



КАЗАНСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

50 ЛЕТ ДВИЖЕНИЯ
ВПЕРЕД

В.Ф. НОВИКОВ, А.А. КАРТАШОВА, А.В. ТАНЕЕВА

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА

В трех частях

Часть III

**ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ**



Казань 2018

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В.Ф. НОВИКОВ, А.А. КАРТАШОВА, А.В. ТАНЕЕВА

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА

В трех частях

Часть III

ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Монография

Под редакцией профессора В.Ф. Новикова

Казань
2018

УДК 614.543.3
ББК 20.1:24.4
Н99



Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда
фундаментальных исследований по проекту 18-18-00036 Д.
Издания РФФИ не подлежат продаже

Рецензенты:

д-р хим. наук, профессор Казанского государственного
архитектурно-строительного университета Л.И. Лаптева;
д-р хим. наук, профессор Казанского национального
исследовательского технологического университета Р.А. Юсупов;
д-р техн. наук, профессор Казанского государственного
энергетического университета В.К. Ильин

Н99 **Новиков В.Ф., Карташова А.А., Танеева А.В.**

Инструментальные методы анализа. В трех ч. Ч. III. Газохро-
мографический контроль производственных процессов в энергетике:
монография / В.Ф. Новиков, А.А. Карташова, А.В. Танеева; под ред.
проф. В.Ф. Новикова. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. – 328 с.

ISBN 978-5-89873-530-2

Рассмотрены теоретические основы газохромографического разделения сорбатов и приведены физико-химические свойства наиболее распространенных сорбентов. Большое внимание уделяется использованию газохромографических методов для диагностики маслonaполненного электрооборудования энергетических установок. Приведены сведения о технических характеристиках силовых трансформаторов и дефектов, возникающих в процессе их эксплуатации.

Предназначена для широкого круга специалистов энергетических предприятий, студентов и аспирантов, использующих газохромографические методы анализа для контроля технологических процессов в заводских лабораториях, а также для проведения научно-исследовательских работ.

УДК 614.543.3
ББК 20.1:24.4

ISBN 978-5-89873-530-2

© Новиков В.Ф., Карташова А.А., Танеева А.В., 2018
© Казанский государственный энергетический
университет, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Введение	7
Глава 1. Основы теории газовой хроматографии	12
1.1. Классификация хроматографических методов анализа	12
1.2. Физико-химические основы процесса хроматографического разделения	17
1.2.1. Сорбционные процессы в газовой хроматографии.....	20
1.2.2. Понятие о теоретической тарелке.....	24
1.3. Элюационные характеристики удерживания сорбатов	30
1.3.1. Абсолютные характеристики удержания.....	34
1.3.2. Относительные характеристики удержания.....	36
1.4. Селективность неподвижных жидких фаз	37
1.5. Полярность неподвижных жидких фаз	42
1.5.1. Оценка неподвижных фаз на основе условной хроматографи- ческой полярности.....	42
1.5.2. Оценка неподвижных фаз на основе треугольной системы координат.....	43
1.5.3. Оценка неподвижных жидких фаз на основе трехмерного пространства.....	52
1.5.4. Оценка неподвижных фаз на основе пятимерного прост- ранства.....	58
1.5.5. Термодинамическая оценка полярности и селективности неподвижных фаз.....	60
1.5.6. Влияние температуры на селективные свойства сорбентов....	67
1.6. Газохроматографическая идентификация анализируемых веществ....	68
1.6.1. Индивидуальная идентификация анализируемых веществ.....	69
1.6.2. Групповая идентификация анализируемых веществ.....	69
1.6.3. Многоступенчатые методы идентификации.....	72
1.6.4. Идентификация на основе химических превращений вещества...	73
Глава 2. Сорбенты и твердые носители для газовой хроматографии....	76
2.1. Твердые носители для газовой хроматографии.....	76
2.1.1. Диатомитовые твердые носители.....	76
2.1.2. Полимерные твердые носители.....	78
2.1.3. Пористые стекла.....	78

2.2. Сорбенты для газовой хроматографии.....	79
2.3. Адсорбенты для газовой хроматографии.....	80
2.3.1. Активированный уголь.....	82
2.3.2. Силикагели.....	86
2.3.3. Порасил В и С.....	89
2.3.4. Хромосил 310 и 330.....	89
2.3.5. Оксид алюминия.....	89
2.3.6. Графитированная термическая сажа.....	90
2.3.7. Молекулярные сита (цеолиты).....	92
2.3.8. Пористые полимерные сорбенты.....	98
2.3.9. Органические сорбенты.....	116
2.3.10. Способы приготовления сорбентов.....	125
Глава 3. Анализ равновесного пара.....	127
3.1. Характерные особенности анализа равновесного пара.....	127
3.2. Теоретические основы анализа равновесного пара.....	128
3.3. Определение коэффициентов распределения вещества в системе парофазного анализа жидкость-газ.....	133
3.4. Статический вариант анализа равновесного пара.....	137
3.5. Динамические варианты анализа равновесного пара.....	143
3.6. Способы повышения чувствительности анализа равновесного пара...	146
3.7. Дозирование равновесной паровой фазы в хроматограф.....	148
3.8. Диагностика маслонаполненного электрооборудования с использованием анализа равновесной паровой фазы.....	151
3.8.1. Основные сведения о силовых трансформаторах.....	152
3.8.2. Системы охлаждения силовых трансформаторов.....	155
3.8.3. Основные характеристики трансформаторного масла.....	160
3.8.4. Очистка и сушка трансформаторного масла.....	165
3.8.5. Старение изоляции силовых трансформаторов.....	168
3.8.6. Контроль технического состояния силовых трансформаторов...	171
3.8.7. Оценка технического состояния силовых трансформаторов...	175
3.9. Диагностика технического состояния силовых трансформаторов методом анализа равновесного пара.....	182
3.9.1. Обработка результатов хроматографического анализа газов, растворенных в масле.....	206
3.9.2. Пример определения градуировочной характеристики хроматографического комплекса и ее метрологических параметров по C_2H_4 ...	211

3.9.3. Пример обработки результатов анализа растворенных в масле газов.....	215
3.9.4. Определение фурановых соединений в трансформаторном масле методом тонкослойной хроматографии.....	217
3.9.5. Определение ионола в трансформаторном масле методом тонкослойной хроматографии.....	222
3.9.6. Определение ионола в трансформаторном масле газохроматографическими методами.....	225
3.9.7. Определение фурановых соединений в трансформаторном масле газохроматографическими методами.....	228
Глава 4. Количественный газохроматографический анализ.....	231
4.1. Основные методы количественных расчетов.....	233
4.1.1. Метод абсолютной градуировки.....	233
4.1.2. Метод внутренней нормализации.....	234
4.1.3. Метод внутреннего стандарта.....	235
4.1.4. Метод контролируемого внутреннего стандарта.....	236
4.1.5. Метод двойного внутреннего стандарта.....	236
4.1.6. Метод добавки.....	237
4.1.7. Метод двойной добавки.....	237
4.1.8. Метод с асинхронным вводом пробы.....	237
4.1.9. Градуировочный коэффициент.....	239
Глава 5. Газохроматографическая аппаратура.....	241
5.1. Устройство газового хроматографа.....	241
5.1.1. Газовая схема хроматографа с детектором по теплопроводности.....	243
5.1.2. Газовая схема хроматографа с двумя детекторами.....	244
5.1.3. Газовая схема с двумя параллельными хроматографическими колонками.....	247
5.1.4. Газовая схема с двумя последовательно соединенными хроматографическими колонками.....	249
5.1.5. Газовая схема с задерживающей хроматографической колонкой.....	250
5.1.6. Газовая схема хроматографа с обратной продувкой с двумя колонками.....	253
5.1.7. Газовая схема хроматографа с обратной продувкой с одной колонкой.....	253

5.1.8. Газовая схема хроматографа с полуобратной продувкой.....	255
5.1.9. Газовая схема хроматографа с параллельной продувкой.....	257
5.1.10. Газовая схема хроматографа с параллельной и полуобратной продувкой.....	257
5.2. Аналитический модуль хроматографа.....	258
5.2.1. Термостат хроматографических колонок.....	258
5.2.2. Очистка газа-носителя.....	262
5.2.3. Регулятор давления газа-носителя.....	264
5.2.4. Регулирование и измерение расхода газа-носителя.....	266
Приложение 1. Хроматографические растворители	271
Приложение 2. Шкала полярности растворителей по Гильдебранту.....	276
Приложение 3. Жидкие диэлектрики в энергетике	278
Приложение 4. Диагностика развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле	287
Библиографический список	301