . . .                                                                                | 383 |
| 11.4.13.7. | Пенообразование. . . . .                                                                           | 384 |
| 11.4.13.8. | Деэмульгирование. . . . .                                                                          | 384 |

|                                                                                                                                 |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 11.4.13.9. Температура застывания . . . . .                                                                                     | 385        |
| 11.4.13.10. Медная коррозия (испытание на медной пластинке) . . . . .                                                           | 385        |
| 11.4.13.11. Содержание воды (метод Карла Фишера) . . . . .                                                                      | 386        |
| 11.4.13.12. Стойкость к старению (метод Баадера) . . . . .                                                                      | 386        |
| 11.4.13.13. Стойкость к старению (метод <i>TOST</i> ) . . . . .                                                                 | 386        |
| 11.4.13.14. Кислотное число (число нейтрализации) . . . . .                                                                     | 386        |
| 11.4.13.15. Защитные антиокислительные свойства по отношению<br>к стали/черным металлам. . . . .                                | 387        |
| 11.4.13.16. Противоизносные свойства<br>(четырёхшариковая машина <i>Shell; VKA, DIN 51350</i> ) . . . . .                       | 387        |
| 11.4.13.17. Стойкость к сдвигу смазочных масел, содержащих полимеры . . . . .                                                   | 387        |
| 11.4.13.18. Механические испытания гидравлических жидкостей<br>в ротационных крыльчатых насосах ( <i>DIN 51389-2</i> ). . . . . | 388        |
| 11.4.13.19. Противоизносные свойства (Испытание на шестеренном<br><i>FZG</i> стенде; <i>DIN 534-1</i> и <i>-2</i> ) . . . . .   | 388        |
| 11.5. Фильтры гидравлических систем . . . . .                                                                                   | 389        |
| 11.5.1. Загрязняющие примеси в гидравлических жидкостях. . . . .                                                                | 389        |
| 11.5.2. Классификация чистоты масел . . . . .                                                                                   | 390        |
| 11.5.3. Фильтрация . . . . .                                                                                                    | 391        |
| 11.5.4. Требования к гидравлическим жидкостям. . . . .                                                                          | 392        |
| 11.6. Смазка станочного оборудования . . . . .                                                                                  | 392        |
| 11.6.1. Роль станочного оборудования . . . . .                                                                                  | 392        |
| 11.6.2. Смазка станочного оборудования . . . . .                                                                                | 392        |
| 11.6.3. Смазка отдельных узлов станочного оборудования . . . . .                                                                | 394        |
| 11.6.3.1. Гидравлическая система . . . . .                                                                                      | 394        |
| 11.6.3.2. Направляющие скольжения . . . . .                                                                                     | 396        |
| 11.6.3.3. Шпиндели (главный шпиндель станка, рабочие шпиндели). . . . .                                                         | 398        |
| 11.6.3.4. Коробки передач и подшипники . . . . .                                                                                | 398        |
| 11.6.4. Проблемы смазки станочного оборудования . . . . .                                                                       | 398        |
| 11.6.5. Гидравлические жидкости — новые тенденции, новые разработки . . . . .                                                   | 399        |
| 11.6.5.1. Области применения. . . . .                                                                                           | 399        |
| 11.6.5.2. Химизм . . . . .                                                                                                      | 399        |
| Базовые жидкости . . . . .                                                                                                      | 399        |
| Присадки 400                                                                                                                    |            |
| 11.6.5.3. Противозадирные и противоизносные свойства . . . . .                                                                  | 401        |
| 11.6.5.4. <i>DD</i> свойства . . . . .                                                                                          | 402        |
| 11.6.5.5. Деаэрация . . . . .                                                                                                   | 403        |
| 11.6.5.6. Статический коэффициент трения. . . . .                                                                               | 403        |
| 11.6.5.7. Окислительная стабильность. . . . .                                                                                   | 403        |
| 11.6.5.8. Устойчивость к сдвигу. . . . .                                                                                        | 404        |
| 11.6.5.9. Фильтрация цинксодержащих и беззольных гидравлических<br>жидкостей . . . . .                                          | 405        |
| 11.6.5.10. Электростатические заряды. . . . .                                                                                   | 406        |
| 11.6.5.11. Микроцарапины . . . . .                                                                                              | 406        |
| 11.6.5.12. Выводы . . . . .                                                                                                     | 407        |
| 11.7. Резюме. . . . .                                                                                                           | 408        |
| <b>Глава 12. Компрессорные масла . . . . .</b>                                                                                  | <b>410</b> |
| 12.1. Масла для воздушных компрессоров. . . . .                                                                                 | 410        |
| <i>Вольфганг Бук и Георг Линг</i>                                                                                               |            |



|            |                                                                                                   |     |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 12.1.1.    | Объемные компрессоры . . . . .                                                                    | 410 |
| 12.1.1.1.  | Поршневые компрессоры . . . . .                                                                   | 410 |
| 12.1.1.2.  | Смазка поршневых компрессоров . . . . .                                                           | 412 |
| 12.1.1.3.  | Ротационные поршневые компрессоры (одновальные, ротационные крыльчатые компрессоры) . . . . .     | 412 |
| 12.1.1.4.  | Смазка ротационных поршневых компрессоров . . . . .                                               | 413 |
| 12.1.1.5.  | Винтовые компрессоры . . . . .                                                                    | 414 |
| 12.1.1.6.  | Смазка винтовых компрессоров . . . . .                                                            | 414 |
| 12.1.1.7.  | Компрессоры Рута . . . . .                                                                        | 415 |
| 12.1.1.8.  | Смазка компрессоров Рута . . . . .                                                                | 415 |
| 12.1.2.    | Динамические компрессоры . . . . .                                                                | 415 |
| 12.1.2.1.  | Турбокомпрессоры . . . . .                                                                        | 415 |
| 12.1.2.2.  | Смазка турбокомпрессоров . . . . .                                                                | 415 |
| 12.1.3.    | Производство сжатого воздуха . . . . .                                                            | 415 |
| 12.1.4.    | Смазка газовых компрессоров . . . . .                                                             | 416 |
| 12.1.4.1.  | Кислородные компрессоры . . . . .                                                                 | 416 |
| 12.1.4.2.  | Компрессоры для кислых газов . . . . .                                                            | 416 |
| 12.1.4.3.  | Компрессоры для инертных газов . . . . .                                                          | 416 |
| 12.1.4.4.  | Углеродные компрессоры . . . . .                                                                  | 416 |
| 12.1.4.5.  | Смазка вакуумных насосов . . . . .                                                                | 416 |
| 12.1.5.    | Характеристики компрессорных масел . . . . .                                                      | 417 |
| 12.1.6.    | Стандарты и спецификации на компрессорные масла . . . . .                                         | 417 |
| 12.2.      | Масла для холодильных машин . . . . .                                                             | 424 |
|            | <i>Вольфганг Бук</i>                                                                              |     |
| 12.2.1.    | Введение . . . . .                                                                                | 424 |
| 12.2.2.    | Минимальные требования к маслам для холодильных машин . . . . .                                   | 426 |
| 12.2.2.1.  | <i>DIN</i> 51 503-1: Масла для холодильных машин, минимальные требования (1997) [12.12] . . . . . | 426 |
| 12.2.3.    | Классификация холодильных масел . . . . .                                                         | 427 |
| 12.2.3.1.  | Минеральные масла (ММ) — депарафинизированные нефтяные холодильные масла . . . . .                | 427 |
| 12.2.3.2.  | Минеральные масла (МО) — парафинизированные холодильные масла . . . . .                           | 428 |
| 12.2.3.3.  | Полусинтетические холодильные масла — смеси алкилбензолов и минеральных масел (ММ/АБ) . . . . .   | 428 |
| 12.2.3.4.  | Полностью синтетические холодильные масла — алкилбензолы (АБ) . . . . .                           | 428 |
| 12.2.3.5.  | Полностью синтетические холодильные масла — ПАО . . . . .                                         | 428 |
| 12.2.3.6.  | Полностью синтетические холодильные масла — сложные эфиры полиолов (РОЕ) . . . . .                | 429 |
| 12.2.3.7.  | Полностью синтетические холодильные масла — полигликоли (РАГ) для R134a . . . . .                 | 431 |
| 12.2.3.8.  | Полностью синтетические холодильные масла — полигликоли для NH <sub>3</sub> . . . . .             | 431 |
| 12.2.3.9.  | Прочие синтетические жидкости . . . . .                                                           | 432 |
| 12.2.3.10. | Холодильные масла для CO <sub>2</sub> . . . . .                                                   | 432 |
| 12.2.3.11. | Омеднение . . . . .                                                                               | 433 |
| 12.2.4.    | Типы компрессоров . . . . .                                                                       | 434 |
| 12.2.5.    | Выбор вязкости . . . . .                                                                          | 434 |
| 12.2.5.1.  | Общий обзор . . . . .                                                                             | 434 |

|                  |                                                                                                                               |            |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 12.2.5.2.        | Зависимость концентрации смеси от температуры и давления ( <i>RENISO Triton SE 55-R 134a</i> ) . . . . .                      | 435        |
| 12.2.5.3.        | Зависимость вязкости смеси от температуры, давления и концентрации хладагента ( <i>RENISO Triton SE 55-R 134a</i> ) . . . . . | 435        |
| 12.2.5.4.        | Плотность смеси в зависимости от температуры и концентрации хладагента ( <i>RENISO Triton SE 55-R 134a</i> ) . . . . .        | 437        |
| 12.2.5.5.        | Интервал смешиваемости, пороговая растворимость ( <i>RENISO Triton SE 55-R 134a</i> ) . . . . .                               | 438        |
| 12.2.6.          | Выводы . . . . .                                                                                                              | 439        |
| <b>Глава 13.</b> | <b>Турбинные масла . . . . .</b>                                                                                              | <b>440</b> |
|                  | <i>Вольфганг Бук</i>                                                                                                          |            |
| 13.1.            | Введение . . . . .                                                                                                            | 440        |
| 13.2.            | Требования к турбинным маслам — характеристики . . . . .                                                                      | 440        |
| 13.3.            | Композиции турбинных масел . . . . .                                                                                          | 441        |
| 13.4.            | Турбинные смазочные материалы . . . . .                                                                                       | 441        |
| 13.5.            | Контуры циркуляции турбинных масел . . . . .                                                                                  | 451        |
| 13.6.            | Контуры для промывочного турбинного масла . . . . .                                                                           | 452        |
| 13.7.            | Мониторинг и техническое обслуживание турбинных масел . . . . .                                                               | 452        |
| 13.8.            | Срок службы масел для паровых турбин . . . . .                                                                                | 453        |
| 13.9.            | Масла для газовых турбин — применение и требования . . . . .                                                                  | 454        |
| 13.10.           | Огнестойкие жидкости, не содержащие воды, применяемые на электростанциях . . . . .                                            | 455        |
| 13.11.           | Смазка гидротурбин и гидроэлектростанций . . . . .                                                                            | 456        |
| <b>Глава 14.</b> | <b>Жидкости для металлообработки . . . . .</b>                                                                                | <b>457</b> |
|                  | <i>Тео Манг, Кармен Фрейлер и Дейтрих Хорнер</i>                                                                              |            |
| 14.1.            | Механизм действия и выбор СОЖ . . . . .                                                                                       | 458        |
| 14.1.1.          | Смазка . . . . .                                                                                                              | 459        |
| 14.1.2.          | Охлаждение . . . . .                                                                                                          | 460        |
| 14.1.3.          | Значение СОЖ применительно к различным материалам режущего инструмента . . . . .                                              | 462        |
| 14.1.3.1.        | Высокоскоростные стали . . . . .                                                                                              | 463        |
| 14.1.3.2.        | Цементированные карбиды металлов . . . . .                                                                                    | 463        |
| 14.1.3.3.        | Карбиды металлов с покрытиями . . . . .                                                                                       | 463        |
| 14.1.3.4.        | Керамические материалы . . . . .                                                                                              | 463        |
| 14.1.3.5.        | Кубический нитрид бора ( <i>CBN</i> ) . . . . .                                                                               | 464        |
| 14.1.3.6.        | Поликристаллический алмаз ( <i>PCD</i> ) . . . . .                                                                            | 464        |
| 14.1.3.7.        | Покрытия . . . . .                                                                                                            | 464        |
| 14.1.4.          | Выбор СОЖ для различных методов резания и условий механической обработки . . . . .                                            | 465        |
| 14.2.            | Метод оценки трения и износа для применения СОЖ . . . . .                                                                     | 467        |
| 14.2.1.          | Срок службы режущего инструмента и число деталей, обработанных этим инструментом, как практические параметры оценки . . . . . | 468        |
| 14.2.2.          | Измерение сил резания в отборочных испытаниях . . . . .                                                                       | 468        |
| 14.2.3.          | Скорости подачи при постоянной силе подачи . . . . .                                                                          | 469        |
| 14.2.4.          | Измерение срока службы режущего инструмента экспресс-отборочными методами . . . . .                                           | 469        |
| 14.2.5.          | Геометрия резания и поток стружки . . . . .                                                                                   | 470        |
| 14.2.6.          | Другие ускоренные методы оценки . . . . .                                                                                     | 470        |
| 14.2.6.1.        | Измерение температуры . . . . .                                                                                               | 470        |

|           |                                                                            |     |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 14.2.6.2. | Радиоактивные режущие инструменты . . . . .                                | 470 |
| 14.2.6.3. | Обработка поверхности . . . . .                                            | 470 |
| 14.3.     | Водосмешиваемые СОЖ . . . . .                                              | 471 |
| 14.3.1.   | Номенклатура и кодирование . . . . .                                       | 471 |
| 14.3.2.   | Состав . . . . .                                                           | 472 |
| 14.3.2.1. | Эмульгаторы . . . . .                                                      | 474 |
| 14.3.2.2. | Вязкостные эмульсии . . . . .                                              | 479 |
| 14.3.2.3. | Инверсия фаз, определение типа эмульсии . . . . .                          | 480 |
| 14.3.2.4. | Степень диспергирования . . . . .                                          | 482 |
| 14.3.2.5. | Стабильность . . . . .                                                     | 483 |
| 14.3.2.6. | Ингибиторы коррозии и другие присадки . . . . .                            | 484 |
| 14.3.2.7. | СОЖ, содержащие эмульгаторы . . . . .                                      | 487 |
| 14.3.2.8. | СОЖ, содержащие полигликоли . . . . .                                      | 489 |
| 14.3.2.9. | Растворы солей . . . . .                                                   | 489 |
| 14.3.3.   | Защита от коррозии и методы испытания на коррозию . . . . .                | 490 |
| 14.3.4.   | Концентрация водосмешиваемых СОЖ . . . . .                                 | 491 |
| 14.3.4.1. | Определение концентрации по <i>DIN 51 368 (IP 137)</i> . . . . .           | 491 |
| 14.3.4.2. | Измерение концентрации с помощью ручных рефрактометров . . . . .           | 492 |
| 14.3.4.3. | Измерение концентрации по индивидуальным компонентам . . . . .             | 492 |
| 14.3.4.4. | Определение концентрации титрованием анионных компонентов . . . . .        | 492 |
| 14.3.4.5. | Определение концентрации по щелочному резерву . . . . .                    | 493 |
| 14.3.4.6. | Концентрация после центрифугирования . . . . .                             | 493 |
| 14.3.5.   | Стабильность СОЖ . . . . .                                                 | 493 |
| 14.3.5.1. | Определение физической стабильности эмульсий . . . . .                     | 494 |
| 14.3.5.2. | Электролитическая стабильность . . . . .                                   | 494 |
| 14.3.5.3. | Термическая стабильность . . . . .                                         | 495 |
| 14.3.5.4. | Стабильность к металлической стружке . . . . .                             | 496 |
| 14.3.6.   | Пенообразование . . . . .                                                  | 496 |
| 14.3.6.1. | Определение понятия и происхождение пены . . . . .                         | 497 |
| 14.3.6.2. | Предотвращение пенообразования . . . . .                                   | 497 |
| 14.3.6.3. | Методы определения способности к пенообразованию . . . . .                 | 499 |
| 14.3.7.   | Микробиологические характеристики жидкостей для металлообработки . . . . . | 500 |
| 14.3.7.1. | Гигиенические и токсикологические аспекты микроорганизмов . . . . .        | 501 |
| 14.3.7.2. | Методы определения колоний микроорганизмов . . . . .                       | 502 |
| 14.3.7.3. | Определение стойкости водосмешиваемых СОЖ к микроорганизмам . . . . .      | 503 |
| 14.3.7.4. | Снижение и предотвращение размножения микроорганизмов в СОЖ . . . . .      | 503 |
| 14.3.8.   | Защита СОЖ, содержащих биоциды . . . . .                                   | 505 |
| 14.3.8.1. | Альдегиды . . . . .                                                        | 509 |
| 14.3.8.2. | Соединения, выделяющие формальдегид . . . . .                              | 509 |
| 14.3.8.3. | Производные фенола . . . . .                                               | 509 |
| 14.3.8.4. | Производные сероуглерода . . . . .                                         | 510 |
| 14.3.8.5. | Изотиазолы . . . . .                                                       | 510 |
| 14.3.8.6. | Фунгициды . . . . .                                                        | 510 |

|           |                                                                                                  |     |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 14.3.8.7. | Гипохлориты . . . . .                                                                            | 510 |
| 14.3.8.8. | Перекись водорода, $H_2O_2$ . . . . .                                                            | 511 |
| 14.3.8.9. | Соединения четвертичного аммония . . . . .                                                       | 511 |
| 14.4.     | Чистые СОЖ . . . . .                                                                             | 511 |
| 14.4.1.   | Классификация чистых металлообрабатывающих масел<br>в соответствии<br>со спецификациями. . . . . | 512 |
| 14.4.2.   | Состав чистых металлообрабатывающих жидкостей. . . . .                                           | 512 |
| 14.4.2.1. | Базовые масла и присадки . . . . .                                                               | 512 |
| 14.4.2.2. | Значение вязкости при выборе чистых продуктов. . . . .                                           | 513 |
| 14.4.3.   | Образование масляного тумана и испарение масла . . . . .                                         | 514 |
| 14.4.3.1. | Испаряемость СОЖ . . . . .                                                                       | 515 |
| 14.4.3.2. | Масла с низкой склонностью к туманообразованию . . . . .                                         | 515 |
| 14.4.3.3. | Образование масляного тумана. . . . .                                                            | 515 |
| 14.4.3.4. | Сегментация и выделение масляных туманов . . . . .                                               | 517 |
| 14.4.3.5. | Токсичность масляного тумана . . . . .                                                           | 517 |
| 14.4.3.6. | Измерение масляного тумана . . . . .                                                             | 519 |
| 14.4.3.7. | Индекс масляного тумана . . . . .                                                                | 519 |
| 14.4.3.8. | Практическая концентрация масляного тумана . . . . .                                             | 521 |
| 14.5.     | Механическая обработка с геометрически определенными режущими<br>кромками . . . . .              | 523 |
| 14.5.1.   | Токарная обработка . . . . .                                                                     | 523 |
| 14.5.2.   | Сверление . . . . .                                                                              | 524 |
| 14.5.3.   | Фрезерование . . . . .                                                                           | 524 |
| 14.5.4.   | Нарезка шестерен . . . . .                                                                       | 525 |
| 14.5.5.   | Сверление глубоких отверстий . . . . .                                                           | 526 |
| 14.5.5.1. | Способы сверления глубоких отверстий . . . . .                                                   | 527 |
| 14.5.5.2. | Задачи, выполняемые СОЖ. . . . .                                                                 | 529 |
| 14.5.6.   | Нарезание резьбы метчиком . . . . .                                                              | 530 |
| 14.5.7.   | Развертка (протяжка). . . . .                                                                    | 530 |
| 14.6.     | Сточная обработка геометрически неопределенными режущими кромками . . . . .                      | 531 |
| 14.6.1.   | Шлифование . . . . .                                                                             | 531 |
| 14.6.1.1. | Высокоскоростное шлифование. . . . .                                                             | 532 |
| 14.6.1.2. | Абразивные материалы шлифовальных кругов и связующие . . . . .                                   | 533 |
| 14.6.1.3. | Требования к шлифовальным жидкостям. . . . .                                                     | 534 |
| 14.6.1.4. | Соображения по специальным материалам<br>обрабатываемых изделий . . . . .                        | 534 |
| 14.6.1.5. | Высокоскоростное шлифование с применением CBN<br>шлифовальных кругов . . . . .                   | 535 |
| 14.6.1.6. | Хонингование. . . . .                                                                            | 536 |
| 14.6.1.7. | Масла для хонингования . . . . .                                                                 | 538 |
| 14.6.1.8. | Притирка. . . . .                                                                                | 539 |
| 14.6.1.9. | Притирочный порошок и носители . . . . .                                                         | 539 |
| 14.7.     | Требования к специальным материалам для операции по обработке металлов. . . . .                  | 540 |
| 14.7.1.   | Черные металлы . . . . .                                                                         | 540 |
| 14.7.1.1. | Сталь . . . . .                                                                                  | 540 |
| 14.7.1.2. | Инструментальные стали . . . . .                                                                 | 541 |
| 14.7.1.3. | Быстрорежущая сталь ( <i>HSS</i> ) . . . . .                                                     | 541 |
| 14.7.1.4. | Нержавеющие стали . . . . .                                                                      | 541 |
| 14.7.1.5. | Чугун . . . . .                                                                                  | 541 |

|           |                                                                                                                                                   |     |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 14.7.2.   | Алюминий . . . . .                                                                                                                                | 542 |
| 14.7.2.1. | Влияние типа алюминиевого сплава . . . . .                                                                                                        | 542 |
| 14.7.2.2. | Поведение алюминия во время механической обработки . . . . .                                                                                      | 543 |
| 14.7.2.3. | Материалы режущего инструмента . . . . .                                                                                                          | 545 |
| 14.7.3.   | Магний и его сплавы . . . . .                                                                                                                     | 546 |
| 14.7.4.   | Кобальт. . . . .                                                                                                                                  | 547 |
| 14.7.4.1. | Проблемы охраны здоровья и безопасности при работе<br>с карбидами . . . . .                                                                       | 548 |
| 14.7.4.2. | Применение СОЖ в процессах обработки карбидов . . . . .                                                                                           | 548 |
| 14.7.5.   | Титан. . . . .                                                                                                                                    | 549 |
| 14.7.6.   | Никель и никелевые сплавы. . . . .                                                                                                                | 549 |
| 14.8.     | Система циркуляции металлообрабатывающих жидкостей . . . . .                                                                                      | 550 |
| 14.8.1.   | Снабжение металлообрабатывающей жидкости. . . . .                                                                                                 | 550 |
| 14.8.1.1. | Шлифование . . . . .                                                                                                                              | 552 |
| 14.8.2.   | Станки с индивидуальной подачей и с централизованными системами<br>подачи СОЖ . . . . .                                                           | 553 |
| 14.8.3.   | Смазочные материалы в СОЖ . . . . .                                                                                                               | 555 |
| 14.8.4.   | Отделение твердых частиц . . . . .                                                                                                                | 555 |
| 14.8.4.1. | Тонкость фильтра и концентрация механических примесей . . . . .                                                                                   | 556 |
| 14.8.4.2. | Удаление механических примесей в основном потоке.<br>Вспомогательные потоки полной и частичной очистки СОЖ . . . . .                              | 556 |
| 14.8.4.3. | Процессы очистки. . . . .                                                                                                                         | 557 |
| 14.8.4.4. | Оборудование для очистки от мехпримесей . . . . .                                                                                                 | 559 |
| 14.8.5.   | Пластические и уплотнительные материалы в механообработке,<br>совместимые с жидкостями, используемыми при обработке металлов<br>резанием. . . . . | 566 |
| 14.8.6.   | Хранение и приготовление СОЖ на водной и безводной основе.<br>Мониторинг их качества . . . . .                                                    | 567 |
| 14.8.6.1. | Хранение СОЖ. . . . .                                                                                                                             | 567 |
| 14.8.6.2. | Приготовление СОЖ на водной основе . . . . .                                                                                                      | 568 |
| 14.8.6.3. | Мониторинг СОЖ. . . . .                                                                                                                           | 568 |
| 14.8.6.4. | Поддержание СОЖ на уровне работоспособности . . . . .                                                                                             | 570 |
| 14.8.6.5. | Возможные проблемы при использовании СОЖ и методы<br>их устранения . . . . .                                                                      | 572 |
| 14.8.7.   | Утилизация и переработка отработанных СОЖ . . . . .                                                                                               | 574 |
| 14.8.7.1. | Утилизация отработанных СОЖ. . . . .                                                                                                              | 574 |
| 14.8.7.2. | Показатели качества водной составляющей<br>утилизируемых СОЖ. . . . .                                                                             | 575 |
| 14.8.7.3. | Разрушение эмульсий электролитами . . . . .                                                                                                       | 576 |
| 14.8.7.4. | Разделение эмульсий за счет флотации . . . . .                                                                                                    | 578 |
| 14.8.7.5. | Разрушение эмульсий адсорбентами . . . . .                                                                                                        | 578 |
| 14.8.7.6. | Разделение СОЖ на водной основе термическими методами. . . . .                                                                                    | 580 |
| 14.8.7.7. | Ультрафильтрация (мембранная очистка) . . . . .                                                                                                   | 580 |
| 14.8.7.8. | Выбор метода утилизации . . . . .                                                                                                                 | 581 |
| 14.9.     | Стоимость СОЖ . . . . .                                                                                                                           | 582 |
| 14.9.1.   | Стоимость применения СОЖ . . . . .                                                                                                                | 582 |
| 14.9.1.1. | Капиталовложения (амортизация, финансирование,<br>расходы на текущее обслуживание) . . . . .                                                      | 582 |
| 14.9.1.2. | Энергозатраты . . . . .                                                                                                                           | 582 |
| 14.9.1.3. | Стоимость СОЖ и добавок к ним. . . . .                                                                                                            | 582 |

|                                                             |                                                                                                                                 |            |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 14.9.1.4.                                                   | Контроль качества СОЖ                                                                                                           | 582        |
| 14.9.1.5.                                                   | Прочие расходы                                                                                                                  | 582        |
| 14.9.1.6.                                                   | Стоимость разрушения эмульсий и утилизации СОЖ                                                                                  | 583        |
| 14.9.2.                                                     | Стоимость применения СОЖ в постоянных системах                                                                                  | 583        |
| 14.9.2.1.                                                   | Стоимость специальных СОЖ                                                                                                       | 583        |
| 14.9.2.2.                                                   | Компьютерная оптимизация использования СОЖ                                                                                      | 587        |
| 14.10.                                                      | Новые направления в технологии СОЖ                                                                                              | 588        |
| 14.10.1.                                                    | Масло вместо эмульсии                                                                                                           | 588        |
| 14.10.1.1.                                                  | Семейство многофункциональных СОЖ                                                                                               | 589        |
| 14.10.1.2.                                                  | Моющие линии                                                                                                                    | 590        |
| 14.10.1.3.                                                  | Удаление масла из отходов металла и с оборудования                                                                              | 590        |
| 14.10.1.4.                                                  | Перспективы универсальных жидкостей — «Unifluid»                                                                                | 591        |
| 14.10.2.                                                    | Минимизация количества смазочных материалов                                                                                     | 591        |
| 14.10.2.1.                                                  | Анализ потребностей в СОЖ при различных процессах<br>металлообработки                                                           | 591        |
| 14.10.2.2.                                                  | Системы малой подачи СОЖ                                                                                                        | 593        |
| 14.10.2.3.                                                  | СОЖ для систем с малой подачей                                                                                                  | 594        |
| 14.10.2.4.                                                  | Исследование факторов, влияющих на образование<br>масляного тумана СОЖ для систем с малой подачей                               | 595        |
| 14.10.2.5.                                                  | Оптимизация систем с малой подачей СОЖ<br>для сверлильного оборудования                                                         | 597        |
| <b>Глава 15. Смазочные масла, используемые при формовке</b> |                                                                                                                                 | <b>599</b> |
| 15.1.                                                       | Смазочные масла для формования из металлического листа<br><i>Тео Манг, Франц Кубицки, Ахим Лосх, Вольфганг Бусс</i>             | 599        |
| 15.1.1.                                                     | Процессы                                                                                                                        | 599        |
| 15.1.2.                                                     | Базовые параметры в процессах формования                                                                                        | 600        |
| 15.1.2.1.                                                   | Структура кристаллической решетки металла                                                                                       | 600        |
| 15.1.2.2.                                                   | Предел текучести                                                                                                                | 600        |
| 15.1.2.3.                                                   | Деформация                                                                                                                      | 601        |
| 15.1.2.4.                                                   | Кривые текучести                                                                                                                | 601        |
| 15.1.2.5.                                                   | Значение деформации, сопротивление формованию,<br>давление на поверхность                                                       | 602        |
| 15.1.2.6.                                                   | Скорость деформации                                                                                                             | 603        |
| 15.1.2.7.                                                   | Анизотропия, текстура, значение $R$                                                                                             | 603        |
| 15.1.3.                                                     | Глубокое выдавливание                                                                                                           | 604        |
| 15.1.3.1.                                                   | Трение и смазка в различных областях в процессе<br>глубокого выдавливания                                                       | 605        |
| 15.1.3.2.                                                   | Зависимость смазочного эффекта действия от толщины<br>листа металла, размеров выдавливаемой части<br>и эффективности деформации | 608        |
| 15.1.3.3.                                                   | Оценка пригодности смазочных материалов для глубокого<br>выдавливания                                                           | 610        |
| 15.1.4.                                                     | Обтяжное выдавливание и сочетание обтяжки и глубокого<br>выдавливания                                                           | 611        |
| 15.1.5.                                                     | Резание наклонным ножом                                                                                                         | 612        |
| 15.1.5.1.                                                   | Штамповка (резка материала штампами)                                                                                            | 613        |
| 15.1.5.2.                                                   | Точные заготовительные операции                                                                                                 | 616        |
| 15.1.6.                                                     | Материал и микроструктура поверхности                                                                                           | 618        |
| 15.1.6.1.                                                   | Материал                                                                                                                        | 618        |

|             |                                                                                                          |     |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 15.1.6.2.   | Микроструктура поверхности . . . . .                                                                     | 620 |
| 15.1.7.     | Инструменты, применяемые при формовании из листа металла . . . . .                                       | 621 |
| 15.1.8.     | Смазочные материалы для формования из листа металла . . . . .                                            | 622 |
| 15.1.8.1.   | Подготовительные операции к процессу формования . . . . .                                                | 623 |
| 15.1.8.2.   | Поведение смазочных материалов в процессе формования . . . . .                                           | 626 |
| 15.1.8.3.   | Операции после процесса формования . . . . .                                                             | 626 |
| 15.1.8.4.   | Общие направления развития смазочных материалов для<br>формования из листа металла . . . . .             | 627 |
| 15.1.9.     | Защита от коррозии . . . . .                                                                             | 628 |
| 15.1.9.1.   | Механизм коррозии . . . . .                                                                              | 628 |
| 15.1.9.2.   | Временная защита от коррозии . . . . .                                                                   | 629 |
| 15.1.9.3.   | Испытания на коррозию . . . . .                                                                          | 631 |
| 15.1.10.    | Удаление смазочных материалов, используемых в процессе<br>формования — промышленные очистители . . . . . | 631 |
| 15.1.10.1.  | Промежуточная очистка в процессе производства . . . . .                                                  | 632 |
| 15.1.10.2.  | Очистка перед тепловой обработкой и покрытием<br>поверхности . . . . .                                   | 632 |
| 15.1.10.3.  | Очистка в процессе технического обслуживания . . . . .                                                   | 633 |
| 15.1.10.4.  | Методы очистки и реагенты . . . . .                                                                      | 633 |
| 15.1.10.5.  | Систематизация моющих средств . . . . .                                                                  | 634 |
| 15.1.11.    | Исследование трибологических характеристик . . . . .                                                     | 641 |
| 15.1.12.    | Формование из листа металла в автомобильной индустрии . . . . .                                          | 644 |
| 15.1.12.1.  | Предварительная смазка . . . . .                                                                         | 644 |
| 15.1.12.2.  | Дрессировка полосы . . . . .                                                                             | 646 |
| 15.1.12.3.  | Нанесение масла на ленту металла . . . . .                                                               | 646 |
| 15.1.12.4.  | Транспортировка и хранение листов металла . . . . .                                                      | 646 |
| 15.1.12.5.  | Промывка стальных полос и заготовок . . . . .                                                            | 647 |
| 15.1.12.6.  | Дополнительная смазка . . . . .                                                                          | 647 |
| 15.1.12.7.  | Прессование . . . . .                                                                                    | 647 |
| 15.1.12.8.  | Транспортировка и хранение штампованных деталей . . . . .                                                | 648 |
| 15.1.12.9.  | Сборка . . . . .                                                                                         | 649 |
| 15.1.12.10. | Очистка и фосфатирование . . . . .                                                                       | 650 |
| 15.1.12.11. | Катафоретическое покрытие . . . . .                                                                      | 650 |
| 15.1.12.12. | Экономический эффект предварительной смазки . . . . .                                                    | 650 |
| 15.1.12.13. | Сухие пленочные смазочные покрытия . . . . .                                                             | 651 |
| 15.2.       | Смазочные материалы для волочения проволоки, труб и профилей . . . . .                                   | 653 |
|             | <i>Тео Манг и Вольфганг Бусс</i>                                                                         |     |
| 15.2.1.     | Трение и смазочное действие, инструменты и станки . . . . .                                              | 653 |
| 15.2.1.1.   | Классификация процессов формования . . . . .                                                             | 653 |
| 15.2.1.2.   | Трение и смазочное действие. Станки и инструменты<br>для волочения проволоки . . . . .                   | 654 |
| 15.2.1.3.   | Силы и напряжения, действующие при волочении . . . . .                                                   | 655 |
| 15.2.1.4.   | Инструменты для волочения и износ материалов . . . . .                                                   | 656 |
| 15.2.1.5.   | Разрыв проволоки . . . . .                                                                               | 658 |
| 15.2.1.6.   | Гидродинамическое волочение . . . . .                                                                    | 659 |
| 15.2.1.7.   | Трение на барабане . . . . .                                                                             | 659 |
| 15.2.1.8.   | Нанесение смазочных материалов при влажном волочении . . . . .                                           | 661 |
| 15.2.1.9.   | Сухое волочение . . . . .                                                                                | 662 |
| 15.2.1.10.  | Применение паст или высоковязких смазочных материалов . . . . .                                          | 663 |
| 15.2.2.     | Волочение медной проволоки . . . . .                                                                     | 663 |

|           |                                                                                                            |     |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 15.2.2.1. | Смазочные материалы . . . . .                                                                              | 664 |
| 15.2.2.2. | Концентрация смазочных материалов. . . . .                                                                 | 665 |
| 15.2.2.3. | Растворимость медьсодержащих продуктов . . . . .                                                           | 666 |
| 15.2.2.4. | Качество воды и электролитическая стабильность<br>эмульсий . . . . .                                       | 666 |
| 15.2.2.5. | Лабораторные методы анализа . . . . .                                                                      | 667 |
| 15.2.2.6. | Температура смазочных материалов. . . . .                                                                  | 667 |
| 15.2.2.7. | Влияние смазочных материалов на поверхность<br>для эмалирования . . . . .                                  | 667 |
| 15.2.2.8. | Циркуляционные системы и очистка эмульсий волочения. . . . .                                               | 668 |
| 15.2.3.   | Волочение стальной проволоки. . . . .                                                                      | 668 |
| 15.2.3.1. | Требования . . . . .                                                                                       | 668 |
| 15.2.3.2. | Многослойная смазочная подложка . . . . .                                                                  | 669 |
| 15.2.3.3. | Смазочные подложки на основе извести. . . . .                                                              | 669 |
| 15.2.3.4. | Смазочные подложки на основе буры . . . . .                                                                | 670 |
| 15.2.3.5. | Смазочные подложки на основе фосфатов. . . . .                                                             | 670 |
| 15.2.3.6. | Оксалатное и силикатное покрытия. . . . .                                                                  | 670 |
| 15.2.3.7. | Смазочные материалы для волочения стальной проволоки . . . . .                                             | 671 |
| 15.2.4.   | Волочение алюминиевой проволоки . . . . .                                                                  | 673 |
| 15.2.4.1. | Волочильные станы и смазка. . . . .                                                                        | 673 |
| 15.2.4.2. | Смазочные материалы для волочения алюминиевой<br>проволоки . . . . .                                       | 673 |
| 15.2.5.   | Волочение из других материалов. . . . .                                                                    | 674 |
| 15.2.5.1. | Нержавеющая сталь . . . . .                                                                                | 674 |
| 15.2.5.2. | Никель . . . . .                                                                                           | 674 |
| 15.2.5.3. | Вольфрам . . . . .                                                                                         | 674 |
| 15.2.6.   | Профильное волочение . . . . .                                                                             | 674 |
| 15.2.6.1. | Функции смазочных материалов при профильном<br>волочении . . . . .                                         | 675 |
| 15.2.6.2. | Предварительная обработка и использование смазочных<br>материалов при профильном волочении стали . . . . . | 675 |
| 15.2.7.   | Волочение труб. . . . .                                                                                    | 676 |
| 15.2.7.1. | Методы волочения труб . . . . .                                                                            | 676 |
| 15.2.7.2. | Способы волочения труб, используемые инструменты<br>и нанесение соответствующих покрытий . . . . .         | 677 |
| 15.2.7.3. | Смазочные материалы и предварительная обработка<br>поверхностей при волочении труб . . . . .               | 678 |
| 15.2.8.   | Гидроформинг. . . . .                                                                                      | 681 |
| 15.2.8.1. | Принципы проведения процесса . . . . .                                                                     | 683 |
| 15.2.8.2. | Способ пространственного расположения . . . . .                                                            | 683 |
| 15.2.8.3. | Трибологические аспекты гидроформинга . . . . .                                                            | 685 |
| 15.2.8.4. | Смазочные материалы для гидроформинга . . . . .                                                            | 685 |
| 15.3.     | Смазочные материалы для процессов прокатки . . . . .                                                       | 686 |
|           | <i>Тео Манг и Вольфганг Бусс</i>                                                                           |     |
| 15.3.1.   | Обзор . . . . .                                                                                            | 686 |
| 15.3.1.1. | Скорость вращения валков при прокатке . . . . .                                                            | 687 |
| 15.3.1.2. | Рационализация производства . . . . .                                                                      | 687 |
| 15.3.1.3. | Качество материала и поверхности . . . . .                                                                 | 688 |
| 15.3.1.4. | Требования охраны труда . . . . .                                                                          | 688 |
| 15.3.2.   | Трение и смазка при прокатке . . . . .                                                                     | 688 |



|                  |                                                                                               |            |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 15.3.3.          | Листовой прокат . . . . .                                                                     | 691        |
| 15.3.3.1.        | Горячий прокат . . . . .                                                                      | 691        |
| 15.3.3.2.        | Холодный прокат . . . . .                                                                     | 692        |
| 15.3.3.3.        | Сверхтонкие листы холодной прокатки . . . . .                                                 | 696        |
| 15.3.3.4.        | Холодная прокатка листов из высоколегированной стали . . . . .                                | 698        |
| 15.3.4.          | Прокатка алюминиевых листов . . . . .                                                         | 700        |
| 15.3.5.          | Горячая прокатка алюминия . . . . .                                                           | 700        |
| 15.3.6.          | Холодная прокатка алюминия . . . . .                                                          | 700        |
| 15.3.7.          | Прокатка других материалов . . . . .                                                          | 702        |
| 15.4.            | Смазочные материалы для твердого формования металла (штамповки,ковки, выдавливания) . . . . . | 702        |
|                  | <i>Тео Манг и Вольфганг Бусс</i>                                                              |            |
| 15.4.1.          | Применяемые процессы . . . . .                                                                | 703        |
| 15.4.1.1.        | Обработка металлов горячей осадкой . . . . .                                                  | 703        |
| 15.4.1.2.        | Выдавливание . . . . .                                                                        | 703        |
| 15.4.1.3.        | Ковка с матричными штампами . . . . .                                                         | 703        |
| 15.4.1.4.        | Открытая ковка . . . . .                                                                      | 704        |
| 15.4.2.          | Температура формования . . . . .                                                              | 704        |
| 15.4.2.1.        | Холодное формование . . . . .                                                                 | 704        |
| 15.4.2.2.        | Теплое формование . . . . .                                                                   | 704        |
| 15.4.2.3.        | Горячее формование . . . . .                                                                  | 704        |
| 15.4.3.          | Трение и смазка при холодной ковке и холодном выдавливании . . . . .                          | 705        |
| 15.4.3.1.        | Методы исследования процессов трения и испытания смазочных материалов . . . . .               | 705        |
| 15.4.3.2.        | Критерии выбора смазочных материалов и технологии смазки . . . . .                            | 707        |
| 15.4.3.3.        | Смазочные масла для процессов холодного выдавливания стали (масла для выдавливания) . . . . . | 709        |
| 15.4.3.4.        | Фосфатные покрытия и мыльная смазка при холодном выдавливании стали . . . . .                 | 711        |
| 15.4.3.5.        | Твердые смазочные материалы для холодного выдавливания стали . . . . .                        | 714        |
| 15.4.4.          | Теплое выдавливание и ковка . . . . .                                                         | 716        |
| 15.4.4.1.        | Температурный интервал 350–500 °С . . . . .                                                   | 718        |
| 15.4.4.2.        | Температурный интервал 350–500 °С . . . . .                                                   | 718        |
| 15.4.4.3.        | Температурный интервал 500–600 °С . . . . .                                                   | 718        |
| 15.4.4.4.        | Температурный интервал свыше 600 °С . . . . .                                                 | 718        |
| 15.4.5.          | Система смазки при горячей ковке . . . . .                                                    | 719        |
| 15.4.5.1.        | Требования к смазочным материалам для горячейковки . . . . .                                  | 720        |
| 15.4.5.2.        | Методы испытания смазочных материалов . . . . .                                               | 722        |
| 15.4.6.          | Горячая ковка стали . . . . .                                                                 | 722        |
| 15.4.6.1.        | Смазочные материалы . . . . .                                                                 | 723        |
| 15.4.7.          | Ковка алюминия . . . . .                                                                      | 724        |
| 15.4.8.          | Изотермическая ковка и ковка горячим молотом . . . . .                                        | 724        |
| 15.4.9.          | Применение и выбор смазочного материала . . . . .                                             | 725        |
| <b>Глава 16.</b> | <b>Пластичные смазки . . . . .</b>                                                            | <b>729</b> |
|                  | <i>Уилфрид Дрезель и Рольф-Петер Хеклер</i>                                                   |            |
| 16.1.            | Введение . . . . .                                                                            | 729        |
| 16.1.1.          | Определение . . . . .                                                                         | 729        |

|           |                                                                                                                        |     |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 16.1.2.   | История вопроса . . . . .                                                                                              | 729 |
| 16.1.3.   | Преимущества перед смазочными маслами . . . . .                                                                        | 730 |
| 16.1.4.   | Недостатки . . . . .                                                                                                   | 730 |
| 16.1.5.   | Классификация . . . . .                                                                                                | 731 |
| 16.2.     | Загустители . . . . .                                                                                                  | 732 |
| 16.2.1.   | Простые мыла . . . . .                                                                                                 | 732 |
| 16.2.1.1. | Анионы мыла . . . . .                                                                                                  | 733 |
| 16.2.1.2. | Катионы мыла . . . . .                                                                                                 | 733 |
| 16.2.1.3. | Литиевые мыла . . . . .                                                                                                | 733 |
| 16.2.1.4. | Кальциевые мыла . . . . .                                                                                              | 734 |
| 16.2.1.5. | Натриевые мыла . . . . .                                                                                               | 735 |
| 16.2.1.6. | Прочие мыла . . . . .                                                                                                  | 736 |
| 16.2.1.7. | Смешанные катионные мыла $M_1X/M_2X$ . . . . .                                                                         | 736 |
| 16.2.1.8. | Смешанные анионные мыла $MX_1/MX_2$ . . . . .                                                                          | 737 |
| 16.2.2.   | Комплексные мыла . . . . .                                                                                             | 737 |
| 16.2.2.1. | Литиевые комплексные мыла . . . . .                                                                                    | 738 |
| 16.2.2.2. | Кальциевые комплексные мыла . . . . .                                                                                  | 740 |
| 16.2.2.3. | Комплексные мыла на основе сульфоната кальция . . . . .                                                                | 740 |
| 16.2.2.4. | Алюминиевые комплексные мыла . . . . .                                                                                 | 741 |
| 16.2.2.5. | Другие комплексные мыла . . . . .                                                                                      | 741 |
| 16.2.3.   | Другие органические загустители . . . . .                                                                              | 742 |
| 16.2.4.   | Неионные органические загустители . . . . .                                                                            | 742 |
| 16.2.4.1. | Димочевины и тетрамоочевины . . . . .                                                                                  | 743 |
| 16.2.4.2. | Другие неионные органические загустители . . . . .                                                                     | 744 |
| 16.2.5.   | Неорганические загустители . . . . .                                                                                   | 744 |
| 16.2.5.1. | Глины . . . . .                                                                                                        | 745 |
| 16.2.5.2. | Высокодисперсная кремниевая кислота . . . . .                                                                          | 745 |
| 16.2.6.   | Прочие загустители . . . . .                                                                                           | 745 |
| 16.2.7.   | Временно загущенные жидкости . . . . .                                                                                 | 746 |
| 16.3.     | Базовые масла . . . . .                                                                                                | 747 |
| 16.3.1.   | Минеральные масла . . . . .                                                                                            | 747 |
| 16.3.2.   | Синтетические базовые масла . . . . .                                                                                  | 747 |
| 16.3.2.1. | Синтетические углеводороды . . . . .                                                                                   | 748 |
| 16.3.2.2. | Другие синтетические базовые масла . . . . .                                                                           | 748 |
| 16.3.2.3. | Смеси на основе несмешиваемых базовых масел . . . . .                                                                  | 749 |
| 16.4.     | Структура смазки . . . . .                                                                                             | 749 |
| 16.5.     | Присадки . . . . .                                                                                                     | 750 |
| 16.5.1.   | Модификаторы структуры . . . . .                                                                                       | 750 |
| 16.5.2.   | Антикоррозийные присадки (ингибиторы коррозии) . . . . .                                                               | 751 |
| 16.5.3.   | Противозадирные и противоизносные присадки . . . . .                                                                   | 751 |
| 16.5.4.   | Твердые смазки . . . . .                                                                                               | 751 |
| 16.5.5.   | Модификаторы трения . . . . .                                                                                          | 752 |
| 16.5.6.   | Наноматериалы . . . . .                                                                                                | 752 |
| 16.6.     | Производство смазок . . . . .                                                                                          | 753 |
| 16.6.1.   | Смазки на основе металлического мыла . . . . .                                                                         | 753 |
| 16.6.1.1. | Серийное производство с использованием предварительно<br>изготавливаемых мыл на основе гидроксидов металлов . . . . .  | 753 |
| 16.6.1.2. | Серийное производство смазок на основе мыл,<br>изготавливаемых <i>in-situ</i> на основе гидроксидов металлов . . . . . | 753 |
| 16.6.1.3. | Непрерывное производство . . . . .                                                                                     | 755 |

|                  |                                                                                                                                                   |            |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 16.6.2.          | Олигомочевинные смазки .....                                                                                                                      | 756        |
| 16.6.3.          | Гелевые смазки .....                                                                                                                              | 757        |
| 16.7.            | Реология смазок .....                                                                                                                             | 757        |
| 16.8.            | Характеристики смазок .....                                                                                                                       | 758        |
| 16.8.1.          | Методы испытаний .....                                                                                                                            | 760        |
| 16.8.2.          | Аналитические методы .....                                                                                                                        | 761        |
| 16.9.            | Применение смазок .....                                                                                                                           | 762        |
| 16.9.1.          | Подшипники качения .....                                                                                                                          | 763        |
| 16.9.1.1.        | Интервалы повторного смазывания .....                                                                                                             | 764        |
| 16.9.2.          | Автомобили, грузовой транспорт, дорожная и строительная техника .....                                                                             | 764        |
| 16.9.3.          | Металлургическая промышленность .....                                                                                                             | 769        |
| 16.9.4.          | Горная промышленность .....                                                                                                                       | 770        |
| 16.9.5.          | Железнодорожные смазки .....                                                                                                                      | 771        |
| 16.9.6.          | Передаточные механизмы .....                                                                                                                      | 771        |
| 16.9.7.          | Применение в пищевой промышленности .....                                                                                                         | 772        |
| 16.9.8.          | Текстильные станки .....                                                                                                                          | 772        |
| 16.9.9.          | Устройства для нанесения смазочных материалов .....                                                                                               | 772        |
| 16.9.10.         | Специальное применение и вечное смазывание .....                                                                                                  | 773        |
| 16.9.11.         | Применение в сочетании с полимерными материалами .....                                                                                            | 773        |
| 16.10.           | Рынок смазочных материалов .....                                                                                                                  | 774        |
| 16.11.           | Экология и окружающая среда .....                                                                                                                 | 776        |
| 16.12.           | Трибология смазок .....                                                                                                                           | 777        |
| <b>Глава 17.</b> | <b>Твердые смазки .....</b>                                                                                                                       | <b>779</b> |
|                  | <i>Кристиан Буш</i>                                                                                                                               |            |
| 17.1.            | Классификация твердых смазочных материалов .....                                                                                                  | 779        |
| 17.1.1.          | Категория 1: Структурные смазки .....                                                                                                             | 780        |
| 17.1.2.          | Категория 2: Механические смазки .....                                                                                                            | 780        |
| 17.1.1.2.        | Самосмазывающиеся материалы .....                                                                                                                 | 781        |
| 17.1.2.2.        | Смазочные материалы, требующие носителя .....                                                                                                     | 783        |
| 17.1.2.3.        | Материалы с косвенными смазочными свойствами, основанными на их твердости (слои, наносимые путем ФОП и ХОП, а также алмазоподобный углерод) ..... | 784        |
| 17.1.3.          | Категория 3: Мыла .....                                                                                                                           | 784        |
| 17.1.4.          | Категория 4: Химически активные смазочные вещества .....                                                                                          | 784        |
| 17.2.            | Характеристики .....                                                                                                                              | 784        |
| 17.2.1.          | Кристаллическая структура слоистых твердых смазок .....                                                                                           | 785        |
| 17.2.1.1.        | Графит .....                                                                                                                                      | 785        |
| 17.2.1.2.        | Дисульфид молибдена .....                                                                                                                         | 785        |
| 17.2.2.          | Термостойкость .....                                                                                                                              | 785        |
| 17.2.3.          | Точка плавления .....                                                                                                                             | 786        |
| 17.2.4.          | Теплопроводность .....                                                                                                                            | 786        |
| 17.2.5.          | Адсорбированные пленки .....                                                                                                                      | 786        |
| 17.2.6.          | Механические свойства .....                                                                                                                       | 787        |
| 17.2.7.          | Химическая стабильность .....                                                                                                                     | 787        |
| 17.2.8.          | Чистота .....                                                                                                                                     | 787        |
| 17.2.9.          | Размер частиц .....                                                                                                                               | 787        |
| 17.3.            | Продукты, содержащие твердые смазки .....                                                                                                         | 788        |
| 17.3.1.          | Порошки .....                                                                                                                                     | 788        |
| 17.3.1.1.        | Твердые смазки в несущей среде .....                                                                                                              | 788        |

|         |                                                                                               |     |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 17.3.2. | Дисперсии и суспензии . . . . .                                                               | 789 |
| 17.3.3. | Консистентные смазки и смазочные пасты . . . . .                                              | 789 |
| 17.3.4. | Пасты . . . . .                                                                               | 791 |
| 17.3.5. | Сухие смазочные пленки . . . . .                                                              | 791 |
| 17.4.   | Промышленное применение продуктов, содержащих твердые смазки . . . . .                        | 796 |
| 17.4.1. | Смазка винтов . . . . .                                                                       | 796 |
| 17.4.2. | Смазка роликоподшипников . . . . .                                                            | 797 |
| 17.4.3. | Смазка подшипников скольжения, направляющих скольжения<br>и поверхностей скольжения . . . . . | 798 |
| 17.4.4. | Смазка цепей . . . . .                                                                        | 798 |
| 17.4.5. | Смазка пластмасс и эластомеров . . . . .                                                      | 799 |

## **Глава 18. Методы лабораторных испытаний смазочных материалов . . . . . 800**

*Зигфрид Нолл и Роман Мюллер*

|            |                                                                             |     |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 18.1.      | Введение . . . . .                                                          | 800 |
| 18.2.      | Плотность . . . . .                                                         | 800 |
| 18.3.      | Вязкость . . . . .                                                          | 800 |
| 18.3.1.    | Капиллярные вискозиметры . . . . .                                          | 801 |
| 18.3.2.    | Ротационные вискозиметры . . . . .                                          | 801 |
| 18.4.      | Показатель преломления . . . . .                                            | 801 |
| 18.5.      | Структурный анализ . . . . .                                                | 802 |
| 18.6.      | Температура вспышки . . . . .                                               | 802 |
| 18.7.      | Поверхностные явления . . . . .                                             | 802 |
| 18.7.1.    | Высвобождение воздуха . . . . .                                             | 803 |
| 18.7.2.    | Отделение воды и деэмульгируемость . . . . .                                | 803 |
| 18.7.3.    | Пенообразующие свойства . . . . .                                           | 803 |
| 18.8.      | Температура помутнения, температура текучести . . . . .                     | 804 |
| 18.9.      | Анилиновая точка . . . . .                                                  | 804 |
| 18.10.     | Содержание воды . . . . .                                                   | 804 |
| 18.11.     | Зольность . . . . .                                                         | 804 |
| 18.12.     | Кислотность и щелочность . . . . .                                          | 805 |
| 18.13.     | Испытание на старение . . . . .                                             | 805 |
| 18.14.     | Гидролитическая стабильность . . . . .                                      | 806 |
| 18.15.     | Испытания на коррозию . . . . .                                             | 806 |
| 18.16.     | Совместимость масел с уплотнительными и изоляционными материалами . . . . . | 807 |
| 18.17.     | Потери при испарении . . . . .                                              | 808 |
| 18.18.     | Анализ и испытание пластичных смазочных материалов . . . . .                | 808 |
| 18.18.1.   | Консистенция . . . . .                                                      | 808 |
| 18.18.2.   | Температура каплепадения . . . . .                                          | 808 |
| 18.18.3.   | Маслоотделение . . . . .                                                    | 809 |
| 18.18.4.   | Прочность на сдвиг . . . . .                                                | 809 |
| 18.18.4.1. | Длительная обработка пластичных смазок . . . . .                            | 809 |
| 18.18.4.2. | Стабильность пластичных смазок при перекачивании . . . . .                  | 809 |
| 18.18.5.   | Эксплуатационные свойства при высоких температурах . . . . .                | 809 |
| 18.18.6.   | Испытание смазки на утечки в подшипниках колес . . . . .                    | 810 |
| 18.18.6.1. | Склонность к утечкам пластичных смазок<br>в подшипниках колес . . . . .     | 810 |
| 18.18.6.2. | Утечки смазки в подшипниках колес в условиях ускорения . . . . .            | 810 |
| 18.18.7.   | Ресурс в подшипниках колес . . . . .                                        | 810 |
| 18.18.8.   | Водостойкость . . . . .                                                     | 811 |

|                                                                                                                                                                |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 18.18.8.1. Вымываемость струей воды . . . . .                                                                                                                  | 811        |
| 18.18.8.2. Смытьваемость распыленной водой . . . . .                                                                                                           | 811        |
| 18.18.9. Оценка окислительной стабильности пластичных смазок испытанием<br>в сосуде высокого давления, заполненном кислородом<br>(окисление в бомбе) . . . . . | 811        |
| 18.18.10. Антикоррозионные свойства . . . . .                                                                                                                  | 811        |
| 18.18.10.1. Испытание на ржавление . . . . .                                                                                                                   | 811        |
| 18.18.10.2. Испытание <i>EMCOR</i> . . . . .                                                                                                                   | 812        |
| 18.18.10.3. Испытание на коррозию медной пластины . . . . .                                                                                                    | 812        |
| 18.19. Список эквивалентных стандартизованных методов испытания смазочных<br>материалов . . . . .                                                              | 812        |
| <b>Глава 19. Механико-динамические методы испытания смазок. . . . .</b>                                                                                        | <b>820</b> |
| <i>Торстен Бартелс</i>                                                                                                                                         |            |
| 19.1. Классификация трибологических установок для испытаний<br>смазочных материалов . . . . .                                                                  | 820        |
| 19.2. Простейшие механико-динамические установки для испытаний смазочных<br>материалов . . . . .                                                               | 820        |
| 19.2.1. Четырехшариковая машина трения . . . . .                                                                                                               | 820        |
| 19.2.2. Устройство для определения фрикционного изнашивания Рейчерта,<br>машина Брюггера . . . . .                                                             | 822        |
| 19.2.3. Испытательные установки Фалекса . . . . .                                                                                                              | 825        |
| 19.2.3.1. Машина трения Фалекса . . . . .                                                                                                                      | 825        |
| 19.2.3.2. Машина Фалекса со штифтом и V-образными блоками . . . . .                                                                                            | 825        |
| 19.2.3.3. Универсальная испытательная машина Фалекса . . . . .                                                                                                 | 827        |
| 19.2.3.4. Испытательная машина Фалекса с вращательной нарезкой . . . . .                                                                                       | 828        |
| 19.2.4. Испытательная машина Тимкена . . . . .                                                                                                                 | 828        |
| 19.2.5. Высокочастотные возвратно-поступательные испытательные машины . . . . .                                                                                | 829        |
| 19.2.5.1. Высокочастотный возвратно-поступательный стенд<br>(вибромметр <i>HFRR</i> ) . . . . .                                                                | 829        |
| 19.2.5.2. Высокочастотная установка линейных колебаний ( <i>SRV</i> ) . . . . .                                                                                | 830        |
| 19.2.5.3. Мини-тяговая машина ( <i>MTM</i> ) . . . . .                                                                                                         | 832        |
| 19.2.6. Установка низкоскоростного трения ( <i>LVFA</i> ), трибометр . . . . .                                                                                 | 832        |
| 19.2.7. Дизельное инжекторное устройство . . . . .                                                                                                             | 832        |
| 19.3. Эксплуатационные испытания трансмиссионных масел . . . . .                                                                                               | 833        |
| 19.3.1. Испытательная установка трансмиссий <i>FZG</i> . . . . .                                                                                               | 835        |
| 19.3.1.1. Испытание на установке <i>FZG</i> противозадирных масел.<br>Определение противозадирных свойств . . . . .                                            | 835        |
| 19.3.1.2. Испытание на установке <i>FZG</i> масел с высоким содержанием<br>противозадирных присадок. Определение несущей<br>способности по задирам . . . . .   | 838        |
| 19.3.1.3. Испытания на установке <i>FZG</i> смазочных материалов<br>на несущую способность по питтингу . . . . .                                               | 839        |
| 19.3.1.4. Испытания на установке <i>FZG</i> смазочных материалов<br>на несущую способность по микропиттингу . . . . .                                          | 840        |
| 19.3.1.5. Испытания на установке <i>FZG</i> на износостойчивость<br>смазочных материалов . . . . .                                                             | 841        |
| 19.3.1.6. Испытания на установке <i>FZG</i> влияния масел<br>на эффективность работы трансмиссии . . . . .                                                     | 842        |
| 19.3.1.7. Испытания искусственно состаренных масел . . . . .                                                                                                   | 842        |

|           |                                                                                                                              |     |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 19.4.     | Испытания влияния смазочных материалов на эксплуатационные характеристики подшипников качения .....                          | 844 |
| 19.4.1.   | Испытательный прибор <i>FE8</i> для испытания смазочных материалов для подшипников качения <i>FAG</i> .....                  | 844 |
| 19.4.2.   | Испытательный прибор <i>FE9</i> для испытания смазочных материалов для подшипников качения <i>FAG</i> .....                  | 847 |
| 19.5.     | Испытания влияния смазочных материалов на эксплуатационные характеристики синхронизирующих элементов .....                   | 849 |
| 19.5.1.   | Сфера применения .....                                                                                                       | 849 |
| 19.5.2.   | Функция синхронизатора .....                                                                                                 | 849 |
| 19.5.3.   | Стандартизированные испытательные установки и методы .....                                                                   | 850 |
| 19.5.3.1. | Установка для испытания синхронизаторов $\mu$ - <i>Comb</i> .....                                                            | 851 |
| 19.5.3.2. | Установка для испытаний эксплуатационных характеристик синхронизаторов <i>FZG SSP 180</i> .....                              | 853 |
| 19.6.     | Испытания влияния смазочных материалов на эксплуатационные характеристики автоматических трансмиссий .....                   | 855 |
| 19.6.1.   | Сфера применения .....                                                                                                       | 855 |
| 19.6.2.   | Функции фрикционных дисков и жидкости .....                                                                                  | 856 |
| 19.6.3.   | Стандартизированные испытательные установки и методы .....                                                                   | 857 |
| 19.6.3.1. | Установка <i>SAE2</i> .....                                                                                                  | 857 |
| 19.6.3.2. | Установка <i>DKA</i> .....                                                                                                   | 858 |
| 19.6.3.3. | Испытательная установка <i>ZF GK 2</i> .....                                                                                 | 859 |
| 19.7.     | Испытания влияния смазочных материалов на эксплуатационные характеристики бесступенчатых трансмиссий ( <i>CVT</i> ) .....    | 861 |
| 19.7.1.   | Сфера применения .....                                                                                                       | 861 |
| 19.7.2.   | Функция цепи, клинового ремня и жидкости .....                                                                               | 861 |
| 19.7.3.   | Стандартизированные испытательные установки и методы .....                                                                   | 862 |
| 19.7.3.1. | Универсальная вариаторная испытательная установка <i>ZF</i> .....                                                            | 863 |
| 19.7.3.2. | Испытательная установка Ван Дорна .....                                                                                      | 864 |
| 19.8.     | Испытания эксплуатационных характеристик гидравлической жидкости .....                                                       | 865 |
| 19.8.1.   | Сфера применения .....                                                                                                       | 865 |
| 19.8.2.   | Функции пластинчатого насоса .....                                                                                           | 865 |
| 19.8.3.   | Стандартизированные пластинчатые насосные испытательные установки и методики испытаний .....                                 | 866 |
| 19.8.4.   | Функции аксиально-поршневых насосов .....                                                                                    | 867 |
| 19.8.5.   | Стандартизированные испытательные аксиально-поршневые установки и методы испытаний .....                                     | 868 |
| 19.8.6.   | Нестандартизированные, специализированные методики испытаний. Испытание эффективности работы .....                           | 869 |
| 19.8.7.   | Испытание на гибридном насосе .....                                                                                          | 870 |
| 19.9.     | Прочие стандартизированные и нестандартизированные методы испытаний и испытательные установки для смазочных материалов ..... | 871 |
| 19.10.    | Интерпретация и точность результатов испытаний смазочных материалов .....                                                    | 872 |
|           | Литература .....                                                                                                             | 874 |
|           | Предметный указатель .....                                                                                                   | 925 |

## Предисловие ко второму изданию

Через шесть лет после публикации книги «Смазки и смазочные материалы» большой интерес к ней побудил редакторов и издателей выпустить в свет второе издание. Так на свет появился этот исправленный и дополненный вариант.

Смазочные материалы применялись на всем протяжении истории человечества, однако научный анализ процессов трения, изнашивания и влияния на них смазочных материалов, в рамках такого научного направления, как трибология, представляет собой относительно новый подход. Уменьшение трения, наряду со снижением и даже отсутствием изнашивания, достигаемого путем применения смазок и смазочных технологий, приводит к сбережению энергии, природных ресурсов, а также к уменьшению выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду. Эти преимущества определяют экономическое и экологическое значение исследований в данной области.

Смазочные материалы стали рассматривать как функциональные элементы в машиностроении лишь с недавних пор, зато теперь внимание к этой группе веществ со стороны инженеров постоянно растет.

В данной книге освещены междисциплинарные вопросы химии и инженерных наук, а основной акцент сделан на основных областях применения смазочных материалов. Книга посвящена не только описанию различных продуктов, но и инженерным критериям, применяемым при их использовании.

Авторы книги — признанные эксперты международного уровня. Все они имеют многолетний опыт разработки и применения смазочных материалов.

Книга рассчитана на работников лабораторий, осуществляющих мониторинг и оценку смазочных материалов; специалистов, занимающихся эксплуатацией заводского оборудования, для которых смазочные материалы представляют собой элемент технологического процесса; исследователей и разработчиков, постоянно сталкивающихся с проблемами трения и износа; инженеров, для которых смазки являются функциональными элементами и средой, влияющей на срок службы оборудования; и, все чаще, должностных лиц, связанных с охраной окружающей среды, ответственных за безопасность рабочей зоны, рациональное использование ресурсов, а также уменьшение или ликвидацию выбросов в окружающую среду и загрязнение ее отходами.

*Мангейм, декабрь 2006 года*

## Благодарности

Мы благодарим *Vogel-Verlag* за разрешение использовать тексты и иллюстрации из книги «*Schmierstoffe in der Metallbearbeitung*» («Смазочные материалы в металлообработке»), автор — проф., д-р Манг, опубликованной в Вюрцбурге в 1983 г.

Проф., д-ра Дитера Шмекеля и Дика Хортига из Института производства и технологий обработки давлением; проф. Уилла Скотта из группы трибологических исследований, Университет технологии Квинсленда (Австралия); д-ра Ананд Карара и Тэда МакКлюра из *Fuchs Lubricants Co.*, Эмлентон (Пенсильвания, США); Пола Уилсона из *Fuchs Lubricants Co.*, Харвей (Иллинойс, США); Альберта Маскаро из *Fuchs Lubricants Co.*, Кастельбисбаль (Испания); Клиффа Ли и Пола Литтли из *Fuchs Lubricants Co.* (Великобритания), Стоук-он-Трент (Великобритания); Хайнца-Герарда Теис из *Fuchs*, Мангейм (Германия); Мерседес Коваллик из *Fuchs*, Мангейм (Германия); д-ра Хельмут Зиделя из *Fuchs Lubritech GmbH*, Вейлербах (Германия); Гизела Дресслера из *Fuchs Petrolub AG*, Маннгейм (Германия); Урсулу Зелтер из *Fuchs Petrolub AG* и Иохена Хелда из Боланден-Вирхоф (Германия).

## Благодарности от Издательства

Мы выражаем сердечную признательность научному редактору книги Виктору Марковичу Школьникову, известному ученому и автору научных трудов и множества справочников в области смазочных материалов. Благодаря его активному участию эта книга вышла в свет. Мы благодарны переводчику книги Липкину Григорию Иосифовичу, который до последних дней своей жизни работал над проектом и сделал многое для качественного перевода оригинального издания. Также благодарим Кутуеву Галину Ивановну, специалиста Департамента нефтегазохимии НК «Роснефть», за помощь в редактировании книги, ценные советы и рекомендации.

*Центр образовательных программ «Профессия»*



## Таблица используемых в тексте аббревиатур и сокращений

| Аббревиатура | Сокращаемое выражение | Сокращаемое выражение на русском языке                     |
|--------------|-----------------------|------------------------------------------------------------|
| ААС          |                       | Атомно-абсорбционная спектрометрия                         |
| АЕПСН        |                       | Ассоциация европейских производителей смазочных материалов |
| АИН          |                       | Американский институт нефти                                |
| БГТ          |                       | Бутил-гидрокситолуол                                       |
| БПК          |                       | Биохимическое потребление кислорода                        |
| ВВК          |                       | Вязкостно-весовая константа                                |
| ВГ           |                       | Вакуумный газойль                                          |
| ГХ           |                       | Газовая хроматография                                      |
| ДД           |                       | Детергенты и дисперсанты                                   |
| ДМСО         |                       | Диметилсульфоксид                                          |
| ДСК          |                       | Дифференциальная сканирующая калориметрия                  |
| 2,6–ДТБ      |                       | 2,6-ди-трет-бутил-фенол                                    |
| ДТФЦ         |                       | Диалкилдитиофосфат цинка                                   |
| ДЭА          |                       | Диэтаноламин                                               |
| ЕС           |                       | Европейский союз                                           |
| ИВ           |                       | Индекс вязкости                                            |
| ИК           |                       | Ингибиторы коррозии                                        |
| ИКПФ         |                       | Ингибиторы коррозии в паровой фазе                         |
| ИТМСО        |                       | Испытание турбинных масел на стойкость к окислению         |
| ККПС         |                       | Каталитический крекинг в псевдооживленном слое             |
| ЛОС          |                       | Летучие органические соединения                            |
| МАК          |                       | Максимальная концентрация                                  |
| МВ           |                       | Модификаторы вязкости                                      |
| МТ           |                       | Модификаторы трения                                        |
| МЭК          |                       | Метилэтилкетон                                             |
| НМП          |                       | N-метилпирролидон                                          |
| НПЗ          |                       | Нефтеперерабатывающий завод                                |
| ПАВ          |                       | Поверхностно-активные вещества                             |
| ПАГ          |                       | Полиалкиленгликоль                                         |
| ПАМА         |                       | Полиалкилметакрилат                                        |
| ПАО          |                       | Полиальфаолефины                                           |
| ПАУ          |                       | Полициклические ароматические углеводороды                 |
| ПБ           |                       | Полибутены                                                 |
| ПЗП          |                       | Противозадирные присадки                                   |
| ПИБ          |                       | Полиизобутены                                              |
| ПИБАЯК       |                       | Полиизобутиленангидрид янтарной кислоты                    |
| ПИБСИ        |                       | Полиизобутиленсукцинимид                                   |
| ПИП          |                       | Противоизносные присадки                                   |
| ПОМ          |                       | Полиоксиметилен                                            |
| ПП           |                       | Полипропилен                                               |
| ППГ          |                       | Полипропиленгликоль                                        |
| ПТФЭ         |                       | Политетрафторэтилен                                        |
| ПУ           |                       | Полиуретан                                                 |
| ПФА          |                       | Перфторалкоксил                                            |
| ПФПЭ         |                       | Перфторированные полиэфиры                                 |

| Аббревиатура | Сокращаемое выражение                                                                                                      | Сокращаемое выражение на русском языке                                                               |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ПЭ           |                                                                                                                            | Полиэтилен                                                                                           |
| РФС          |                                                                                                                            | Рентгенофлуоресцентная спектрометрия                                                                 |
| СОЖ          |                                                                                                                            | Смазочно-охлаждающие жидкости                                                                        |
| ТГА          |                                                                                                                            | Термогравиметрия                                                                                     |
| ТДА          |                                                                                                                            | Термическая деасфальтизация                                                                          |
| ТМП          |                                                                                                                            | Триметилпропан                                                                                       |
| ТМХ          |                                                                                                                            | 2,2,4-триметилдигидрохиолин                                                                          |
| ТКФ          |                                                                                                                            | Трирезилфосфат                                                                                       |
| ТЭГД         |                                                                                                                            | Термоэластогидродинамическая                                                                         |
| УСС          |                                                                                                                            | Универсальные секунды Сейболта                                                                       |
| ФНА          |                                                                                                                            | N-фенилнафтиламин                                                                                    |
| ФОП          |                                                                                                                            | Физическое осаждение паров                                                                           |
| ФЭП          |                                                                                                                            | Фторэтиленпропилен                                                                                   |
| ХОП          |                                                                                                                            | Химическое осаждение паров                                                                           |
| ХПК          |                                                                                                                            | Химическое потребление кислорода                                                                     |
| ЧШМТ         |                                                                                                                            | Четырехшариковая машина трения                                                                       |
| ШРУС         |                                                                                                                            | Шарниры равных угловых скоростей                                                                     |
| ЭГД          |                                                                                                                            | Эластогидродинамическая                                                                              |
| ЯМР          |                                                                                                                            | Ядерный магнитный резонанс                                                                           |
| AAS          | <i>Atomic absorption spectrometry</i>                                                                                      | Атомно-абсорбционная спектрометрия                                                                   |
| AB           | <i>Alkyl benzenes</i>                                                                                                      | Алкилбензолы                                                                                         |
| ACEA         | <i>Association of the European car manufactures</i>                                                                        | Европейская ассоциация конструкторов автомобилей                                                     |
| ACGIH        | <i>The American conference of government hygienists</i>                                                                    | Американская конференция правительственных гигиенистов                                               |
| AGMA         | <i>American gear manufacturers association</i>                                                                             | Американская ассоциация производителей зубчатых передач и приводов                                   |
| API          | <i>American petroleum institute</i>                                                                                        | Американский нефтяной институт                                                                       |
| ASTM         | <i>American society of testing materials</i>                                                                               | Американское общество по испытанию материалов                                                        |
| ATF          | <i>Automatic transmission fluids</i>                                                                                       | Жидкости для автоматических коробок передач                                                          |
| ATP          | <i>Adaption to technical progress</i>                                                                                      | Поправка к техническому прогрессу                                                                    |
| AW           | <i>Antiwear</i>                                                                                                            | Противоизносный                                                                                      |
| AWD          | <i>All-wheel drivers</i>                                                                                                   | Полный привод                                                                                        |
| AWT          | <i>Almen–Wieland test</i>                                                                                                  | Испытательный аппарат Алимена–Виланда                                                                |
| BDC          | <i>Bottom dead center</i>                                                                                                  | Нижняя мертвая точка                                                                                 |
| CAFE         | <i>Californian act for fuel emissions</i>                                                                                  | Калифорнийский закон о выбросах при сжигании топлив                                                  |
| CBN          | <i>Cubic boron nitride</i>                                                                                                 | Кубический нитрид бора                                                                               |
| CCMC         | <i>Committee of common market automobile constructors</i>                                                                  | Комитет автомобилестроителей общего рынка                                                            |
| CCS          | <i>Cold cranking simulator</i>                                                                                             | Имитаторы холодного проворачивания коленчатого вала                                                  |
| CEC          | <i>Coordinating European council for the development of performance tests for lubricants and engine fuels</i>              | Координационный европейский совет по разработке и проведению испытаний смазочных материалов и топлив |
| CEP–Mohawk   |                                                                                                                            | Процесс <i>Mohawk</i>                                                                                |
| CEPA         | <i>The Canadian environmental protection act</i>                                                                           | Канадский закон об охране окружающей среды                                                           |
| CETOP        | <i>Comite Europeen des transmissions oleohydrauliques et pneumatiques (European oil hydraulic and pneumatic committee)</i> | Европейский комитет по гидравлическим маслам и пневматическим устройствам                            |

| Аббревиатура   | Сокращаемое выражение                                                                                              | Сокращаемое выражение на русском языке                                                                     |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| CFMS           | <i>Closed-field magnetron sputtering</i>                                                                           | Магнетронное напыление                                                                                     |
| CII            | <i>Color index international</i>                                                                                   | Международный цветовой индекс                                                                              |
| CMR            | <i>Carcinogens, mutagens and reproductive toxicants</i>                                                            | Канцерогенные, мутагенные и репродуктивно-токсичные вещества                                               |
| CNG            | <i>Compressed natural gas</i>                                                                                      | Сжатый природный газ                                                                                       |
| CONCAWE        | <i>The Oil companies organization for the conservation of clean air and water in Europe</i>                        | Европейская организация нефтяных компаний по охране окружающей среды, здоровья и безопасности производства |
| CRC            | <i>Coordinating research council</i>                                                                               | Координационный совет по испытаниям                                                                        |
| CSTCC          | <i>Continuously slipping torque converter clutch</i>                                                               | Непрерывно действующая предохранительная фрикционная муфта                                                 |
| CVD            | <i>Chemical vapor deposition</i>                                                                                   | Химическое отложение паров                                                                                 |
| CVT            | <i>Constantly variable transmission</i>                                                                            | Бесступенчатая коробка передач                                                                             |
| DD             | <i>Detergents and dispersants</i>                                                                                  | Моющие-диспергирующие (детергенты и дисперсанты)                                                           |
| DFE            | <i>«Dangerous for the environment»</i>                                                                             | «Опасно для окружающей среды»                                                                              |
| DIN            | <i>Deutsche institut fur normung (German institute for normalization)</i>                                          | Немецкий институт стандартизации                                                                           |
| DKA            | <i>German committee for coordination in the CEC</i>                                                                | Германский комитет по координации деятельности в CEC                                                       |
| DLC            | <i>Diamond-like amorphous carbon</i>                                                                               | Аморфный углерод, подобный алмазу                                                                          |
| DLD            | <i>Duty diesel engines</i>                                                                                         | Работающие в легких условиях                                                                               |
| DNA            | <i>Deoxyribonucleic Acid</i>                                                                                       | Дезоксирибонуклеиновая кислота                                                                             |
| DPD            | <i>The dangerous preparations directive</i>                                                                        | Директива по опасным препаратам                                                                            |
| DPF            | <i>Diesel particulate filters</i>                                                                                  | Твердые частицы из выхлопных газов дизельных двигателей                                                    |
| DSD            | <i>The dangerous substance directive</i>                                                                           | Директива по опасным веществам                                                                             |
| ECA            | <i>The European chemicals agency</i>                                                                               | Европейское химическое агентство                                                                           |
| ECP            | <i>Environmental choice program</i>                                                                                | Программа «экологический выбор»                                                                            |
| ECCP           | <i>The European climate change program</i>                                                                         | Европейская программа, посвященная проблемам изменения климата                                             |
| EDTA           | <i>Ethylene diamine tetraacetic acid</i>                                                                           | Производная этилендиамина тетрауксусной кислоты                                                            |
| EINECS         | <i>The European inventory of existing chemical substances</i>                                                      | Европейский перечень существующих веществ                                                                  |
| EMA            | <i>Engine manufacturers association</i>                                                                            | Ассоциация двигателестроителей                                                                             |
| EDM            | <i>Electric discharge machining</i>                                                                                | Электроискровая обработка                                                                                  |
| EN             | <i>European norm</i>                                                                                               | Европейский стандарт                                                                                       |
| EP             | <i>Extreme pressure</i>                                                                                            | Противозадирные                                                                                            |
| EP/AW          | <i>Extreme pressure/antiwear</i>                                                                                   | Противозадирные и противоизносные                                                                          |
| EPDM           | <i>Ethylene-propylenediece-caoutchouk</i>                                                                          | Этилен-пропиленовый каучук                                                                                 |
| «EU Margerite» | <i>European eco-label</i>                                                                                          | Европейская экомаркировка                                                                                  |
| FDA            | <i>Food and drug administration</i>                                                                                | Управление по контролю за продуктами и лекарствами США                                                     |
| FVA            | <i>Forschungsvereinigung antriebstechnik (Research association for drive technology)</i>                           | Ассоциация исследователей в области двигателестроения                                                      |
| FZG            | <i>Forschungsstelle fur zahnradler und getriebebau (Research center for toothed wheel and gearing engineering)</i> | Центр исследований и разработок в области зубчатых колес и редукторостроения                               |

| Аббревиатура | Сокращаемое выражение                                                                               | Сокращаемое выражение на русском языке                                                                       |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| GEN          | <i>The global ecolabelling network</i>                                                              | Сеть глобальной экомаркировки                                                                                |
| GHS          | <i>Globally harmonized of classification and labeling girth gear drivers</i>                        | Глобальная гармонизация схемы классификации                                                                  |
| HC           | <i>Hydrogen cracking</i>                                                                            | Гидрокрекинг                                                                                                 |
| HD           | <i>Heavy duty</i>                                                                                   | Тяжелые условия                                                                                              |
| HEES         | <i>Hydraulic systems ecologically safe product synthetic esters</i>                                 | Синтетический сложный эфир                                                                                   |
| HEPG         | <i>Hydraulic systems ecologically safe product polyglycol types</i>                                 | Полигликоль                                                                                                  |
| HEPR         | <i>Hydraulic systems ecologically safe product polyalphaolefin and related hydrocarbon products</i> | Полиальфаолефин и родственные углеводородные продукты                                                        |
| HETG         | <i>Hydraulic systems ecologically safe product triglycerides</i>                                    | Триглицерид                                                                                                  |
| HFA          | <i>Hydraulic fluid A</i>                                                                            | Гидравлическая жидкость класса А                                                                             |
| HFAS         | <i>Hydraulic fluid AS</i>                                                                           | Гидравлическая жидкость класса AS — водный синтетический химический раствор, не содержащий минеральных масел |
| HFB          | <i>Hydraulic fluid B</i>                                                                            | Гидравлическая жидкость класса В — эмульсии «вода в масле»                                                   |
| HFC          | <i>Hydraulic fluid C</i>                                                                            | Гидравлическая жидкость класса С — водный раствор полимеров                                                  |
| HFD R        | <i>Hydraulic fluid R</i>                                                                            | Гидравлическая жидкость класса D — полиалкиленгликоли, растворимые в воде                                    |
| HF DL        | <i>Hydraulic fluid DL</i>                                                                           | Гидравлическая жидкость класса DL — безводная синтетическая жидкость другого состава                         |
| HFRR         | <i>High-frequency reciprocating rig</i>                                                             | Высокочастотный возвратно-поступательный стенд                                                               |
| HLB          | <i>Hydrophilic-lyophilic balance</i>                                                                | Гидрофильно-липофильный баланс                                                                               |
| HNBR         | <i>Hydro-treated acrylonitrile-butadiene caoutchouk</i>                                             | Гидрированный акрилонитрил-бутадиен-каучук                                                                   |
| HOSO         | <i>“High oleic sunflower oils”</i>                                                                  | «Подсолнечное масла с высоким содержанием олеинов»                                                           |
| HRC          | <i>Rockwell C hardness</i>                                                                          | Твердость по Роквеллу                                                                                        |
| HSC          | <i>High-speed cutting</i>                                                                           | Высокоскоростное резание                                                                                     |
| HSS          | <i>High speed steel</i>                                                                             | Высокоскоростная сталь                                                                                       |
| HTHS         | <i>High temperature high shear</i>                                                                  | Вязкость масла при высокой температуре и высоком срезающем усилии                                            |
| HVI          | <i>High viscosity index</i>                                                                         | Высокий индекс вязкости                                                                                      |
| IBAD         | <i>Ion-beam-assisted deposition</i>                                                                 | Ионно-лучевое напыление                                                                                      |
| ICOMIA       | <i>International council of marine industry association</i>                                         | Международный совет ассоциаций производителей морских судов                                                  |
| ICP          | <i>Inductively coupled plasma</i>                                                                   | Индуктивно-связанная плазма                                                                                  |
| IFP          | <i>Institut Francais du petrole (French institute of petroleum)</i>                                 | Французский институт нефти                                                                                   |
| ILSAC        | <i>International lubricant standardization and approval committee</i>                               | Международный комитет по стандартизации и аттестации смазочных масел                                         |
| IPBC         | <i>3-iodo-2-propinylbutylcarbamate</i>                                                              | 3-иодо-2-пропинилбутилкарбамат                                                                               |
| ISO          | <i>International standard organisation</i>                                                          | Международная организация по стандартизации                                                                  |

| Аббревиатура    | Сокращаемое выражение                                        | Сокращаемое выражение на русском языке                                                                                      |
|-----------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| IUCLID          | <i>International uniform chemical information database</i>   | Международная база данных по химической информации                                                                          |
| JAMA            | <i>Japanese automobile manufacturers association</i>         | Японская ассоциация автомобилестроителей                                                                                    |
| JASO            | <i>Japanese automotive standards organization</i>            | Японская организация по автомобильным стандартам                                                                            |
| JRC             | <i>Joint research centre</i>                                 | Объединенный исследовательский центр                                                                                        |
| КАА             |                                                              | Холодильные масла, нерастворимые в аммиаке                                                                                  |
| КАВ             |                                                              | Холодильные масла, растворимые в аммиаке                                                                                    |
| КС              |                                                              | Холодильные масла для частично- и полностью галогенизированных углеводородов                                                |
| КД              |                                                              | Холодильные масла для частично- и полностью фторированных углеводородов                                                     |
| КЕ              |                                                              | Холодильные масла для углеводородных хладагентов                                                                            |
| КрКс            |                                                              | Отношения осевого усилия на ведомом и ведущем шкиве и давления на подвижном шкиве                                           |
| КТИ             | <i>Kinetics technology international</i>                     | Международная кинетическая технология                                                                                       |
| LD50            | <i>Lethal dose</i>                                           | Летальная доза, вызывающая гибель 50% стандартной группы подопытных животных при определенном сроке последующего наблюдения |
| LIMS            | <i>Laboratory information and management system</i>          | Лабораторная информационная система                                                                                         |
| LNG             | <i>Liquefied natural gas</i>                                 | Сжатый природный газ                                                                                                        |
| LVFA            | <i>Low velocity friction apparatus</i>                       | Низкоскоростной аппарат трения                                                                                              |
| MFO             | <i>Multifunctional oil</i>                                   | Многофункциональное масло                                                                                                   |
| MIL             | <i>Military standard</i>                                     | Министерство обороны США                                                                                                    |
| МО              | <i>Mineral oil</i>                                           | Минеральное масло                                                                                                           |
| МQL             | <i>Minimum quantity lubrication</i>                          | Минимальное количество смазочного материала                                                                                 |
| MRV             | <i>Mini Rotary Viscosimeter</i>                              | Мини-ротационный вискозиметр                                                                                                |
| MTM             | <i>Mini traction machine</i>                                 | Установка мини-перемещения                                                                                                  |
| НИ              | <i>Oil mist index</i>                                        | Индекс туманообразования                                                                                                    |
| NLGI            | <i>National lubricating grease institute</i>                 | Национальный институт пластичных смазок США                                                                                 |
| NMMA            | <i>National marine manufactures association</i>              | Национальная ассоциация производителей двигателей для морских судов                                                         |
| NSF             | <i>National sanitation foundation</i>                        | Национальный фонд санитарной защиты                                                                                         |
| NWH             | <i>Not water hazardous</i>                                   | «Не опасно для воды»                                                                                                        |
| OECD            | <i>Organization for economic cooperation and development</i> | Организация экономического сотрудничества и развития                                                                        |
| OEM             | <i>Original equipmant manufacturer</i>                       | Изготовитель комплектного оборудования                                                                                      |
| OSHA            | <i>Occupational safety and health administration</i>         | Управление по охране здоровья на производствах в США                                                                        |
| OSOR            | <i>“One substance one registration”</i>                      | «Одно вещество — одна регистрация»                                                                                          |
| PP              | <i>Polypropylene</i>                                         | Полипропилен                                                                                                                |
| PAG             | <i>Polyalkylene glycol</i>                                   | Полиалкиленгликоль                                                                                                          |
| ПАН, (ПАК, PCA) | <i>Polycyclic aromatic hydrocarbons</i>                      | Полициклические ароматические углеводороды                                                                                  |

| Аббревиатура | Сокращаемое выражение                                          | Сокращаемое выражение на русском языке                                                  |
|--------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| PBTs         | <i>Persistent, bioaccumulative and toxic substance</i>         | Биоаккумулятивное и токсичное вещество                                                  |
| PCD          | <i>Polycrystalline diamonds</i>                                | Поликристаллический алмаз                                                               |
| PDMS         | <i>Polydimethyl siloxane</i>                                   | Полидиметилсилоксан                                                                     |
| PEL          | <i>Permissible exposure limit</i>                              | Допустимый уровень воздействия                                                          |
| PNOC         | <i>Particulates not otherwise classified</i>                   | Частицы, не отнесенные к другим категориям                                              |
| POPs         | <i>Persistent organic pollutants</i>                           | Стойкие органические загрязнители                                                       |
| PORD         | <i>Process-oriented research and development</i>               | Применяемые только в исследованиях или разработках, ориентированных на технологию       |
| PVD          | <i>Physical vapor deposition</i>                               | Физическое отложение паров                                                              |
| REACH        | <i>Registration, evaluation and authorization of chemicals</i> | Регистрация, оценка и выдача разрешений на производство и применение химических веществ |
| RCHO         | <i>Aldehydes</i>                                               | Альдегиды                                                                               |
| RCOOH        | <i>Carboxylic acids</i>                                        | Карбоновые кислоты                                                                      |
| RCOOR'       | <i>Esters</i>                                                  | Сложные эфиры                                                                           |
| RKM          |                                                                | Атомный микроскоп                                                                       |
| RNT          | <i>Radionuclide technique</i>                                  | Радиоизотопный метод                                                                    |
| ROBOT        | <i>Rotatory bomb test</i>                                      | Испытание во вращающейся бомбе                                                          |
| RVT          | <i>Reichert-Verschleib test</i>                                | Испытательный аппарат Райхерта                                                          |
| SAE          | <i>Society of automotive engineers</i>                         | Общество инженеров-автомобилестроителей                                                 |
| SCR          | <i>Selective catalytic reduction</i>                           | Селективное каталитическое восстановление                                               |
| SDS          | <i>Safety data sheets</i>                                      | Паспорт безопасности                                                                    |
| SHPD         | <i>Super high performance diesel</i>                           | Масла для очень тяжелых (жестких) условий работы                                        |
| SI           | <i>International system of units</i>                           | Официальная единица измерения                                                           |
| SKC          | <i>Static coefficient of friction</i>                          | Статический коэффициент трения                                                          |
| SME          | <i>Small and medium enterprise</i>                             | Средние и малые предприятия                                                             |
| SRE          | <i>Standard reference elastomer</i>                            | Стандартный эталонный эластомер                                                         |
| SRV          | <i>Translatory oscillation apparatus</i>                       | Высокочастотная установка линейных колебаний                                            |
| STLE         | <i>Society of tribologist and lubrication engineers</i>        | Общество трибологов и инженеров по смазкам                                              |
| STOU         | <i>Super tractor oil universal</i>                             | Универсальное супертракторное масло                                                     |
| TAN          | <i>Total acid number</i>                                       | (Общее) кислотное число                                                                 |
| TBN          | <i>Total base number</i>                                       | (Общее) щелочное число                                                                  |
| TDC          | <i>Top dead center</i>                                         | Верхняя мертвая точка                                                                   |
| TEWL         | <i>Transepidermal water loss</i>                               | Трансэпидермальная потеря воды                                                          |
| TLV          | <i>Threshold limit value</i>                                   | Пороговое предельное значение                                                           |
| TOST         | <i>Turbine oil oxidation stability test</i>                    | Испытание турбинного масла на стойкость к окислению                                     |
| TRK          | <i>Technical guideline concentration</i>                       | Инструкция по технологической концентрации                                              |
| TWA          | <i>Time-weighted average</i>                                   | Средневзвешенная во времени величина                                                    |
| UBA          | <i>German environmental protection agency</i>                  | Германское агентство по охране окружающей среды                                         |
| UL           | <i>Underwriters laboratories Inc.</i>                          | Лаборатории андеррайтеров Инк.                                                          |
| UTTO         | <i>Universal tractor transmission oil</i>                      | Универсальное тракторное трансмиссионное масло                                          |

| Аббревиатура | Сокращаемое выражение                                                                     | Сокращаемое выражение на русском языке                                                                        |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| VAMIL        | <i>Regulation of discretion deductions for investments into the environment</i>           | Министерство финансов и департамент инвестиций в охрану окружающей среды                                      |
| VAWS         | <i>German regulation for using water-endangering lubricants</i>                           | Нормативно-правовые документы по использованию смазочных материалов, представляющих опасность для водных сред |
| VCI          | <i>Vapor phase corrosion inhibitor</i>                                                    | Замедлитель коррозии в паровой фазе                                                                           |
| VDI          | <i>Verein Deutscher ingenieure (Association of German engineers)</i>                      | Ассоциация немецких инженеров                                                                                 |
| VDMA         | <i>Verein Deutscher maschinen- und anlagenbaubetriebe (German engineering federation)</i> | Ассоциация германских производителей машин и заводского оборудования                                          |
| VDT          | <i>Van Doorne test bench</i>                                                              | Испытательная установка Ван Дорна                                                                             |
| VGB          | <i>Technical association of large Power plant operators</i>                               | Ассоциация германских электростанций                                                                          |
| VI           | <i>Viscosity index</i>                                                                    | Индекс вязкости                                                                                               |
| VIE          | <i>Viscosity index extended</i>                                                           | Расширенный индекс вязкости                                                                                   |
| VII          | <i>Viscosity index improver</i>                                                           | Присадка, улучшающая индекс вязкости                                                                          |
| VKA          | <i>Four-ball apparatus</i>                                                                | Четырехшариковый аппарат                                                                                      |
| VOC          | <i>Volatile organic compounds</i>                                                         | Летучие органические соединения                                                                               |
| V-P          | <i>Viscosity-pressure</i>                                                                 | Значение зависимости вязкости от давления                                                                     |
| vPvBs        | <i>Very bioaccumulative substance</i>                                                     | Очень стойкое биоаккумулятивное вещество                                                                      |
| VROM         | <i>Department of environment investments</i>                                              | Министерство финансов и департамент инвестиций в охрану окружающей среды                                      |
| V-T          | <i>Viscosity-temperature</i>                                                              | Вязкостно-температурные                                                                                       |
| WHC 1-4      |                                                                                           | Классы опасности загрязнения воды                                                                             |
| WHC 1        |                                                                                           | Слегка загрязняющие воду                                                                                      |
| WHC 2        |                                                                                           | Загрязняющие воду                                                                                             |
| WHC 3        |                                                                                           | Очень сильно загрязняющие воду                                                                                |
| WHC 5        |                                                                                           | Опасные для воды категории                                                                                    |
| XHPD         | <i>Extreme heavy duty</i>                                                                 | Для крайне тяжелых условий работы                                                                             |
| XRF          | <i>X-ray Fluorescence spectrometry</i>                                                    | Рентгенофлуоресцентная спектрометрия                                                                          |
| ZAF          | <i>Zinc and ashes free</i>                                                                | Не содержащие цинк и золу                                                                                     |

## Глава 5

### Синтетические базовые масла

*Уилфрид Дрезель*

Согласно данным, приведенным в работе Цисмана [5.1], производство синтетических масел в промышленных масштабах началось в 1931 г., когда Солливэн [5.2] и его сотрудники опубликовали результаты своих попыток разработки специальных насыщенных смазочных масел с низкими температурами застывания путем каталитической полимеризации олефинов. Гандерсон и Харт [5.3] в 1962 г. опубликовали ставшую бестселлером в своей области книгу по синтетическим смазочным маслам, в которой описаны девять классов таких масел, а также вклад Цисмана в историю их развития. В 1993 г. под редакцией Шубкина [5.4] в свет была выпущена еще одна новая книга по этой тематике, в которой были опущены некоторые устаревшие и вместо них добавлены новые классы синтетических смазочных материалов (табл. 5.1)

**Таблица 5.1.** Классы синтетических смазочных материалов

| Классификация по Гандерсону и Харту (1962) [5.3]                                          | Классификация по Шубкину и др. (1993) [5.4]                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Хлорфторуглеродные полимеры                                                               | Алкилированные ароматические соединения<br>Хлортрифторэтилен<br>Циклоалифатические соединения<br>Диалкилкарбонаты |
| Сложные эфиры двухосновных кислот<br>Сложные фторэфиры<br>Сложные эфиры неопентилполиолов | Сложные эфиры                                                                                                     |
| Сложные эфиры фосфорной кислоты                                                           | Перфторалкильные полиэфиры<br>Сложные эфиры фосфорной кислоты<br>Фосфацены<br>ПАО<br>Полибутены                   |
| Полигликоли<br>Полифенилэфиры                                                             | Полиалкиленгликоли                                                                                                |
| Сложные эфиры кремниевой кислоты<br>Силоксаны                                             | Силауглеводороды<br>Силоксаны                                                                                     |

Несмотря на то, что доступные в настоящее время синтетические базовые масла были разработаны много десятилетий назад, их потребление в промышленных масштабах развивалось медленно из-за значительно более высокой стоимости [5.5, 5.6, 5.111] (табл. 5.2)



Таблица 5.2. Сравнительная стоимость синтетических базовых масел

| Тип масел                               | Сравнительная стоимость |
|-----------------------------------------|-------------------------|
| Минеральные масла                       | 1                       |
| Алкилированные ароматические соединения | 2–3                     |
| Полибутены                              | 3–5                     |
| Сложные эфиры двухосновных кислот       | 4–15                    |
| ПАО                                     | 4–15                    |
| Полиалкиленгликоль                      | 6–15                    |
| Сложные эфиры неопентилполиолов         | 10–20                   |
| Силиконы                                | 25–200                  |
| Перфторалкильные полиэфиры              | 350–800                 |

Несмотря на очевидные преимущества синтетических смазочных масел, спрос на них практически не увеличивался. Однако ужесточение условий эксплуатации машин и оборудования (предельных температур и давлений в наземных областях применения [5.8–5.10] и, главным образом, крайне низких температур и давлений в космосе [5.11; 5.12]) привело к колоссальному росту спроса на ПАО — самые популярные синтетические смазочные масла за последние два десятилетия [5.13–5.15].

В отличие от минеральных базовых масел, содержащих различные углеводороды и их азот-, кислород- и серосодержащие химические производные, нуждающиеся в очистке и перегонке (глава 4), синтетические базовые масла обычно получают путем реакции нескольких химических соединений, во многих случаях также нефтяного происхождения. Для создания масел, применяемых в конкретных областях, подбираются соответствующие условия реакции. Такой сравнительно простой химизм имеет не только несомненные преимущества, но и недостатки, связанные с восприимчивостью масел к присадкам и их совместимостью с эластомерами [5.16; 5.17].

Синтетические масла классифицируют как по типу процесса их производства, так и по составу [5.6; 5.18]. С химической точки зрения более предпочтителен последний метод.

## 5.1. Синтетические углеводороды

Синтетические углеводороды разрабатывали одновременно в Германии и США. В Германии движущей силой исследований, проводимых под руководством Цорна [5.19], было обеспечение возможности применения смазок при низких температурах, а также необходимость преодоления общего дефицита нефтяных базовых масел. На сегодняшний день известно, что все синтетические углеводороды и другие экономически значимые синтетические смазочные масла могут быть синтезированы из этилена (рис. 5.1) который как таковой является одним из важнейших нефтехимических продуктов [5.20], получаемых в настоящее время главным образом на установках паровой конверсии.

### 5.1.1. ПАО

Термин ПАО является производным от сырья для производства базового масла этого класса, например  $\alpha$ -децена или смеси  $\alpha$ -олефинов, как правило содержащих ми-

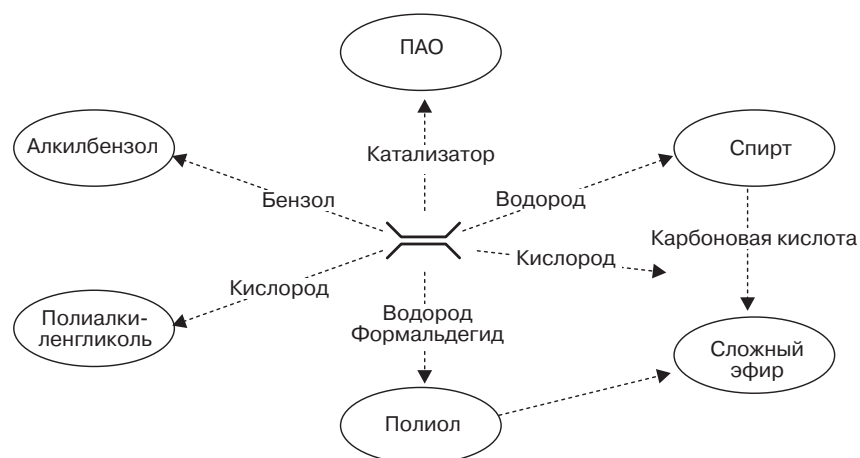


Рис. 5.1. Этилен (сырье для создания многих синтетических базовых масел)

нимум шесть и максимум двенадцать атомов углерода. Олигомеры насыщены, т. е. гидрогенизированы, и поэтому относятся к алифатическим или разветвленным парафиновым углеводородам. Линейные углеводороды впервые были использованы для получения смазочных масел Монтгомери, Джилбертом и Клине [5.21]. ПАО подробно описаны Шубкиным.

Свободно-радикальная или термическая олигомеризация  $\alpha$ -олефинов возможна, но уже утратила значение из-за высокого значения энергии активации и низкого качества получаемых продуктов, даже при использовании пероксидов в качестве катализаторов. Олигомеризация на катализаторах Циглера–Нагга типа триэтилалюминий-тетрахлорид титана дает широкий диапазон олигомеров, состав которых можно более точно регулировать при использовании в качестве катализатора алкилалюминийгалогенида-алкоксидцирконийгалогенида. В то же время олигомеризация с использованием реакции Фриделя–Крафтса на базе трифторида бора и спиртов в качестве сокатализаторов, оказалась превосходной, хотя сам механизм еще не изучен до конца. Возможный механизм подробно описан в работе Мортье и Оржулика [5.22]. Метод с применением трифторида бора стал доминирующим для получения маловязких сортов (с вязкостью в диапазоне 2–10 мм<sup>2</sup>/с). Для получения высоковязких масел (40–100 мм<sup>2</sup>/с) должны применяться другие катализаторы, а для производства синтетических масел с вязкостью 10–25 мм<sup>2</sup>/с, которые должны заменить неудачные смеси и на данный момент недоступны в сопоставимых количествах, могут применяться олефины C<sub>12</sub> и C<sub>14</sub>, в основном димеры [5.23]. Следующая стадия производства заключается в гидрогенизации ненасыщенных олефинов. Это достигается введением классических катализаторов, например никеля на кизельгуре или палладия на носителе, в качестве которого выступает оксид алюминия — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. На третьей, и последней, стадии насыщенные олигомеры подвергают перегонке (рис. 5.2). Олигомеризация  $\alpha$ -децена или  $\alpha$ -олефиновой смеси дает сложные смеси с большим относительно ожидавшегося разветвлением.

Поскольку в ходе производства перегруппировки происходят внутри молекул, молекулярные массы продуктов могут поддерживаться в узких пределах. Типичный насыщенный  $\alpha$ -децен, например, похож на трехконечную звезду [5.24] (рис. 5.3).

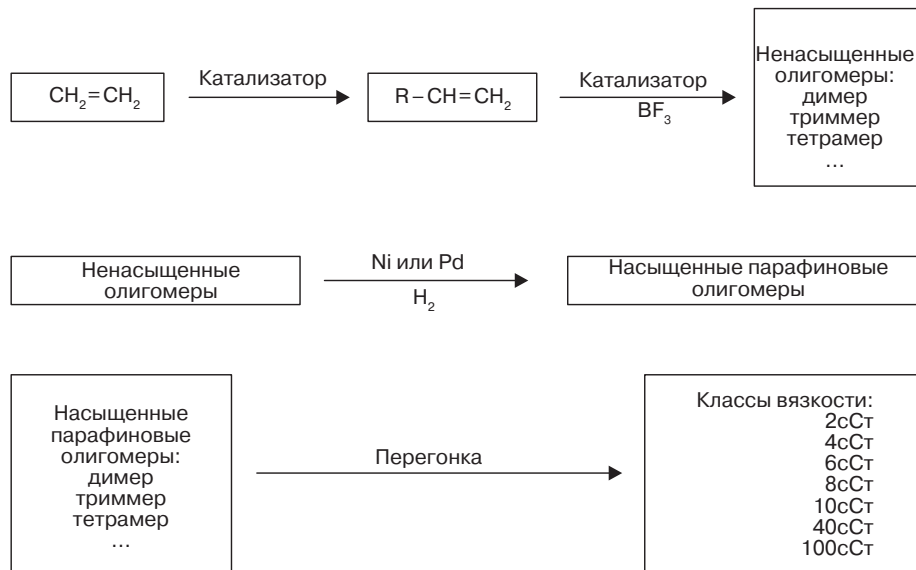


Рис. 5.2. Три стадии производства ПАО

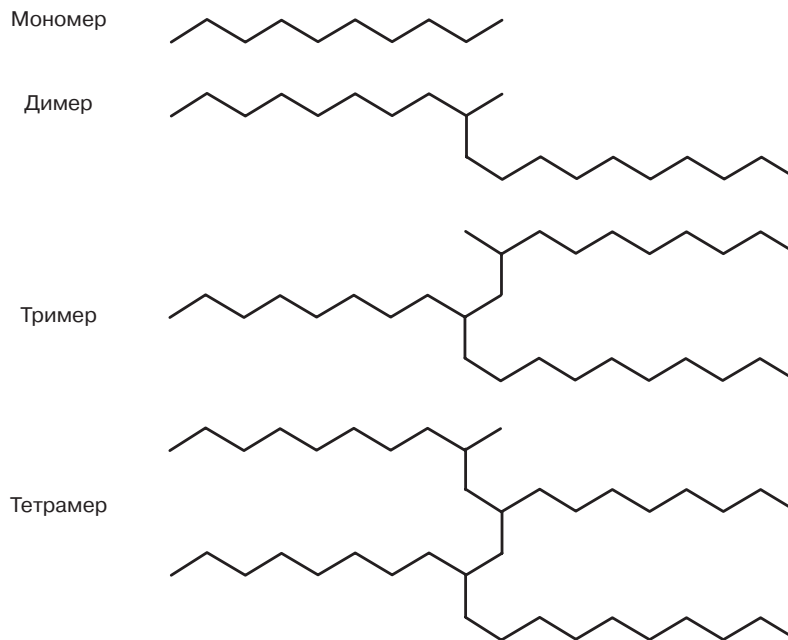


Рис. 5.3. Формы типичных ПАО олигомеров

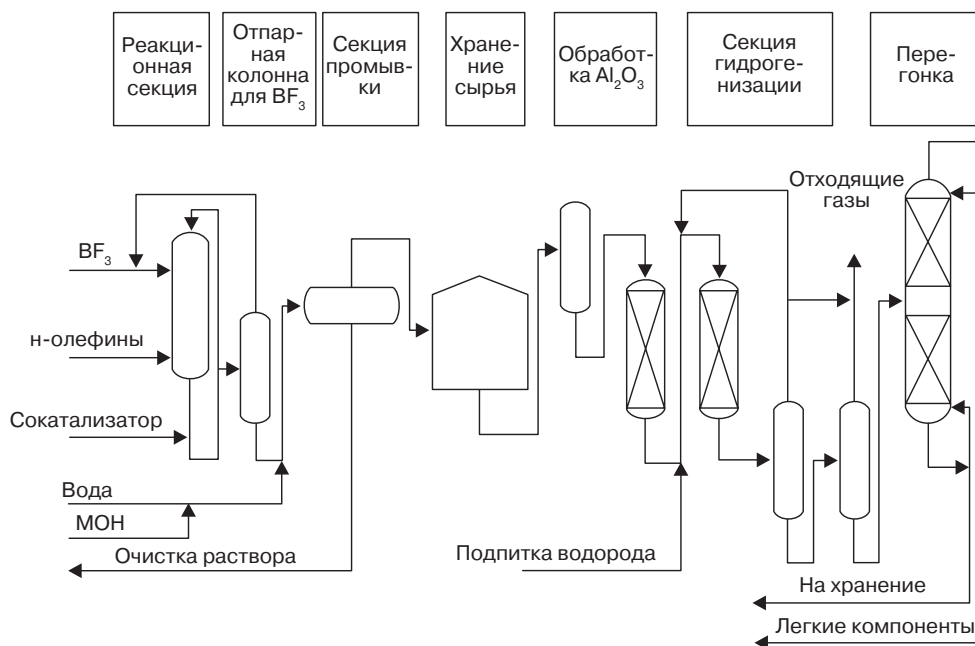
ПАО удовлетворяют некоторым требованиям, предъявляемым к идеальным углеводородным смазочным материалам, что объясняется их химической структурой — идеальные углеводородные смазочные материалы должны иметь прямолинейные цепи, быть полностью насыщенными и кристаллизоваться при низких температурах. Значение вязкости прямолинейных алканов действительно повышается по мере увеличения длины цепи. Это также относится к температурам застывания и ИВ. При постоянной молекулярной массе разветвление цепи приводит к повышению вязкости и снижению температуры застывания, а длина и положение боковых цепей влияют на все три свойства. Если разветвление происходит в середине основной цепи, то значение температур застывания уменьшается. Длинные боковые цепи улучшают  $V-T$  характеристики.

ПАО имеют несколько преимуществ: незначительную разницу между пределами температур кипения, крайне низкие температуры застывания, ИВ  $>135$  для всех классов с кинематической вязкостью  $> 4$  мм<sup>2</sup>/с при 100 °С. Их испаряемость ниже, чем у любых других минеральных масел, относящихся к тем же классам вязкости. Они содержат незначительные количества ненасыщенных и полициклических ароматических соединений и лишь следы азота, серы и других примесей. Тем не менее по результатам отдельных испытаний некоторые минеральные масла без присадок превосходят ПАО по значению показателей стойкости к окислению. Это объясняется тем, что в процессе нефтепереработки в минеральных маслах сохраняются природные антиоксиданты. Окисление минеральных масел подробно описано Расбергом [5.25]. Восприимчивость синтетических продуктов к антиоксидантам и их противозадирный/противоизносный синергизм выше, чем у минеральных масел [5.26–5.28]. С другой стороны, их низкая полярность снижает растворяющую способность по отношению к очень полярным присадкам, что может вызвать проблемы при использовании с загустителями. Поэтому их стремятся применять в комбинации с небольшими количествами сложных эфиров (дикарбоновой кислоты) или селективно очищенных минеральных масел.

ПАО традиционно применялись в авиационной технике и в областях применения, требующих одноразовой смазки на весь срок службы, но в настоящее время они широко применяются во многих других областях, приобретая в них все большую значимость, в связи с растущим спросом на высококачественные смазочные материалы для автотранспортных средств [5.29].

### 5.1.2. Продукты олигомеризации олефинов с внутренними двойными связями

Продукты олигомеризации олефинов с внутренними двойными связями довольно схожи с ПАО, к тому же оба вида углеводородов получают олигомеризацией линейных олефинов. Различие заключается в том, что продукты олигомеризации олефинов с внутренними двойными связями получают из крекированных парафиновых базовых дистиллятов. Установки для получения продуктов олигомеризации олефинов с внутренними двойными связями и ПАО также аналогичны (рис. 5.4). Внутренние олефины труднее поддаются олигомеризации, и получаемые продукты имеют ИВ от 10 до 20, т. е. ниже ИВ, которыми обладают ПАО того же класса вязкости [5.30].



**Рис. 5.4.** Технологическая схема установки для производства продуктов олигомеризации олефинов с внутренними двойными связями

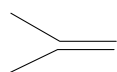
Смеси ПАО с полиэтиленами с кинематическими вязкостями от 100 до 2000 мм<sup>2</sup>/с выпускаются в промышленных масштабах. Можно ожидать, что продукты олигомеризации олефинов с внутренними двойными связями, имеющие такие вязкости, будут доступны в будущем.

Если катионная полимеризация этилена на хлористом алюминии дает масла с ИВ вплоть до 120 и молекулярной массой от 400 до 2000, то полимеризация пропилена — масла с более низкими ИВ и худшей температурной стабильностью. Оба вида этих смазочных масел утратили свое значение, но, по мнению экспертов, сополимеры обоих базовых материалов имеют потенциал для завоевания прежних позиций на рынке.

### 5.1.3. Полибутены (ПБ)

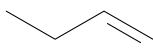
Полиизобутиленовые каучуки производили еще в 30-х гг. прошлого века, за двадцать лет до появления их жидких аналогов. ПБ как синтетические базовые масла подробно описаны в работе Фотерингхэма [5.31]. В качестве мономера для их производства обычно используется изобутен, поэтому их часто называют полиизобутенами (ПИБ).

ПИБ получают полимеризацией потока углеводородов, в котором, кроме изобутена (форм. 5.1), содержатся еще два изомера бутена (форм. 5.2, 5.3) и бутана. Основными источниками сырья являются установки паровой конверсии нефти и каталитического крекинга на НПЗ. В процессе с кислотным катализатором по Льюису получают сополимер, главная цепь которого в основном состоит из изобутиновых структурных элементов. Чем ниже молекулярная масса образующегося



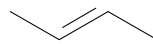
Изобутен

Форм. 5.1



Бутен-1

Форм. 5.2



Бутен-2

Форм. 5.3

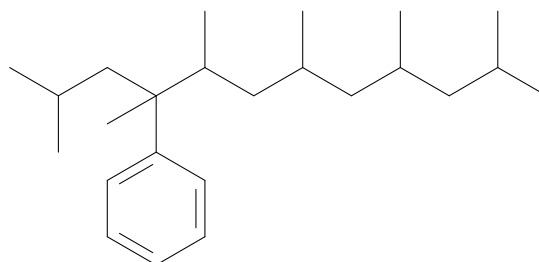
сополимера, тем выше содержание других бутенов, т. е. тем сложнее структура. После завершения процесса полимеризации в конце углеродной цепи остается одна двойная связь. Поэтому ПБ менее стойки к окислению, чем ПАО, продукты олигомеризации олефинов с внутренними двойными связями и алкилированные ароматические соединения — при температуре выше 200 °С они начинают деполимеризоваться с образованием газообразных продуктов. Обычно концевая группа бывает цис- и транс-трехзамещенной. Ее можно заместить дизамещенной винилиденовой группой, обладающей более высокой реакционной способностью. В этом случае при реакции с малеиновым ангидридом получают производные полибутенилтантарного ангидрида, которые применяются в качестве ингибиторов коррозии (ИК) и детергентов.

ПБ с молекулярной массой от приблизительно 300 до 6000 применяются как присадки, улучшающие ИВ. Они используются в качестве компонентов масел для двухтактных двигателей, трансмиссионных и гидравлических масел, СОЖ для металлообработки, пластичных смазок, компрессорных масел и защитных средств для проволочных тросов. Одной из областей применения ПБ в будущем является их использование в качестве синергетических компонентов в бинарных или тройных системах базовых масел [5.33].

#### 5.1.4. Алкилированные ароматические соединения

Алкилированные ароматические соединения применялись в Германии с 1930 г. [5.34], их подробное описание содержится в работе Дресье [5.35]. Дешевые диалкилбензолы получают в качестве побочных продуктов при производстве линейных и разветвленных моноалкилбензолов, которые являются сырьем для производства детергентов. Ввиду высокой реакционной способности первичных продуктов реакции при алкилировании бензола олефинами по Фриделю—Крафтсу можно получить полиалкилаты. При избыточной концентрации бензола правильный подбор олефина, например пропилена и катализатора, позволяет контролировать ход реакции и использовать ее для синтеза алкилбензолов. Типичные алкилбензолы состоят из шести пропиленовых структурных элементов (форм. 5.4), а их свойства многообразны и трудно поддаются обобщению.

Некоторые свойства алкилбензолов можно объяснить химической структурой — образование колец приводит к большему увеличению вязкости и снижению ИВ, чем алкилзамещение, в то время как присоединение боковых цепей к нафтеновому кольцу оказывает противоположный эффект. Смещение циклогексил-заместителя с конца к середине алкильной цепи оказывает лишь незначительное влияние на вязкость, но заметное негативное влияние на  $V-T$ , а также снижает температуру застывания. Аналогичный эффект наблюдается у веществ, в молекулах которых имеются циклопентановые кольца. Алкилированные ароматические соединения



Форм. 5.4

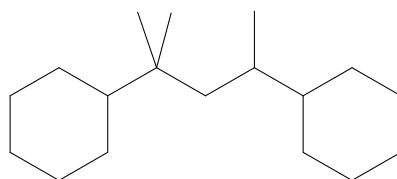
обладают схожими эффектами с эквимолекулярными алкилнафтенами, однако их продукты имеют более низкое значение вязкости и менее благоприятную  $V-T$  зависимость. Более дешевые диалкилбензолы широко применяются в промышленности, например в трансмиссионных маслах, где важна высокая стойкость к газобразованию. Специально разработанные сорта, особенно линейных продуктов, хотя и с худшими по сравнению с ПАО свойствами, все же являются их достойной альтернативой благодаря превосходной растворяющей способности, возможности применения при низких температурах и совместимости с эластомерами [5.36]. Самое широкое применение эти продукты получили в качестве рефрижераторных масел.

### 5.1.5. Прочие углеводороды

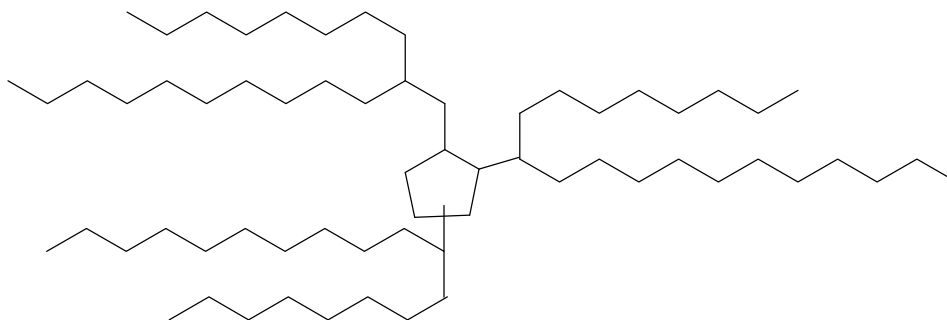
Циклические насыщенные или алициклические углеводороды природного происхождения являются компонентами минеральных масел, известных под названием «нафтены». В отличие от парафинов они имеют свои аналоги в ПАО и ароматических соединениях, содержащих их в алкилбензолах, однако нафтены не имеют сопоставимых синтетических аналогов, вырабатываемых в промышленных масштабах. Однако в последнее время возобновились предпринимавшиеся ранее попытки по синтезу нафталинов, и, как ожидается, полиалкилированные олигомеры будут пригодны для применения в качестве смазочных материалов, используемых при высоких температурах [5.37].

Значения коэффициентов трения некоторых синтетических циклоалифатических углеводородов достигают 1,2, что объясняется затруднением внутримолекулярного вращения при включении громоздких циклопентильных или циклогексильных групп в разветвленные короткоцепочечные молекулы. Высокомолекулярное упакованное состояние и жесткость некоторых полициклических углеводородных молекул также делает их пригодными для применения в качестве компонентов рабочих жидкостей для фрикционных передач [5.38], для которых важны подобные молекулярные свойства смазочных материалов [5.39, 5.40]. Базовым веществом для одних из лучших рабочих жидкостей, описанных в литературе, является 2,4-дициклогексил-2-метилпентан (форм. 5.5), гидрогенизированный димер  $\alpha$ -метилстирола.

Другие циклические углеводороды, потенциально пригодные к применению в качестве смазочных материалов, подробно описаны в работе Венье и Кассерли [5.41]. Среди этих соединений трис(2-октилдодецил)циклопентан (форм. 5.6) благодаря



Форм. 5.5



Форм. 5.6

своей экстремально низкой испаряемости находит ограниченное применение в высоковакуумных областях, например в пластичных смазках [5.42].

Также были синтезированы и сравнены с ПАО, обладающими аналогичной вязкостью, три(н-алкил)метилметаны и тетраалкилметаны. Такие вещества оказались более востребованными в областях применения, в которых необходимо наличие экстремальной термической стабильности и стойкости к окислению [5.43]. В качестве смазочных материалов, которые могут применяться при высоких температурах, также предлагается использовать алкилированные бифенилы и дифенилметаны, однако они в настоящее время недоступны. Недавно были синтезированы смазочные материалы на основе адамантана, которые, вероятно, могут применяться в качестве электроизоляционных жидкостей [5.44].

## 5.2. Галогенизированные углеводороды

Хлорированные углеводороды обладают высокой стабильностью и негорючи. Ранее они применялись в качестве изоляционных масел, жидкостей-теплоносителей и гидравлических жидкостей, но в настоящее время из природоохранных соображений перестали использоваться для этих целей.

Товарные жидкие хлорфторуглероды — все олигомеры хлортрифторэтилена — содержат от двух до двенадцати атомов углерода. Первые продукты этого класса были разработаны в 40-х гг. прошлого века и подробно описаны в работах Аштона и Стрэка [5.45] и Рюшема [5.46]. Они пригодны для применения в качестве смазочных материалов благодаря своей экстраординарной стабильности, включая стойкость к окислению кислородом.



Низкая коррозионная способность, возможность использования при низких температурах, малая вязкость и хорошие смазочные свойства составляют основные преимущества смазочных материалов на основе этих соединений. К их недостаткам следует отнести высокую испаряемость и неидеальную  $V-T$  зависимость. Свойства хлорфторуглеродов обусловлены наличием большого количества атомов хлора и фтора, что препятствует гибкости молекулы, низкими значениями внутримолекулярных сил сцепления и разной длиной связей в молекулах. При этом они обладают сравнительно высокой плотностью (1,7–2 г/мл при 40 °С). Хлорфторуглероды применяются в качестве смазочных материалов в кислородных компрессорах, в насосах для минеральных кислот, галоидов и кислорода и в мельницах или смесителях для сильных окисляющих агентов. Они также пригодны для смазки турбинных насосов в ракетных двигателях и в качестве базовых масел для создания огнестойких гидравлических жидкостей [5.47]. Несмотря на то, что галогенизированные углеводороды по своим характеристикам сопоставимы с перфторированными полиэфирами (ПФПЭ) (см. раздел 5.5) и при этом дешевле этих соединений, вероятность их использования в будущем пока невысока.

### 5.3. Синтетические сложные эфиры

#### 5.3.1. Сложные эфиры карбоновых кислот

Во время Второй мировой войны в Германии были разработаны смазочные материалы на основе синтетических сложных эфиров, применявшиеся в реактивной авиации [5.84].

Углеводородные масла не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к маслам для авиационных двигателей, в то время как сложные эфиры алифатических карбоновых кислот обладают необходимыми свойствами. Наличие карбоксильных групп, вследствие большой величины дипольного момента, снижает испаряемость и повышает температуру вспышки смазочных масел и одновременно положительно влияет на температурную стабильность (связи в СОО-группе термически более стабильны, чем С–С связь), растворяющую способность, смазочную способность и биологическую разлагаемость. С другой стороны, оно негативно влияет на гидролитическую стабильность смазки и реакционную способность с металлами или сплавами, содержащими медь или свинец [5.49]. Общие свойства сложных синтетических эфиров карбоновых кислот подробно описаны в энциклопедии индустриальной химии под авторством Ульмарумса [5.50; 5.51] и в работах Ранделеса [5.52].

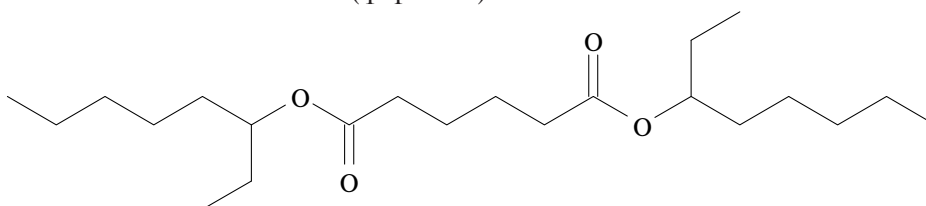
В принципе, все сложные эфиры карбоновых кислот могут быть получены по одной схеме:

1. Карбоновая кислота реагирует с избытком спирта в присутствии катализатора (в качестве катализатора могут использоваться минеральные кислоты, адсорбированные на твердых ионообменниках, кислоты по Льюису, например трифторид бора, в идеальном случае в виде этерата, и амфотерные гидроксиды типа гидроксида алюминия).
2. Для сдвига равновесия в сторону образования продуктов реакции во время процесса удаляют воду.
3. Непрореагировавшую кислоту нейтрализуют карбонатом натрия или гидроксидом кальция и удаляют фильтрацией, а эфир подвергают перегонке.

### 5.3.1.1. Сложные эфиры дикарбоновых кислот

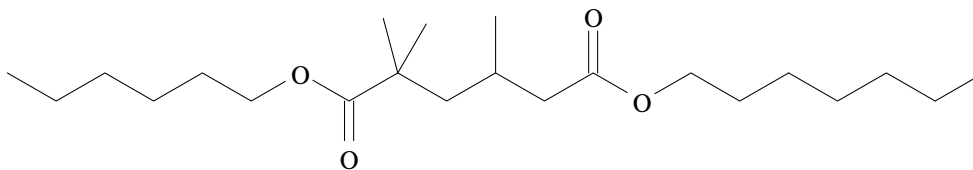
Сложные эфиры дикарбоновых кислот подробно описаны в работах Дукека и Поркина [5.53]. Два типа молекул сложных эфиров или их сочетание оказались наиболее пригодными для применения в качестве компонентов смазочных материалов:

1. Сложные эфиры, образованные с помощью реакции разветвленных первичных спиртов с прямолинейными дикарбоновыми кислотами (форм. 5.7).
2. Сложные эфиры, образованные в ходе реакции прямолинейных спиртов с разветвленными кислотами (форм. 5.8).



ди(2-этилгексил)адипат

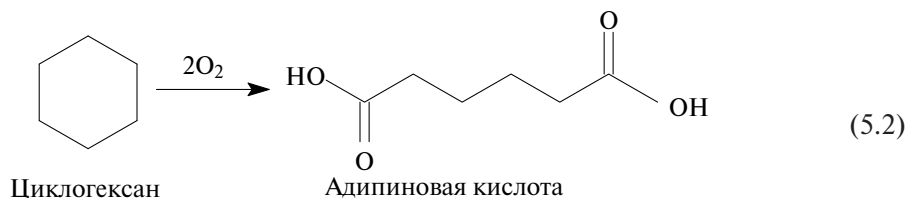
Форм. 5.7



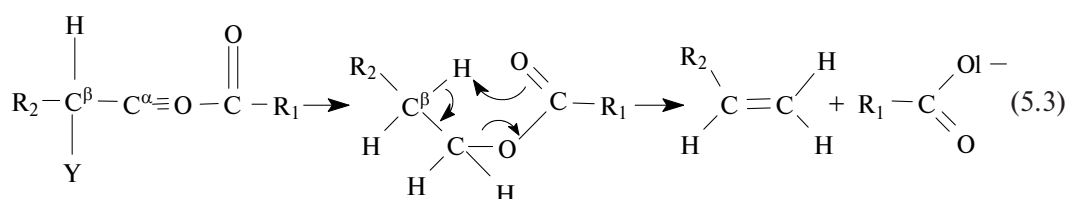
диундецил(2,2,4-триметил)адипат

Форм. 5.8

Спирты, необходимые для производства масел на основе сложных эфиров дикарбоновых кислот, могут быть получены синтетически путем гидроформилирования олефинов монооксидом углерода и водородом (уравн. 5.1). Дикарбоновые кислоты получают либо окислением растительных масел, например касторового — для производства азелаиновой или себаценовой кислоты [5.54], либо расщеплением соответствующих алициклических углеводородов кислородом — для производства адипиновой кислоты (уравн. 5.2) [5.55].



Сложные эфиры прямоцепочечных дикарбоновых кислот имеют лучшие  $V-T$  характеристики, чем минеральные масла, и более высокие значения ИВ. Последние снижаются по мере увеличения разветвленности, которая, в свою очередь, улучшает низкотемпературные свойства. Сложные эфиры с малой разветвленностью обладают наилучшими свойствами, особенно сложные эфиры, в которых метильные группы расположены рядом с карбоксильными. Наличие в сложных эфирах третичных атомов водорода не приводит к увеличению стабильности относительно окисления (уравн. 5.3). Пространственно-затрудненные сложные эфиры обладают температурной и гидролитической стабильностью. Гидролитическая стабильность была еще больше повышена за счет использования карбодиамидов [5.55]. При низких температурах вязкость сложных эфиров изменяется во времени, а наличие присадок может отрицательно сказаться как на ее значениях, так и на величине температуры застывания. Метакрилаты в качестве вязкостных присадок позволяют достичь ИВ вплоть до 170–180. При использовании сложных эфиров в качестве присадок, улучшающих ИВ, снижение их эффективности вследствие напряжения сдвига менее ярко выражено. Хотя сложные эфиры, как правило, обладают вдвое более высокой несущей способностью, чем минеральные масла, специальные присадки в них вводят для улучшения противозадирных характеристик.

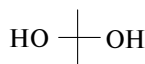


Масла на базе сложных эфиров дикарбоновых кислот могут улучшать  $V-T$  характеристики автомобильных моторных масел, не оказывая негативного влияния на значение вязкости при низких температурах и текучесть ньютоновских жидкостей. Такие масла также можно использовать в дизельных двигателях. Помимо этого, сложные эфиры успешно применяют в качестве присадок для смазок, улучшающих смазывающую способность, и ПАО — для улучшения совместимости с эластомерами.

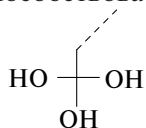
### 5.3.1.2. Сложные эфиры полиолов

Начиная с 40-х гг. прошлого века гликоль ((2,2-диметил)-1,3-пропандиол) (форм. 5.9), триметилэтан и триметилпропан (1,1,1-трис(гидроксиметил)этан и-пропан (форм. 5.10) и пентаэритрит (2,2-бис(гидроксиметил)-1,3-пропандиол (форм. 5.11) были известны как спиртовые компоненты сложных эфиров. Они подробно описаны в работе Смита [5.56]. Наряду с превосходной температурной стабильностью и стойкостью к окислению, сложные эфиры имеют хорошую  $V-T$  зависимость и смазочные свойства, а также превосходные вязкостные свойства при низких температурах. Это объясняется тем, что температурная стабильность первичной ОН-группы выше, чем у вторичной, а гидрокси-производные неопентана содержат только первичные гидрокси-группы, при этом короткие боковые цепи углеводородов не только снижают его температуру застывания, но и за счет третичных атомов углерода и водоро-

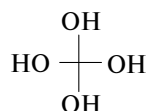
да одновременно облегчают взаимодействие с атомами кислорода. Однако полиолы не имеют третичных атомов углерода и водорода, равно как и атомов водорода в  $\beta$ -положении, которые могли бы способствовать термическому расщеплению.



Форм. 5.9



Форм. 5.10

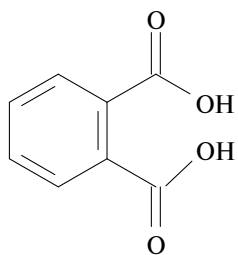


Форм. 5.11

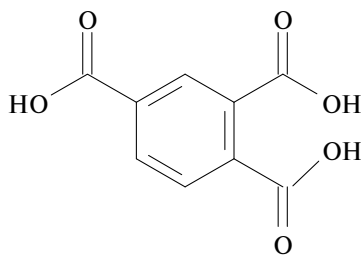
Механизм полимеризации сложных эфиров полиолов при окислении был изучен [5.57], а производные бензотриазола предложены к применению в качестве многофункциональных присадок [5.58]. Начиная с 60-х гг. прошлого века сложные эфиры полиолов получили широкое распространение в качестве высокотемпературных смазочных масел, например для двигателей самолетов, развивающих скорость, превышающую в два раза скорость звука. Они приобрели еще большее значение с началом роста спроса на биологически разлагаемые сложные эфиры.

### 5.3.1.3. Прочие сложные эфиры карбоновых кислот

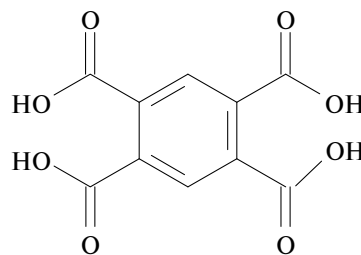
Структурными двойниками сложных эфиров полиолов являются сложные эфиры некоторых ароматических карбоновых кислот, главным образом фталевой кислоты (форм. 5.12), тримеллитовой кислоты (форм. 5.13) и пиромеллитовой кислоты (форм. 5.14) с монофункциональными спиртами. Последние также могут применяться в качестве смазочных материалов, используемых при высоких температурах. При этом у некоторых сортов вязкость при низких температурах сильно изменяется с течением времени, что накладывает ограничения на их применение в этих условиях.



Форм. 5.12



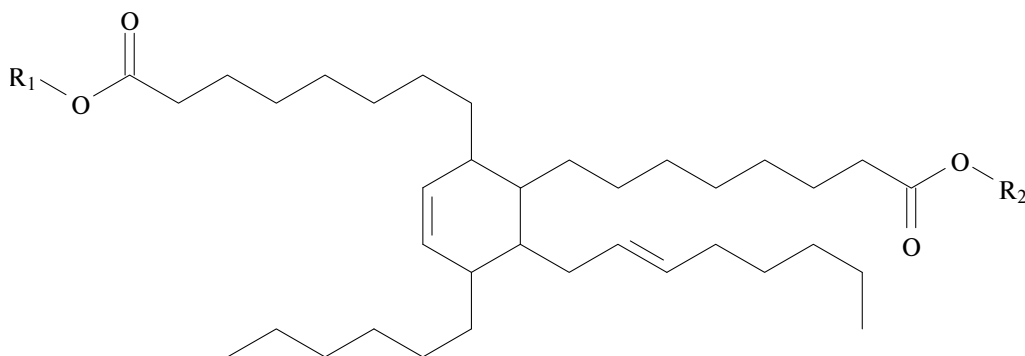
Форм. 5.13



Форм. 5.14

Сложные моноэфиры — продукты реакции жирных кислот и монофункциональных спиртов — применяются в металлообработке. Сульфированные сложные эфиры являются превосходными противозадирными присадками для всех видов смазочных материалов [5.59].

Сложные эфиры димерных кислот (форм. 5.15), которые получают из олеиновой или талевой жирной кислоты, применяют в качестве моторных масел и загущающих компонентов.



Форм. 5.15

#### 5.3.1.4. Комплексные сложные эфиры

В настоящее время вызывают интерес сложные эфиры, полученные из прямолинейных или разветвленных диолов или полиалкиленгликолей и прямолинейных или разветвленных дикарбоновых кислот, а также монокарбоновых кислот и монофункциональных спиртов. Обычно сначала диол этерифицируют дикарбоновой кислотой, а затем, в зависимости от желаемого продукта реакции, к промежуточному соединению добавляют либо карбоновую кислоту, либо моноспирт. Сейчас большое значение имеют два типа комплексных сложных эфиров (форм. 5.16– 5.17):



Форм. 5.16



Форм. 5.17

Та же схема производства используется и в том случае, когда в реакции участвуют полиолы — производные неопентана [5.60] или глицерин [5.61].

Одной из основных причин использования комплексных сложных эфиров стало то, что они имеют более высокие молекулярные массы и более высокие вязкости, чем обычные сложные эфиры. Сложные эфиры, аналогичные по своему строению, (форм. 5.17), имеют более высокие значения температуры вспышки, температуры застывания и низкотемпературной вязкости, чем комплексные (форм. 5.16). Наличие в структуре сложных эфиров типа полиалкиленгликолей (форм. 5.16) приводит к более низким значениям температур застывания, чем у содержащих алифатические гликоли. Среднемолекулярные олигомерные сложные эфиры, начиная с триглицеридов (в основном растительных) жирных кислот [5.112], представляют интерес для производства экологически безвредных и высокоэффективных смазочных материалов, к которым относятся сложные эфиры на основе адипиновой и себациновой кислот и неопентилгликоль (форм. 5.16). Это объясняется возможностью их разложения в биосфере и приблизительно такими же, как и у их мономеров, значениями температур застывания при более высокой вязкости [5.113].

Высокомолекулярные комплексные сложные эфиры типа (форм. 5.18)



Форм. 5.18

также называют полимерными сложными эфирами. Они находят применение главным образом в таких областях, где требуется применение минеральных масел и наличие стойкости к растворителям.

При (со)олигомеризации альфаолефинов и альфаметакрилатов образуется полимерный сложный эфир другого типа [5.62]. Третий тип таких соединений основан на использовании при синтезе полимеров, содержащих функциональные группы [5.63]. С этими соединениями были предприняты попытки объединить преимущества синтетических углеводородов и сложных эфиров, обладающих высоким уровнем вязкости.

#### 5.3.1.5. Сложные эфиры фторированных карбоновых кислот

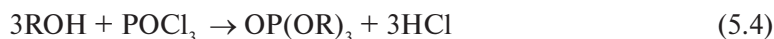
Сложные эфиры фторированных кислот легко гидролизуются, а так как свободная кислота оказывает сильное окисляющее действие, то в качестве смазочных материалов могут применяться только сложные эфиры, синтезированные с использованием фторированных спиртов. Фторированные сложные эфиры обладают более высокой температурной стабильностью и стойкостью к окислению, чем их нефторированные аналоги. В их присутствии некоторые типы каучука дают усадку, а антиоксиданты оказывают негативный эффект. Фторированные сложные эфиры были первыми предложены в качестве смазочных масел, которые можно использовать при высоких температурах. Их подробное описание можно найти в работе Мерфи [5.64]. Сейчас можно допустить, что их применение будет ограничено из-за конкуренции со стороны фторированных полиэфиров. Также известны, однако не получили широкого распространения, сложные эфиры, содержащие серу в кислотном или спиртовом компоненте.

Ожидается, что в будущем смеси всех видов синтетических углеводородов и синтетических сложных эфиров позволят достичь значительных улучшений во всех областях их применения [5.65–5.67].

#### 5.3.2. Сложные эфиры фосфорной кислоты

Третичные сложные эфиры фосфорной кислоты со спиртами и фенолами были получены 150 лет назад, однако не внедрялись в качестве противоизносных присадок до 1930 г. В настоящее время они также приобрели значение в качестве пластификаторов, огнестойких гидравлических жидкостей, компрессорных масел и синтетических смазочных материалов. Сложные эфиры фосфорной кислоты подробно описаны в работах Хаттона [5.68] и Марино [5.69]. Их обычно подразделяют на триарил-, триалкил- и алкиларилфосфаты и получают с использованием реакции фосфорилхлорида с фенолами или спиртами (уравн. 5.4). По своим свойствам они находятся в диапазоне от маловязких жидкостей до высокоплавких твердых веществ. По мере увеличения молекулярной массы триалкилфосфаты трансформируются из растворимых (в воде) в нерастворимые жидкости. Триарилфосфаты имеют более высокую

вязкость и нерастворимы в воде, а благодаря наличию в структуре боковой арильной цепи понижается величина их температуры плавления. По своим свойствам алкиларилфосфаты находятся между алкилфосфатами и арилфосфатами.



Чем длиннее и разветвленное алкильная цепь, тем выше гидролитическая стабильность, при этом толил-замещение превосходит фенильное. Алкиларилфосфаты более склонны к гидролизу, чем триалкил- или триарилфосфаты. Сложные эфиры фосфорной кислоты менее стабильны, чем сложные эфиры кремниевой или борной кислот. Их гидролитическая стабильность может быть повышена, например, эпоксидами [5.70]. Гидролиз сложных эфиров фосфорной кислоты, применяемых в качестве гидравлических жидкостей, можно практически исключить за счет проведения ионообменной обработки и вакуумного дегидрирования [5.71].

Температурная стабильность триарилфосфатов выше, чем у алкилфосфатов. Триарилфосфаты могут применяться при температурах вплоть до 175 °С при наличии в качестве добавок аминных антиоксидантов и ИК, например некоторых солей первичных или вторичных фосфатов, тогда как алкилдиарилфосфаты — только вплоть до 120 °С. Разветвление алкилрадикалов снижает температурную стабильность, причем этот эффект усиливается по мере уменьшения длины цепи. Триалкилфосфаты и алкилдиарилфосфаты ведут себя аналогично. Сложные эфиры фосфорной кислоты в целом коррозионно не агрессивны, однако их термическое разложение приводит к образованию фосфорной кислоты, которая является коррозионно-опасной средой. Высокие значения температур самовоспламенения (вплоть до 600 °С) свидетельствуют о хороших огнеупорных свойствах этих веществ. Введение в триалкил- и алкиларил-продукты присадок, улучшающих ИВ, приводит к снижению их температур застывания до –65 °С.

Сложные эфиры фосфорной кислоты обладают превосходными смазочными свойствами, особенно при использовании со сталями. Они смешиваются почти со всеми другими смазочными маслами и присадками. С другой стороны, в силу своей растворяющей способности они несовместимы с резинами, лаками и пластиками. Однако нейлон, эпоксидные и фенолформальдегидные смолы стабильны и, соответственно, их можно использовать в композиции со сложными эфирами фосфорной кислоты.

#### 5.4. Полиалкиленгликоли

Первые полиалкиленгликоли, пригодные для применения в качестве смазочных материалов, были разработаны во время Второй мировой войны. Патент был получен и опубликован Робертсом и Файфом [5.72]; подробное описание свойств полиалкиленгликолей содержится в трудах Гандерсона и Миллета [5.73] и Касси, Влатлока и Клинтона [5.75].

Полиалкиленгликоли получают за счет реакций эпоксидов и пропиленов с соединениями, содержащими активный водород, обычно спиртами или водой в присутствии щелочного катализатора, например гидроксида натрия или калия (рис. 5.5). Варьируя соотношение эпоксидов и концевых групп, можно получать различные

продукты реакций. Полимеры со статически распределенными алкиленовыми группами получают с использованием смеси алкиленоксидов. Раздельное введение реагентов приводит к образованию блоксополимеров. Так как этиленоксид обладает большей реакционной способностью, чем пропиленоксид, статистические сополимеры содержат пропиленоксидные группы на концах цепей.

Также были получены терполимеры, например с тетрагидрофураном. Чистые полимеры на основе тетрагидрофурана можно получить его полимеризацией в присутствии катализаторов Фриделя–Крафтса. Они представляют собой бесцветные маслянистые или парафинистые вещества с очень низкой токсичностью.

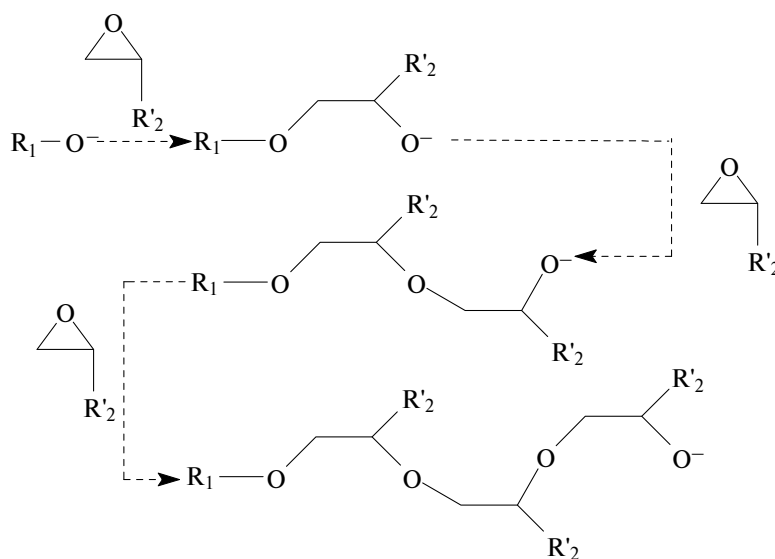


Рис. 5.5. Получение полиалкиленгликолей

Полиалкиленгликоли имеют по меньшей мере по одной гидроксильной группе на одном конце молекулы, поэтому они могут рассматриваться в качестве спиртов. Число гидроксильных групп увеличивается при использовании водных или многофункциональных инициаторов. Реакция спиртов с кислотами приводит к сложным эфирам, а реакции с сильными кислотами и олефинами — к простым эфирам.

Поскольку связь между атомами углерода и кислорода сильнее, чем между двумя атомами углерода, растворяющие способности полиалкиленгликолей и углеводов отличаются. Смешиваемость полиалкиленгликолей с водой увеличивается с ростом числа этиленоксидных групп в молекуле. Растворимость является результатом образования водородной связи между молекулами воды и свободными электронными парами атомов кислорода. Водорастворимые сорта практически негорючи. Гигроскопические свойства полиалкиленгликолей зависят от их структуры и вида имеющихся функциональных групп — они снижаются по мере увеличения молекулярной массы и числа эфирных связей. Таким же образом уменьшается и растворимость в воде. Ее снижение с повышением температуры можно объяснить разрывом водородных связей. Растворимость в углеводах повышается по мере увеличе-



ния молекулярной массы. Как правило, полиалкиленгликоли растворяются в ароматических углеводородах.

При производстве полиалкиленгликолей молекулярную массу и вязкость можно как изменять в значительных пределах, так и точно отрегулировать в узких. Таким образом, полиалкиленгликоли отличаются от многих других смазочных материалов возможностью проектирования и создания целевых продуктов.

Низкомолекулярные полиалкиленгликоли, состоящие более чем на 50% из пропиленоксида, имеют температуры застывания вплоть до  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Кристаллизация нарушается благодаря наличию в молекуле боковых метильных групп. С другой стороны, чистые высокомолекулярные полиэтиленгликоли представляют собой парафинистые твердые вещества с температурами застывания около  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Значение кинематической вязкости колеблется в пределах от 8 до  $100\ 000\text{ мм}^2/\text{с}$  при  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При переходе от диолов к моноэфирам, эфирам алкоксикислот и диэфирам с той же молекулярной массой, в особенности при низких температурах, снижается вязкость. По сравнению с минеральными маслами, обладающими прямолинейной структурой, из  $V-T$  зависимостей полигликолей следует, что их вязкости слишком высоки как при низких, так и при высоких температурах. Значения ИВ полиэтиленгликолей обычно составляют около 200. Высокомолекулярные полиэтиленгликоли имеют значения ИВ вплоть до 400. Продолжительный нагрев полиалкиленгликолей до температуры выше  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  приводит к деполимеризации. Получаемые в результате этого альдегиды продолжают реагировать с образованием кислот, что является преимуществом, так как образуются только растворимые или легко испаряемые продукты. Незначительные количества щелочи или щелочноземельных металлов промотируют разложение. Оно может быть предотвращено введением аминных антиоксидантов, при этом масла становятся пригодными к применению в качестве теплоносителей при температурах вплоть до  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Антикоррозионные и противозадирные присадки к полиалкиленгликолям должны обладать ярко выраженной стойкостью к воде.

Благодаря полярности своих молекул полиалкиленгликоли обладают сильным сродством к материалам, за счет чего смазочные характеристики остаются неизменными даже при высоком поверхностном давлении. Это является достоинством смазочных материалов, применяемых в металлообработке в качестве СОЖ. Так как набухание эластомеров уменьшается по мере увеличения вязкости, то полиалкиленгликоли могут применяться с натуральными и синтетическими каучуками, в качестве компонентов гидравлических масел и тормозных жидкостей. Легкость удаления полиалкиленгликолей за счет промывки водой делает их пригодными к применению в областях, в которых использование других продуктов нежелательно. Токсичность полиалкиленгликолей в маловязких продуктах аналогична токсичности глицерина, а в более вязких — изопропанола. Это важное преимущество позволяет применять эти соединения в пищевой, фармацевтической, табачной промышленности и при производстве косметики. Продукты с высоким содержанием этиленоксида способны биологически разлагаться на 80%. Полиалкиленгликоли снижают температуру застывания воды. Высоковязкие водорастворимые продукты являются стойкими к сдвигу жидкими загустителями. Гидрофильные и гидрофобные фракции блоксополимеров придают им соответствующие поверхностно-активные свойства.

Благодаря применению полиалкиленгликолей с широким молекулярно-массовым диапазоном могут быть улучшены смазочные свойства в зонах смешанного трения и в местах контакта трения качения. Так, например, эти соединения могут заполнить имеющийся между водой и полиэфирами пробел в адгезионных и вязкостных свойствах, а также в характеристиках испаряемости.

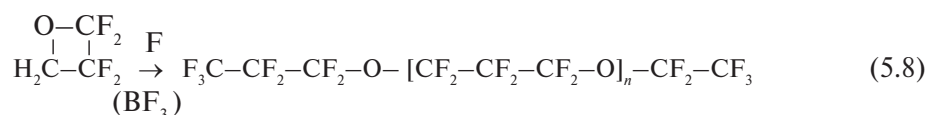
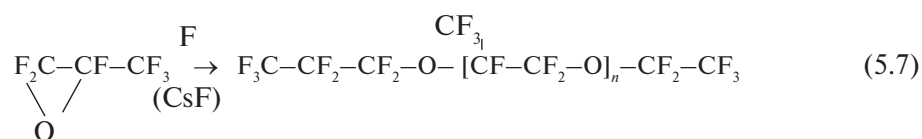
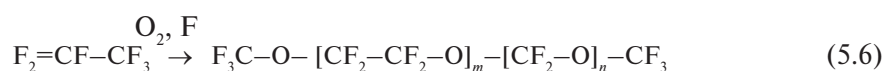
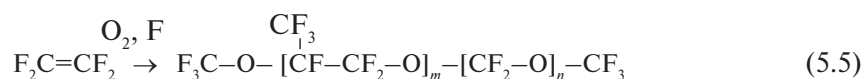
## 5.5. Прочие полиэфиры

Алкилированные арилэфиры аналогично алкилэфирам имеют более низкие значения ИВ, а также температуры застывания и кипения, чем соответствующие алканы. Ассиметричное замещение также снижает температуру застывания, но негативно влияет на  $V-T$  зависимость. Несмотря на то, что эти продукты имеют низкие значения вязкости, некоторые из них находят применение в качестве компонентов смазочных масел в медико-биологических исследованиях.

### 5.5.1. Перфторированные полиэфиры

ПФПЭ в качестве смазочных материалов впервые, вероятнее всего, были упомянуты Гампребтом в 1965 г. [5.76]. Позже они были описаны подробнее в работах Швицерата и Дель Песко [5.77, 5.78].

Фотохимическая полимеризация с тетрафторэтиленом в присутствии кислорода с последующим фторированием элементарным фтором приводит к получению продуктов типа А (уравн. 5.5). При той же реакции с гексафторпропиленом получают продукты типа Б (уравн. 5.6). Анионная полимеризация гексафторпропиленэпоксида дает продукты типа В (уравн. 5.7), а полимеризация 2,2,3,3-тетрафтороксетана в присутствии кислот Льюиса в качестве катализатора — продукты типа Г (уравн. 5.8).



Плотность ПФПЭ почти в два раза выше, чем у углеводородов. Они не смешиваются с большинством других базовых масел и не горючи практически в любых условиях. Наиболее известные типы А и Б имеют хорошие, а иногда превосходные  $V-T$  зависимости и зависимости вязкости от давления и низкие температуры засты-

вания [5.79]. При изменении температуры или давления вязкость линейных ПФПЭ меняется в меньшей степени, чем у нелинейных продуктов, однако при этом зависимость отклоняется от линейной, о чем недавно сообщалось в литературе [5.114]. Эти соединения стабильны на воздухе при температурах вплоть до 400 °С. Трифторметильные группы, смежные с эфирными связями, защищают их от расщепления, катализируемого кислотой, однако дифторформильные группы в то же время способствуют снижению стабильности при высоких температурах. ПФПЭ, включая эластомеры, обладают исключительной химической инертностью, а также превосходной гидролитической стабильностью. Однако хорошая радиационная стойкость, о которой сообщалось ранее, в настоящее время поставлена под сомнение [5.80].

ПФПЭ обладают более высоким сопротивлением сдвигу, чем другие полимерные смазочные материалы, но при контакте со сталями и в условиях граничной смазки их рабочие характеристики оказываются хуже [5.81]. В литературе сообщалось о негативном влиянии примесей на смачивающую способность [5.82]. Также публиковались данные о влиянии влаги на свойства ПФПЭ влажности [5.83] и их термоокислительных свойствах [5.54]. В ходе исследований было обнаружено, что эксплуатационные характеристики смазочных материалов на основе ПФПЭ могут быть улучшены с помощью добавления к ним  $\alpha$ ,  $\beta$ -дикетонов [5.85].

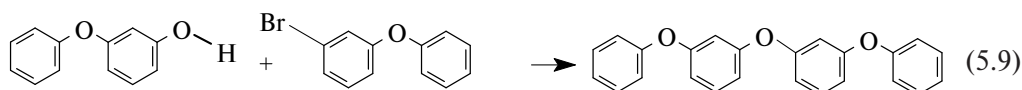
Перфторированные алкилэфиры благодаря своей температурной стабильности, стойкости к окислению, хорошей низкотемпературной текучести и огнестойкости обладают всеми необходимыми свойствами для применения как в качестве смазочных масел, так и гидравлических жидкостей в современных космических кораблях. Как диэлектрики, обладающие превосходными свойствами, они могут применяться в трансмиссионных и инертных жидкостях, используемых в трансформаторах и генераторах.

### 5.5.2. Полифенилэфиры

Полифенилэфиры (форм. 5.19) — это продукты реакции фенолов и галогенизированных ароматических соединений (уравн. 5.9). Они подробно описаны в работах Махоней и Барнума [5.86], где были использованы сокращенные формулы соединений, содержащие данные о положении замещения, числе фенильных колец и эфирных связей:

ppp5P4E обозначает  $\phi-O-\phi-O-\phi-O-\phi-O-\phi$  (p-p-p)

Форм. 5.19



Наличие ароматических групп повышает стабильность, но негативно влияет на  $V-T$  зависимость полифенилэфиров, а благодаря алкильным группам понижаются температуры плавления. Пара-производные имеют более низкую испаряемость, в то время как орто- — высокую. Спонтанное воспламенение происходит при температурах от 550 до 600 °С, наличие алкильных групп снижает его приблизительно на 50 °С. При контакте ПФПЭ с обычными эластомерами последние набухают.

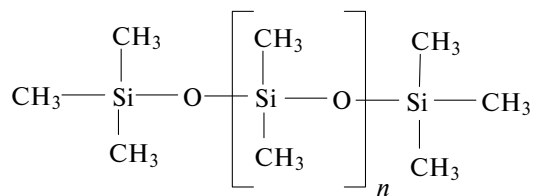
Стойкость полифенилэфиров к окислению лишь немного ниже, чем у полифенилов или тетраарилсиланов; она снижается при алкилзамещении. Температуры термического разложения достигают 465 °С. Наличие короткоцепочечных заместителей снижает ее до 380 °С, а больших алкил-групп — до 350 °С и ниже, т. е. до значений, типичных для алифатических углеводов. Присутствие трифторметильных групп оказывает негативное влияние на температуру термического разложения, снижая ее до 270 °С и ниже. При термическом разложении наблюдается незначительное коксообразование, увеличивающееся по мере алкилзамещения, особенно в присутствии метильных групп.

Полифенилэфиры обладают самой высокой радиационной стойкостью. Повышение значений вязкости под влиянием радиации при низких температурах более заметно, чем при высоких. При этом также происходит повышение кислотности, потерь на испарение, коррозионной агрессивности и коксообразования и снижение температур вспышки и воспламенения.

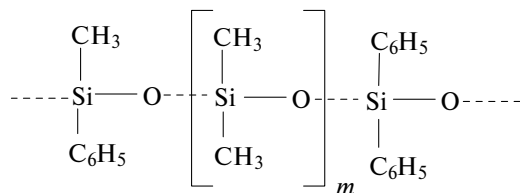
При температурах в интервале от 200 до 300 °С полифенилэфиры по смазочным свойствам сравнимы с минеральными и эфирными маслами и превосходят полисилоксаны и ароматические углеводороды. Алкилированные полифенилэфиры обладают лучшими свойствами по сравнению с незамещенными. Полифенилэфиры пригодны к применению в качестве высокотемпературных и радиационностойких гидравлических жидкостей и масел [5.115], а также в качестве смазочных материалов для оптических переключателей [5.11].

### 5.5.3. Полисилоксаны (силиконовые масла)

Полисилоксаны могут быть жидкостями или твердыми веществами. Их химические свойства и технология получения описаны в известной монографии Нолля [5.87]. Силиконовые масла, применяемые в качестве смазочных материалов, представляют собой прямоцепочечные полимеры на основе диметилсилоксана (форм. 5.20) и фенилметилсилоксана (форм. 5.21). Они подробно описаны в работах Аве и Шифера, а также Демби, Стоклоза и Гросса [5.88, 5.89].



Форм. 5.20



Форм. 5.21

Метилсиликоновые масла получают из кварца, используя реакцию с метанолом в конце процесса (рис. 5.6), однако в промышленной технологии процесс проводится в несколько ступеней. Например, проводится так называемое уравнивание смеси силоксанов с различной молекулярной массой с сильной кислотой или щелочными катализаторами с целью достижения узкого молекулярно-массового распределения по Гауссу [5.90].

К уникальным свойствам силиконовых смазочных масел относятся их несмешиваемость со многими органическими жидкостями, слабая зависимость их физических свойств от температуры и отсутствие физиологического воздействия на организм человека. Увеличивая асимметрию молекул за счет замещения диметилсилильных групп фенилметилсилильными, можно получить масла с очень низкими температурами застывания и высокой вязкостью. Плотность силиконовых масел близка к плотности воды, тогда как плотность диметилсиликоновых масел несколько ниже плотности воды, а фенилметилсиликоновых масел — несколько выше.

Крайне низкие значения  $V-T$  коэффициентов [5.91] — ниже чем 0,6 — у маловязких диметилсиликоновых масел объясняются главным образом экстраординарной гибкостью составляющих их Si—O цепей. Силиконовые масла от мало- до умеренно вязких имеют ньютоновскую природу вплоть до высоких скоростей сдвига, но по мере повышения вязкости кажущаяся вязкость снижается с повышением скорости сдвига, т. е. наблюдается псевдопластичное поведение.

Сжимаемость и изменение вязкости при высоких давлениях в значительной степени зависят от соотношения количества метильных и фенильных групп в силико-

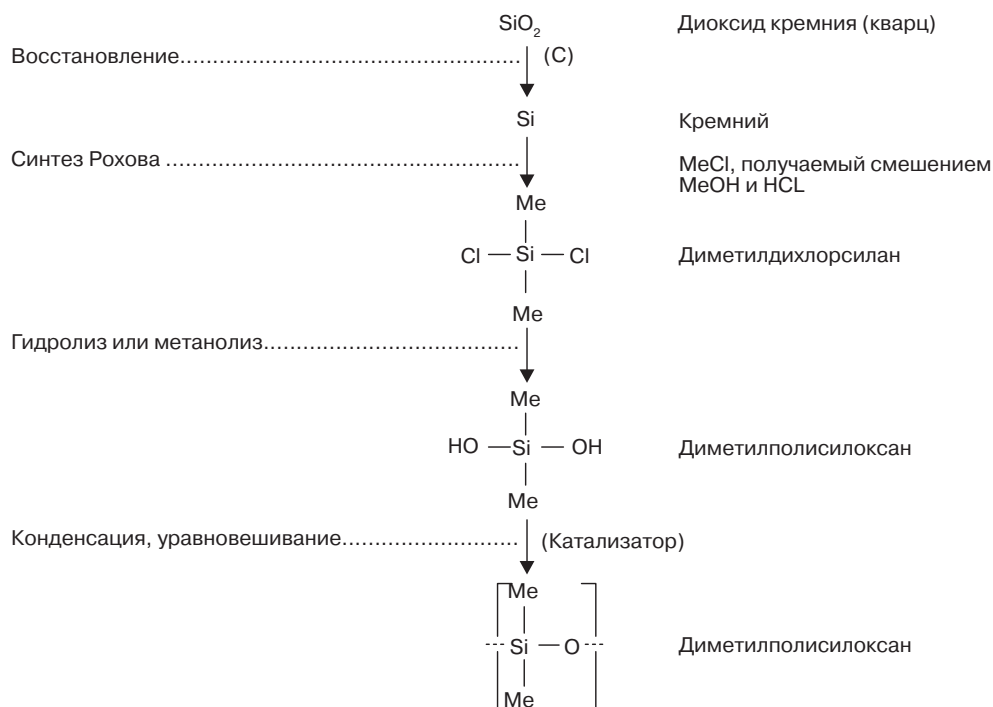


Рис. 5.6. Производство диметилсиликоновых масел

новых маслах, причем эти показатели сравнительно высоки опять-таки вследствие гибкости Si—O цепей.

Термическое разложение силиконовых масел начинается приблизительно при 300 °С. Продукты разложения обычно коррозионно неагрессивны, но они снижают вязкость масел. При температуре вплоть до 200 °С силиконовые масла по стойкости к окислению превосходят углеводороды, сложные эфиры и полиалкиленгликоли. Фенилметилсиликоновые масла вследствие резонансной стабилизации фенильных радикалов теряют стабильность при температурах, почти на 50 °С превышающих соответствующие значения для диметилсиликоновых масел. Корреляция термоаналитических и вискозиметрических данных силиконовых масел, подвергнутых старению, дала даже еще более высокое значение [5.92]. При более высоких температурах за счет образования силоксильных и силильных радикалов посредством поперечных связей (сшивки) появляются полимерные молекулы, т. е. гели.

Некоторые соединения железа и церия особенно пригодны к применению в качестве ингибиторов окисления. Тем не менее при высоких температурах в реакциях с участием в присутствии селена и теллура происходит телеобразование. А в присутствии хлора реакции могут протекать со взрывом. Si—O связи могут также разрываться в результате гидролитической атаки, но, в отличие от масел на базе сложных эфиров кремниевой кислоты, образование силикагелей, или гелей кремниевой кислоты, не происходит.

Поверхностное натяжение и склонность силиконовых масел к пенообразованию намного ниже, чем у минеральных масел, но благодаря тому же порядку величины температурного расширения силиконовые масла являются идеальными антипенными агентами для углеводородов.

Смазочные свойства фенилметилсиликоновых масел намного лучше, чем у диметилсилоксановых. А трифторпропилметилсиликоновые масла обладают еще лучшими свойствами [5.93], однако, несмотря на это, их часто заменяют ПФПЭ.

Силиконовые масла находят применение буквально во всех видах промышленности и военной техники. Диметилсиликоновые масла применяются для смазки подшипников и зубчатых передач, в которых имеет место трение качения. При трении скольжения их эксплуатационные характеристики зависят от характеристик пары металлов, с которой они применяются. Например, они могут применяться в качестве смазочных материалов для бронзы или латуни на алюминии, меди или цинка при низких поверхностных давлениях или для подшипников из пористой бронзы. Силиконовые масла являются одними из лучших для пластиковых подшипников, но при применении в прецизионных приборах следует предотвращать их распространение за пределы зоны смазывания с помощью использования эпиламизирующего агента. Также эти масла пригодны для смазки деталей из каучука, а также в качестве масел для переключателей и трансформаторов. Силиконовые масла с высоким уровнем фенил-замещения обычно применяются для смазки турбин, шарикоподшипников и всех видов приборов, особенно при высоких температурах. Также они обладают высокой радиационной стабильностью.

Силиконовые масла благодаря своей химической инертности и возможности применения как при низких, так и при высоких температурах могут использоваться в качестве базовых масел для всех видов пластичных смазок независимо от своего назначения, будь то герметизация или демпфирование [5.94].

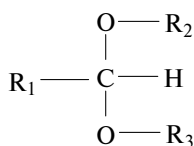
### 5.6. Прочие синтетические базовые масла

Для разработки новых синтетических масел всегда существовали две причины. Первая заключалась в снижении зависимости физических свойств от температуры, т. е. в необходимости сделать возможным применение синтезированных масел при как можно более высоких и низких температурах. Вторая — в достижении как можно более высокой инертности, т. е. продлении эффективного срока действия. В последнее время появилась и третья причина, заключающаяся в улучшении экологических свойств получаемых масел в сочетании с как можно более низкой физиологической инертностью.

Выпускаемые промышленностью сложные эфиры карбоновых кислот и силоксановые масла имеют предельную нижнюю температуру эксплуатации в  $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и лишь некоторые разветвленные углеводороды, например 3,3-диметилгексан, обладают подходящими свойствами (температурой плавления  $< -125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), хотя и они не лишены недостатков своего рода. Предельная верхняя температура эксплуатации доступных на рынке ПФПЭ составляет  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в связи с чем для применения при более высоких температурах должны рассматриваться жидкости, содержащие стабильные ядра элементного углерода, например в C—N-группе в некоторых тризин-производных и алкилированных фенильных или силильных группах. ПФПЭ даже в идеальных условиях могут эксплуатироваться при температурах не выше  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В тризин-производных алкилированные фенильные или силильные группы должны быть замещены на феноксифенильные группы. В принципе, можно умозрительно представить молекулы, вообще не содержащие C—H-связей, пригодные для применения при температурах выше  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  [5.95].

Среди следующей группы синтетических жидкостей, предлагаемых в качестве базовых масел для смазочных материалов или специально разработанных для применения в этих целях, за последние 30 лет ни одна из них не приобрела промышленного значения или стала экономически привлекательной. Ни для одной из них до сих пор не появилось своего сегмента, несмотря на то что некоторые действительно обладают поразительными свойствами.

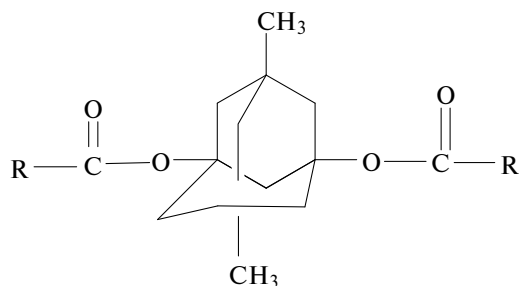
Ацетали (форм. 5.22) были исследованы благодаря своей высокой стабильности в щелочных средах. Однако эти соединения чувствительны к кислотному гидролизу.



Форм. 5.22

Адамантан-производные, в основном сложные эфиры 1,3-дигидрокси-5,7-диметиладамантана (форм. 5.23), вследствие экстраординарной стойкости к окислению самого адамантана превосходят по этому показателю обычные сложные эфиры дикарбоновых кислот [5.96].

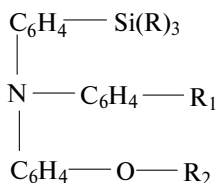
Алкилированные карбосиланы [5.117] с чередующимися атомами Si и C в чем-то сопоставимы с тетраалкилсиланами, хотя обладают более высокой вязкостью и даже более высокой температурной стабильностью. Эти соединения известны уже



Форм. 5.23

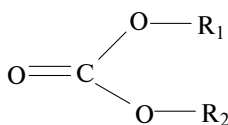
в течение нескольких десятилетий, однако до сих пор не нашли соответствующей ниши для применения в качестве смазочных масел из-за проблем, связанных с их синтезом в промышленных масштабах.

Ароматические амины, в частности производные триалкилсилил-замещенных, (форм. 5.24), могут рассматриваться как смазочные материалы благодаря их высокой температурной стойкости [5.95].



Форм. 5.24

По своим характеристикам диалкилкарбонаты, диэфиры карбоновой кислоты, (форм. 5.25), похожи на обычные сложные эфиры дикарбоновой кислоты и предпочтительны с точки зрения показателей токсичности и совместимости с уплотнениями [5.97]. Также немаловажен факт отсутствия кислотных соединений при разложении.

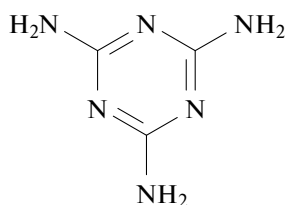


Форм. 5.25

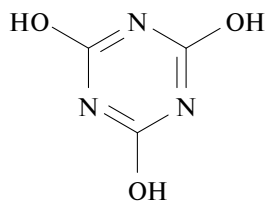
Гетероциклические соединения бора, азота и фосфора представляют собой циклические структуры, состоящие не только из углерода, который частично замещен, например азотом. Триазин-производные, например меламина (форм. 5.26) и циануровая кислота (форм. 5.27), представляют собой основу для получения огнестойких и высокотемпературных смазочных материалов [5.95; 5.96]. Атомы углерода могут находиться в меньшинстве относительно других атомов, как, например, в поликарборансилоксанах (форм. 5.28), сопоставимых по своей структуре с силиконовыми маслами, но применяемых при температурах выше 220 °C [5.98]. Причем углерод может быть полностью заменен азотом и бором [5.99] или азотом и фосфором,



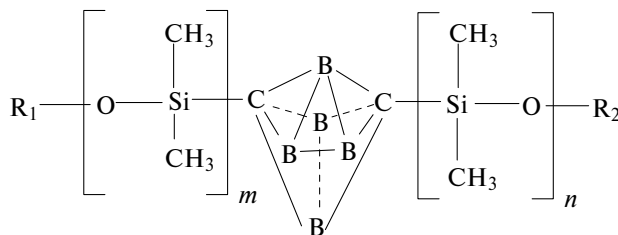
как, например, во фторсодержащих фосфазен-производных (форм. 5.29), которые в основном были разработаны для применения в огнестойких высокотемпературных гидравлических жидкостях [5.100] и в качестве присадок, улучшающих смазочные свойства ПФПЭ [5.101; 5.102].



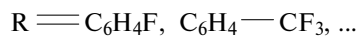
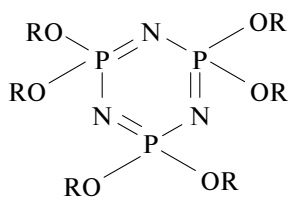
Форм. 5.26



Форм. 5.27



Форм. 5.28

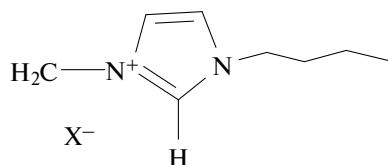


Форм. 5.29

Ионные жидкости при комнатной температуре, например соли, находящиеся в жидком агрегатном состоянии при комнатной температуре, представляют интерес в качестве смазывающих материалов, если производство таких воздухо- и влагостойких нейтральных продуктов можно организовать в промышленных масштабах [5.118]. Давление насыщенных паров этих жидкостей настолько низко, что не под-

дается измерению; они не воспламеняются; термически стабильны; имеют широкую область жидкого состояния, обладают сольватирующими свойствами по отношению к веществам всех видов. В зависимости от длины боковой катионной цепи и от выбора аниона они могут смешиваться с водой или другими органическими растворителями.

Эти жидкости состоят из громоздких органических катионов, например 1-алкил-3-метилимидазола (форм. 5.30), и широкого диапазона анионов: от тетрафторбората или гексафторфосфата до органических анионов, например бистрифторсульфонимида или тосилата. 1-бутил-3-метилимидазол тетрафторборат, например, представляет собой бесцветную жидкость с вязкостью приблизительно  $100 \text{ мм}^2/\text{с}$  при комнатной температуре и температурой застывания  $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ионные жидкости могут применяться с водой в качестве присадки — как смазочный материал для контактов типа сталь—сталь [5.119] и сталь—алюминий [5.120], и с водой или без нее — в качестве жидкостей-теплоносителей [5.125].

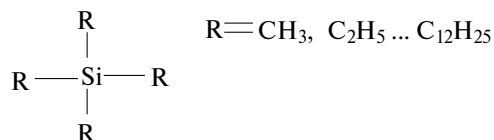


Форм. 5.30

Полиалкиленсульфиды, или политиоэфирные масла, представляют собой полиалкиленгликоли, в которых все  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  связи замещены  $\text{C}-\text{S}-\text{C}$  связями. Эти вещества обладают хорошей стойкостью к окислению и более высокими значениями вязкостей и температур застывания, чем у соответствующих углеводородов [5.103].

Полифенилсульфиды, или полифенилтиоэфиры, или  $\text{C}-\text{S}-\text{C}$  эфиры, представляют собой полифенилэфиры, в которых  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  связи замещены  $\text{C}-\text{S}-\text{C}$  связями. За счет этого, с одной стороны, они имеют более низкие температуры застывания и лучшие смазочные характеристики в режиме граничной смазки, а с другой — меньшую температурную стабильность и стойкость к окислению [5.104; 5.105].

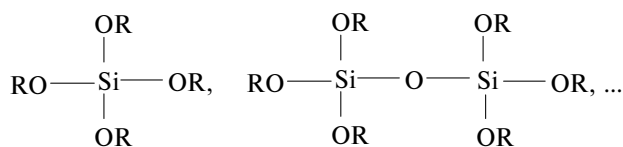
По сравнению с их углеводородными аналогами силанолы, главным образом тетраалкилсиланы (форм. 5.31), имеют более низкие температуры застывания, меньшую испаряемость, более высокие значения ИВ — вплоть до 155 — и превосходную температурную стабильность [5.95, 5.101, 5.107]. Так же как и ПАО, они восприимчивы к антиоксидантам и противоизносным присадкам [5.108].



Форм. 5.31

Силикаты, или сложные эфиры ортокремниевой кислоты (форм. 5.32), известны с середины XIX в. Их свойства сильно отличаются от свойств силосанов. Несмо-

тря на хорошую температурную стабильность и низкие температуры застывания, их применение ограничено из-за плохой гидролитической стабильности [5.109]. Эти недостатки простых сложных эфиров, вероятно, удастся преодолеть [5.110] по мере разработки полисиликатных кластеров.



Форм. 5.32

### 5.7. Сравнение синтетических базовых масел

Сравнение эксплуатационных характеристик синтетических базовых масел, естественно, представляет интерес. Так как они являются продуктами, занимающими на рынке очень специфические ниши, и сильно различаются по цене, то провести подобное сравнение достаточно сложно. Тем не менее, в литературе была предпринята попытка сравнения отдельных свойств различных синтетических базовых масел (табл. 5.3) [5.111].

Таблица 5.3. Ранжирование базовых масел

| Тип базового масла              | А   | Б   | В   | Г   | Д   | Е   |     |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Алкилбензолы                    | 2,5 | 1,0 | 2,5 | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 2,3 |
| Нафтеновые минеральные масла    | 2,5 | 2,0 | 2,0 | 2,5 | 2,0 | 2,5 | 2,2 |
| Парафиновые минеральные масла   | 2,0 | 3,0 | 2,0 | 2,5 | 2,0 | 2,0 | 2,3 |
| Минеральные масла гидрокрекинга | 1,5 | 3,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 1,5 | 2,0 |
| ПАО                             | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 2,0 | 1,5 | 1,5 | 1,3 |
| Сложные полиэфиры               | 1,5 | 1,5 | 2,0 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| Полиалкиленгликоли              | 2,0 | 1,5 | 2,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,7 |
| Силиконы                        | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,3 | 1,0 | 1,1 |
| ПФПЭ                            | 1,0 | 1,5 | 1,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,3 |
| Растительные масла              | 1,0 | 2,0 | 3,0 | 1,0 | 1,0 | 2,0 | 2,0 |

1,0 — отлично; 2,0 — удовлетворительно; 3,0 — плохо; А — стабильность при высоких температурах; Б — стабильность при низких температурах; В — старение; Г — характеристики потерь на испарение; Д — характеристики токсичности; Е —  $V-T$  зависимость.

Разумеется, поставить вопрос гораздо проще, чем найти на него простой ответ. Например, поведение синтетических базовых масел при высоких температурах — это открытое поле и, к счастью, трибохимия [5.122], которая на протяжении двух десятилетий была своего рода «спящей красавицей», снова привлекает внимание специалистов, например, к такому аспекту, как роль мицелл при сравнении свойств моторных масел [5.125]. Поведение масел при низких температурах также трудно поддается сравнению, даже при использовании таких средств, как дифференциальная сканирующая калориметрия и ЯМР [5.124]. А такие параметры, как токсич-

ность и экологическая безопасность, в настоящее время могут оказывать влияние на окончательное решение в гораздо большей мере, чем в прошлом [5.125].

### **5.8. Смеси синтетических смазочных материалов**

В настоящее время лишь немногие смазочные материалы содержат только одно базовое масло. Во-первых, потому что смесь двух и более базовых масел с разными свойствами часто приводит к появлению смазочного материала с желаемыми эксплуатационными характеристиками. Во-вторых, потому что многие из более полярных синтетических базовых масел используются в качестве присадок к менее полярным маслам, например сложные эфиры к углеводородам, и наоборот. В загущенных системах могут комбинироваться даже несмешиваемые базовые жидкости типа углеводородов и сложных эфиров, фторированных эфиров или полиалкиленгликолей.