



М. В. КУЛАКОВ

# Технологические измерения и приборы для химических производств

Издание третье, переработанное и дополненное

*Допущено Министерством высшего  
и среднего специального образования СССР  
в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся  
по специальности «Автоматизация и комплексная  
механизация химико-технологических процессов»*

Стереотипное издание

МОСКВА  
Альянс  
2017

УДК 66.0(075.8)  
ББК 35.я73  
К90

**Кулаков М. В.**

Технологические измерения и приборы для химических производств: Учебник для вузов по специальности «Автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов». – 3-е изд., переработанное и дополненное. – М.: Альянс, 2017. – 424 с. с ил.

ISBN 978-5-00106-090-1

В учебнике описаны основные методы измерения и современные приборы автоматического контроля основных технологических параметров химико-технологических процессов.

Рецензент – кафедра автоматизации производственных процессов МИНХ и ГП им. И.М. ГУБКИНА.

УДК 66.0(075.8)  
ББК 35.я73  
К90

*Учебник*

**Михаил Васильевич Кулаков**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ  
ДЛЯ ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Подписано в печать 17.01.2017 г. Формат 60х90/16.  
Печать офсетная. Тираж 30 экз. Заказ № 112709.

ООО «Издательство Альянс»  
125319, Москва, ул. Планетная, д. 47-3  
Тел./факс (499) 155-71-95 (многоканальный)  
izdat@aliansbooks.ru www.aliansbooks.ru

ISBN 978-5-00106-090-1



9 785001 060901 >  
ISBN 978-5-00106-090-1

Отпечатано: ПАО «Т 8 Издательские Технологии»  
109316 Москва, Волгоградский пр-т, д. 42, корп. 5  
Тел.: 8 495 221-89-80

© Кулаков М. В. 1983  
© Оформление. Издательство Альянс, 2017

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
-----------------------	---

## Раздел первый

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ, СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ПОГРЕШНОСТЯХ

<i>Глава 1.</i> Основные понятия об измерениях и средствах измерений . . . . .	4
§ 1.1. Основные понятия об измерениях . . . . .	4
§ 1.2. Средства измерений и их основные элементы . . . . .	6
§ 1.3. Статические характеристики и чувствительность измерительных приборов . . . . .	11
§ 1.4. Понятие о динамических характеристиках измерительных приборов . . . . .	15
<i>Глава 2.</i> Основные сведения о погрешностях средств измерения . . . . .	17
§ 2.1. Погрешности измерительных приборов . . . . .	17
§ 2.2. Статистические характеристики погрешностей средств измерения . . . . .	22
§ 2.3. Методы повышения точности измерений . . . . .	28
§ 2.4. Информационные характеристики средств измерения . . . . .	33

## Раздел второй

### ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР

<i>Глава 3.</i> Основные понятия . . . . .	38
§ 3.1. Температурные шкалы . . . . .	38
§ 3.2. Классификация приборов для измерения температур . . . . .	41
<i>Глава 4.</i> Манометрические термометры . . . . .	42
<i>Глава 5.</i> Термоэлектрические термометры . . . . .	47
§ 5.1. Термоэлектрический эффект . . . . .	47
§ 5.2. Включение третьего проводника в цепь термоэлектрического преобразователя . . . . .	49
§ 5.3. Поправка на температуру свободных концов термоэлектрического преобразователя . . . . .	50
§ 5.4. Термоэлектродные материалы и термоэлектрические преобразователи . . . . .	51
§ 5.5. Способ компенсации изменения температуры свободных концов термоэлектрического преобразователя . . . . .	56
§ 5.6. Приборы для измерения термоэлектродвижущих сил . . . . .	58
<i>Глава 6.</i> Термометры сопротивления . . . . .	68
§ 6.1. Общие сведения. Материалы для изготовления и устройство термометров сопротивления . . . . .	68
§ 6.2. Измерительные приборы термометров сопротивления . . . . .	73

<i>Глава 7.</i>	<b>Общие условия измерения температуры контактными термопреобразователями</b> . . . . .	81
	§ 7.1. Измерение температуры твердых тел и поверхностей . . . . .	81
	§ 7.2. Измерение температур газовых потоков . . . . .	84
<i>Глава 8</i>	<b>Пирометры излучения</b> . . . . .	86
	§ 8.1. Теоретические основы измерения температуры . . . . .	86
	§ 8.2. Квазимонохроматические пирометры . . . . .	91
	§ 8.3. Пирометры спектрального отношения (цветовые) . . . . .	94
	§ 8.4. Пирометры полного излучения . . . . .	95

### Раздел третий §

## ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СИГНАЛОВ И СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧ ПОКАЗАНИЙ НА РАССТОЯНИЕ

<i>Глава 9.</i>	<b>Преобразователи электрической аналоговой и дискретно-цифровой (частотной) ветви</b> . . . . .	98
	§ 9.1. Преобразователи, выполненные по схеме компенсации перемещений . . . . .	98
	§ 9.2. Преобразователи, выполненные по схеме силовой компенсации . . . . .	103
	§ 9.3. Частотные электрические преобразователи . . . . .	105
<i>Глава 10.</i>	<b>Преобразователи пневматической ветви</b> . . . . .	106
	§ 10.1. Преобразователи, выполненные по схеме силовой компенсации . . . . .	107
	§ 10.2. Преобразователи, выполненные по схеме компенсации перемещений . . . . .	108
	§ 10.3. Электропневматические и пневмоэлектрические преобразователи . . . . .	110

### Раздел четвертый

## ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

<i>Глава 11.</i>	<b>Основные понятия</b> . . . . .	113
	§ 11.1. Единицы давления . . . . .	113
	§ 11.2. Классификация приборов для измерения давления . . . . .	114
<i>Глава 12.</i>	<b>Жидкостные приборы</b> . . . . .	114
	§ 12.1. Приборы с видимым уровнем . . . . .	115
	§ 12.2. Приборы без видимого уровня . . . . .	117
<i>Глава 13.</i>	<b>Приборы измерения давления с упругими чувствительными элементами (деформационные)</b> . . . . .	124
	§ 13.1. Приборы с трубчатыми пружинами . . . . .	125
	§ 13.2. Мембранные и сильфонные приборы . . . . .	130
<i>Глава 14.</i>	<b>Основные сведения о выборе, установке и защите от агрессивных сред приборов давления</b> . . . . .	134
<i>Глава 15</i>	<b>Электрические манометры и вакуумметры</b> . . . . .	136
	§ 15.1. Манометры сопротивления . . . . .	136
	§ 15.2. Пьезоэлектрические манометры . . . . .	138
	§ 15.3. Теплопроводные манометры . . . . .	140
	§ 15.4. Ионизационные вакуумметры и манометры . . . . .	141
		421

## Раздел пятый

### ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА И РАСХОДА

Глава 16. Основные понятия; единицы . . . . .	143
Глава 17. Измерители количества жидкости и газа . . . . .	146
§ 17.1. Объемные счетчики для жидкостей . . . . .	146
§ 17.2. Скоростные счетчики для жидкостей . . . . .	147
§ 17.3. Счетчики количества газов . . . . .	149
Глава 18. Расходомеры переменного перепада давлений . . . . .	150
§ 18.1. Основы теории . . . . .	150
§ 18.2. Стандартные сужающие устройства . . . . .	160
§ 18.3. Особые случаи измерения расхода методом переменного перепада давлений . . . . .	163
§ 18.4. Основные правила соединения сужающих устройств с дифманометром . . . . .	165
Глава 19. Расходомеры динамического давления . . . . .	170
Глава 20. Расходомеры постоянного перепада давлений . . . . .	174
Глава 21. Расходомеры переменного уровня . . . . .	180
Глава 22. Бесконтактные расходомеры . . . . .	184
§ 22.1. Электромагнитные расходомеры . . . . .	184
§ 22.2. Ультразвуковые расходомеры . . . . .	188
§ 22.3. Калориметрические расходомеры . . . . .	190

## Раздел шестой

### ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКОСТЕЙ И СЫПУЧИХ ТЕЛ

Глава 23. Уровнемеры для жидкостей и сыпучих тел . . . . .	193
§ 23.1. Указательные стекла . . . . .	193
§ 23.2. Поплавковые уровнемеры . . . . .	194
§ 23.3. Гидростатические уровнемеры . . . . .	197
§ 23.4. Электрические уровнемеры . . . . .	199
§ 23.5. Радиоизотопные уровнемеры . . . . .	201
§ 23.6. Ультразвуковые и акустические уровнемеры . . . . .	204
§ 23.7. Уровнемеры для сыпучих тел . . . . .	205

## Раздел седьмой

### МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА СОСТАВА И ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕЩЕСТВ

Глава 24. Общие сведения. Классификация методов и приборов для анализа состава и измерения параметров веществ . . . . .	207
Глава 25. Кондуктометрический метод анализа . . . . .	212
§ 25.1. Основные понятия и физико-химические основы . . . . .	212
§ 25.2. Контактные кондуктометрические приборы . . . . .	218
§ 25.3. Бесконтактная низкочастотная кондуктометрия . . . . .	220
§ 25.4. Бесконтактная высокочастотная кондуктометрия . . . . .	221
§ 25.5. Измерительные схемы высокочастотных бесконтактных кондуктометров . . . . .	226
§ 25.6. Интегральный метод измерения электрической проводимости . . . . .	227

<b>Глава 26. Потенциометрический метод анализа . . . . .</b>	<b>229</b>
§ 26.1. Физико-химические основы метода . . . . .	229
§ 26.2. Измерительная ячейка для потенциометрических изме- рений . . . . .	233
§ 26.3. Приборы для потенциометрических измерений . . . . .	238
§ 26.4. Температурная компенсация при измерении рН . . . . .	241
<b>Глава 27. Вольтамперметрия . . . . .</b>	<b>243</b>
§ 27.1. Классические полярографы . . . . .	245
§ 27.2. Полярографы переменного тока . . . . .	250
§ 27.3. Осциллографические полярографы . . . . .	255
<b>Глава 28. Диэлькометрический метод анализа . . . . .</b>	<b>256</b>
§ 28.1. Основные определения. Эквивалентные схемы замеще- ния датчика . . . . .	256
§ 28.2. Методы и приборы для измерения диэлектрических характеристик веществ . . . . .	261
<b>Глава 29. Оптические методы анализа растворов . . . . .</b>	<b>266</b>
§ 29.1. Фотоэлектрические рефрактометры . . . . .	266
§ 29.2. Абсорбционно-оптический метод . . . . .	270
§ 29.3. Люминесцентный метод . . . . .	273
§ 29.4. Поляризационно-оптические методы . . . . .	277
§ 29.5. Фотоэлектрические нефелометры и турбидиметры . . . . .	281
<b>Глава 30. Методы измерения концентрации растворов по температурной         депрессии и давлению насыщенных паров . . . . .</b>	<b>284</b>
<b>Глава 31. Радионуклидный метод анализа жидкостей . . . . .</b>	<b>286</b>
<b>Глава 32. Измерение плотности жидкостей . . . . .</b>	<b>290</b>
§ 32.1. Поплавковые плотномеры . . . . .	291
§ 32.2. Весовые плотномеры . . . . .	293
§ 32.3. Гидростатические плотномеры . . . . .	296
§ 32.4. Вибрационные плотномеры . . . . .	297
§ 32.5. Радионуклидные плотномеры . . . . .	300
<b>Глава 33. Измерение вязкости . . . . .</b>	<b>302</b>
§ 33.1. Вискозиметры истечения (капиллярные вискозиметры)	303
§ 33.2. Вискозиметры с падающим шариком . . . . .	304
§ 33.3. Ротационные вискозиметры . . . . .	305
§ 33.4. Вибрационные вискозиметры . . . . .	307
<b>Глава 34. Автоматическое титрование . . . . .</b>	<b>310</b>
§ 34.1. Основные определения, классификация и характери- стика методов титрования . . . . .	310
§ 34.2. Автоматические объемные титрометры . . . . .	319
<b>Глава 35. Оптико-абсорбционный метод анализа газов . . . . .</b>	<b>321</b>
§ 35.1. Физические основы метода . . . . .	321
§ 35.2. Газоанализаторы инфракрасного поглощения . . . . .	324
§ 35.3. Газоанализаторы ультрафиолетового поглощения . . . . .	329
<b>Глава 36. Термокондуктометрические газоанализаторы . . . . .</b>	<b>331</b>
<b>Глава 37. Термомагнитные газоанализаторы . . . . .</b>	<b>335</b>
	<b>423</b>

<b>Глава 38. Пневматические газоанализаторы . . . . .</b>	<b>338</b>
§ 38.1. Дроссельные газоанализаторы . . . . .	339
§ 38.2. Струйные газоанализаторы . . . . .	342
<b>Глава 39. Электрохимические газоанализаторы . . . . .</b>	<b>343</b>
§ 39.1. Кондуктометрические газоанализаторы . . . . .	343
§ 39.2. Кулонометрические газоанализаторы . . . . .	345
§ 39.3. Полярграфические газоанализаторы . . . . .	349
<b>Глава 40. Методы определения микроконцентрации токсичных и взрыво- опасных газов . . . . .</b>	<b>352</b>
§ 40.1. Термохимические газоанализаторы . . . . .	353
§ 40.2. Пламенно-ионизационные газоанализаторы . . . . .	356
§ 40.3. Аэрозольно-ионизационные газоанализаторы . . . . .	358
§ 40.4. Фотоколориметрические газоанализаторы . . . . .	361
<b>Глава 41. Масс-спектрометрический метод анализа состава газов . . . . .</b>	<b>363</b>
§ 41.1. Масс-спектрометр с разделением ионов в магнитном поле . . . . .	364
§ 41.2. Времяпролетный масс-спектрометр . . . . .	366
<b>Глава 42. Хроматографический метод анализа . . . . .</b>	<b>368</b>
§ 42.1. Общие сведения. Физические основы метода . . . . .	368
§ 42.2. Газовый хроматограф и его основные элементы . . . . .	375
<b>Глава 43. Автоматизированные и автоматические системы контроля . . . . .</b>	<b>383</b>

## Раздел восьмой

### ВЛАГОМЕРЫ ДЛЯ ГАЗОВ И СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

<b>Глава 44. Методы и приборы (гигрометры) для измерения влажности газов . . . . .</b>	<b>393</b>
§ 44.1. Психрометрический метод . . . . .	394
§ 44.2. Метод точки росы . . . . .	396
§ 44.3. Сорбционные методы . . . . .	397
<b>Глава 45. Методы и приборы для измерения влажности твердых тел . . . . .</b>	<b>401</b>
§ 45.1. Кондуктометрический метод . . . . .	403
§ 45.2. Диэлектрический метод . . . . .	404
§ 45.3. Сверхвысокочастотный метод . . . . .	407
§ 45.4. Оптический метод . . . . .	409
§ 45.5. Метод ядерного магнитного резонанса . . . . .	412
§ 45.6. Термовакuumный и теплофизический методы . . . . .	413
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>415</b>
<b>Предметный указатель . . . . .</b>	<b>416</b>