

**Руководство по ионселективным  
электродам perfectION™**

**perfectION™**

**комбинированный йод-  
селективный электрод**

Успешное ионселективное  
измерение



**METTLER TOLEDO**

## Оглавление

<b>1. Введение</b>	<b>1</b>
<b>2. Необходимое оборудование</b>	<b>3</b>
<b>3. Подготовка к измерениям</b>	<b>4</b>
Подготовка электрода	4
Проверка функционирования электрода (крутизна)	6
Требования к пробам	7
Рекомендации по выполнению измерений	8
Хранение и техническое обслуживание электрода	10
Последовательное разбавление	13
<b>4. Аналитические методы</b>	<b>14</b>
Метод прямой калибровки	15
Метод прямой калибровки с малыми объемами растворов	19
Метод стандартных добавок	22
<b>5. Характеристики электрода</b>	<b>29</b>
Выходной сигнал электрода	29
Повторяемость	29
Влияние температуры	30
Мешающие ионы	31
Пределы чувствительности	32
Комплексообразование	32
Теория работы	33
<b>6. Устранение неисправностей</b>	<b>35</b>
Перечень контрольных операций при поиске неисправностей	37
<b>7. Информация для заказа</b>	<b>39</b>
<b>8. Технические характеристики электрода</b>	<b>41</b>

Введение

Необходимое  
оборудованиеПодготовка к  
измерениямАналитические  
методыХарактеристики  
электродаУстранение  
неисправностейИнформация  
для заказаТехнические  
характеристики  
электрода



## 1. Введение

Настоящее руководство пользователя содержит указания по подготовке к работе, эксплуатации и техническому обслуживанию йод-селективного электрода (ИСЭ). Кроме того, руководство содержит описания общих аналитических процедур, характеристики электрода и описание теории его работы. Йод-селективные электроды обеспечивают простоту, высокую скорость, точность и экономичность измерений концентрации свободных йодид-ионов в водных растворах.

### **Комбинированный йод-селективный электрод perfectION™**

Измерительный электрод и электрод сравнения конструктивно объединены в один электрод, что позволяет уменьшить необходимый объем пробы и снизить количество отходов. Встроенная диафрагма системы сравнения Click & Clear™ устойчива к загрязнению и обеспечивает высокую скорость установления и стабильность показаний.

Комбинированный йод-селективный электрод perfectION™ выпускается в модификациях с разъемом BNC (номер заказа 51344718) и разъемом Lemo (номер заказа 51344818) для подключения к титраторам METTLER TOLEDO.



## 2. Необходимое оборудование

1. Иономер METTLER TOLEDO, например, настольный измеритель SevenMulti™, или портативный измеритель SevenGo pro™, или титратор METTLER TOLEDO, например Тх (Т50, Т70, Т90) из серии Excellence или G20 из серии Compact

Комбинированные ИСЭ METTLER TOLEDO можно использовать совместно с любым иономером, имеющим разъем типа BNC.

2. Комбинированный йод-селективный электрод perfection™
3. Мешалка
4. Мерные колбы, мерные цилиндры, стаканы и пипетки. Для измерений в нижнем диапазоне концентраций потребуются пластиковые лабораторные принадлежности.
5. Дистиллированная или деионизированная вода
6. Раствор для заполнения электрода сравнения Ion Electrolyte D (номер заказа 51344753)
7. Стандартный йодидный раствор 1 000 мг/л (номер заказа 51344776)

Свежие йодидные стандарты необходимо готовить один раз в неделю и хранить их в пластиковых бутылках. Слабоконцентрированные йодидные стандарты, используемые для калибровки, следует готовить ежедневно.

8. Регулятор ионной силы (ISA) для твердотельных ион-селективных электродов (номер заказа 51344760). Используется для выравнивания ионной силы проб и стандартов.

### 3. Подготовка к измерениям

#### Подготовка электрода

Снимите защитный транспортировочный колпачок с чувствительного элемента. Сохраните защитный колпачок. Залейте в электрод электролит Ion Electrolyte D.

#### Заливка электролита:

1. Установите колпачок с откидным носиком на бутылку с раствором для заполнения электрода и поднимите носик колпачка в вертикальное положение.
2. Введите носик в заливочное отверстие в наружном корпусе электрода и залейте небольшое количество раствора в камеру сравнения электрода. Переверните электрод, чтобы смочить кольцевое уплотнение, затем верните его в нормальное положение.
3. Удерживая электрод за корпус одной рукой, нажмите большим пальцем на колпачок электрода, чтобы слить несколько капель электролита.
4. Отпустите колпачок электрода. Если гильза не возвращается в исходное положение, убедитесь в том, что кольцевое уплотнение смочено раствором, и повторите действия п. 2–4.
5. Залейте электролит до уровня заливочного отверстия.

**Примечание:** доливку электролита следует производить каждый день перед началом использования электрода. Для обеспечения требуемого расхода электролита его уровень в электроде должен не менее чем на 2,5 см превышать уровень пробы в стакане. Заливочное отверстие в процессе выполнения измерений должно быть всегда открыто.



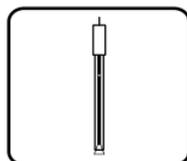
**Рис. 1.** Комбинированный йод-селективный электрод *perfectION™*

## Проверка функционирования электрода (крутизна)

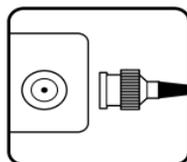
Описанную ниже процедуру можно использовать с большинством моделей измерителей для проверки функционирования электрода.

Описанная ниже процедура используется для измерения крутизны электрода. Крутизна определяется как изменение потенциала в милливольтх, соответствующее десятикратному изменению концентрации. Измерение крутизны — это лучший способ проверки функционирования электрода.

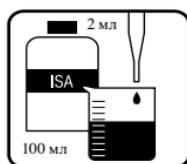
- 
1. Если электрод хранился в сухом состоянии, выполните операции, описанные в разделе **«Подготовка электрода»**.



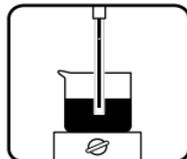
- 
2. Подключите электрод к анализатору, позволяющему измерять потенциал. Включите анализатор в режим измерения потенциала.



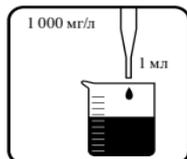
- 
3. Залейте 100 мл дистиллированной воды и 2 мл регулятора ионной силы в стакан емкостью 150 мл. Тщательно перемешайте раствор.



- 
4. Ополосните электрод дистиллированной водой и погрузите его в раствор, приготовленный на шаге 3.



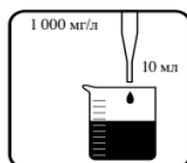
- 
5. Выберите стандартный йодидный раствор с концентрацией 0,1 моль/л или 1000 мг/л. С помощью пипетки введите 1 мл стандарта в стакан и тщательно перемешайте раствор. После установления показаний запишите



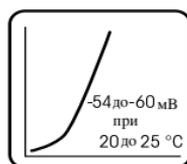
измеренную величину электродного потенциала в милливольтгах.

---

6. С помощью пипетки введите 10 мл того же стандарта в тот же стакан и тщательно перемешайте раствор. После установления показаний запишите измеренную величину электродного потенциала в милливольтгах.



7. В диапазоне температур раствора от 20 до 25°C разность двух измеренных значений потенциала должна лежать в пределах от -54 до -60 мВ. Если разность значений потенциала выходит за пределы этого диапазона, см. раздел **«Устранение неисправностей»**.



## Требования к пробам

Корпус йод-селективного электрода из эпоксидного пластика устойчив к воздействию водных растворов. Электрод допускается использовать для работы в повторно-кратковременном режиме в растворах, содержащих метанол, бензол или ацетон.

Пробы и стандарты должны иметь одну и ту же температуру. Разность температур в 1°C для йодидных растворов с концентрацией  $10^{-3}$  моль/л приведет к возникновению погрешности приблизительно в 2%. Температура пробы не должна превышать 80 С.

Перед выполнением измерений во все пробы и стандарты необходимо добавлять регулятор ионной силы.

## Рекомендации по выполнению измерений

Концентрация йодида может быть выражена в молях на литр (моль/л), миллиграммах на литр (мг/л) или любых других единицах концентрации.

**Таблица 1.** Коэффициенты пересчета единиц измерения концентрации йодида

моль/л	мг/л в пересчете на йодид-ион (I <sup>-</sup> )
1,0	126 900
10 <sup>-1</sup>	12 690
10 <sup>-2</sup>	1 269
7,88 x 10 <sup>-3</sup>	1 000
10 <sup>-3</sup>	126,9
10 <sup>-4</sup>	12,69
7,88 x 10 <sup>-6</sup>	1

- Перемешивание всех стандартов и проб следует выполнять с одинаковой умеренной скоростью. Для исключения погрешностей измерения, связанных с передачей тепла от магнитной мешалки к перемешиваемому раствору, подложите под стакан прокладку из картона или пенополистирола.
- Для выполнения калибровки используйте только свежеприготовленные стандартные растворы.
- Перед тем, как перенести электрод из одного раствора в другой, промойте его дистиллированной водой, а затем встряхните, чтобы исключить перекрестное загрязнение проб. Не протирайте чувствительный элемент электрода.

- Для достижения максимальной точности измерений все пробы и стандарты должны иметь одну и ту же температуру.
- Концентрированные пробы (с концентрацией йодид-ионов свыше  $10^{-1}$  моль/л) перед измерением следует разбавить.
- Проверяйте калибровку электрода через каждые два часа, помещая его в свежую аликвоту стандарта с наименьшей концентрацией, используемого для калибровки. Если изменение показаний превышает 2%, следует повторить процедуру калибровки электрода.
- Если при погружении электрода в раствор на поверхности чувствительного элемента образуются воздушные пузырьки, извлеките электрод из раствора и снова погрузите его, осторожно постукивая по корпусу электрода.
- Для проб с высокой ионной силой следует подготовить стандарты с фоновым составом, аналогичным составу пробы.
- Для обеспечения равномерного расхода электролита электрода сравнения заливочное отверстие в процессе выполнения измерений должно оставаться открытым.
- После измерения загрязненных или вязких проб либо при увеличении времени установления показаний полностью слейте электролит из электрода и промойте открытую диафрагму дистиллированной водой. Удалите остатки воды из электрода и залейте в него свежий электролит. Нажмите на колпачок электрода, чтобы слить несколько капель электролита, затем восполните потерю раствора.
- Начните выполнение калибровки или измерения со стандарта или пробы с минимальной концентрацией.

## Хранение и техническое обслуживание электрода

### Хранение электрода

В перерывах между измерениями продолжительностью до одной недели электрод следует держать в растворе хлористого калия с концентрацией 4 моль/л с добавлением йодидного стандарта. Концентрация йодид-ионов в растворе для хранения электрода должна приблизительно соответствовать наименее концентрированному стандарту, используемому для калибровки. В этот раствор не следует добавлять регулятор ионной силы. Электролит внутри электрода не должен испаряться, поскольку это приведет к кристаллизации.

Если предполагаемый срок хранения превышает одну неделю, слейте из электрода электролит, промойте камеру электрода сравнения дистиллированной водой и храните электрод в сухом состоянии, установив защитный транспортировочный колпачок на чувствительный элемент.

### Полировка комбинированного иод-селективного электрода

Чувствительная поверхность твердотельных электродов со временем подвергается износу, признаками которого являются дрейф, плохая повторяемость результатов и потеря чувствительности при измерении проб с низкими значениями концентрации. Для восстановления характеристик электрода следует отполировать чувствительную поверхность с помощью полировальной ленты. Полировальную ленту можно также использовать в случае эрозии или химического отравления чувствительной поверхности.

1. Отрежьте приблизительно 2,5 см полировальной ленты.
2. Удерживайте электрод чувствительной поверхностью вверх.
3. Нанесите несколько капель дистиллированной воды на чувствительную поверхность.
4. Поместите на чувствительную поверхность отрезок полировальной ленты рабочей стороной вниз и слегка прижмите его пальцем.

5. Вращайте электрод в течение приблизительно 30 с.
6. Ополосните электрод дистиллированной водой и выдержите в стандартном йодидном растворе 1 мг/л или  $10^{-5}$  моль/л в течение 10 мин.

### **Промывка комбинированного йод-селективного электрода**

При наличии загрязнений или отложений в области между гильзой наружного корпуса и внутренним конусом электрода промойте это место электролитом или дистиллированной водой.

1. Удерживая электрод одной рукой за корпус, нажмите большим пальцем на колпачок электрода, чтобы слить весь электролит.
2. Залейте в электрод дистиллированную воду, затем полностью слейте ее, нажав большим пальцем на колпачок электрода.
3. Залейте свежий электролит до уровня заливочного отверстия электрода. Нажмите на колпачок электрода, чтобы слить несколько капель электролита, затем восполните потерю раствора.

## Порядок разборки и сборки комбинированного йод-селективного электрода

*Примечание: разборка электрода может потребоваться только при необходимости тщательной очистки*

1. Наклоните электрод, чтобы электролит смочил кольцевое уплотнение на корпусе электрода. Удерживая электрод одной рукой за корпус, нажмите большим пальцем на колпачок электрода, чтобы слить весь электролит.
2. Отверните колпачок, вращая его против часовой стрелки, затем сдвиньте колпачок и пружину вниз по кабелю электрода.
3. Удерживая наружный корпус электрода одной рукой, с усилием нажмите большим и указательным пальцами на резьбовую часть, чтобы отсоединить внутренний корпус от наружного.
4. Захватите внутренний конус чистой безворсовой салфеткой и, осторожно поворачивая из стороны в сторону, извлеките его из наружного корпуса. Не прикасайтесь к грануле, установленной над конусом, чтобы не повредить ее. Промойте дистиллированной водой наружную поверхность внутреннего корпуса электрода и наружный корпус целиком. Просушите все элементы на воздухе.
5. Смочите кольцевое уплотнение на корпусе электрода каплей электролита. Вставьте внутренний корпус электрода резьбовой частью вперед в наружный корпус со стороны, имеющей конусную фаску и притертую поверхность.
6. Осторожно поворачивая из стороны в сторону внутренний корпус, введите его в наружный корпус таким образом, чтобы торцы обоих корпусов оказались заподлицо.
7. Установите пружину на корпус электрода и заверните колпачок. Залейте в электрод электролит.

## Последовательное разбавление

Последовательное разбавление — это лучший метод приготовления стандартных растворов.

Последовательное разбавление предполагает разбавление исходного стандарта с использованием мерной стеклянной посуды для получения второго стандартного раствора. Из второго стандарта также путем разбавления приготавливают третий стандарт и так далее — до получения требуемого ряда стандартных растворов.

1. Для того чтобы приготовить стандартный йодидный раствор с концентрацией 100 мг/л: с помощью пипетки введите 10 мл стандарта 1 000 мг/л в мерную колбу емкостью 100 мл. Долейте в колбу деионизированную воду до отметки и тщательно перемешайте.
2. Для того чтобы приготовить стандартный йодидный раствор с концентрацией 10 мг/л: с помощью пипетки введите 10 мл стандарта 100 мг/л в мерную колбу емкостью 100 мл. Долейте в колбу деионизированную воду до отметки и тщательно перемешайте.
3. Для того чтобы приготовить стандартный йодидный раствор с концентрацией 1 мг/л: с помощью пипетки введите 10 мл стандарта 10 мг/л в мерную колбу емкостью 100 мл. Долейте в колбу деионизированную воду до отметки и тщательно перемешайте.

Для приготовления стандартов с другими значениями концентрации используйте следующую формулу:

$$C_1 * V_1 = C_2 * V_2$$

$C_1$  = концентрация исходного стандарта

$V_1$  = объем исходного стандарта

$C_2$  = концентрация стандарта после разбавления

$V_2$  = объем стандарта после разбавления

Например, для того чтобы приготовить 1 000 мл стандартного йодидного раствора с концентрацией 100 мг/л из стандартного раствора с концентрацией 12 690 мг/л:

$C_1$  = 12 690 мг/л

$V_1$  = неизвестный объем

$C_2$  = 100 мг/л

$V_2$  = 1 000 мл

$12\,690 \text{ мг/л} * V_1 = 1\,000 \text{ мг/л} * 100 \text{ мл}$

$V_1 = (1\,000 \text{ мг/л} * 100 \text{ мл}) / 12\,690 \text{ мг/л} = 7,9 \text{ мл}$

## 4. Аналитические методы

Разработано большое количество аналитических методов. Ниже приведено описание этих методов.

Прямая калибровка представляет собой простую процедуру, используемую для измерения большого количества проб. Для измерения каждой пробы требуется снять только одно показание измерителя. Калибровка выполняется с использованием ряда стандартов. Концентрация проб определяется путем сравнения со стандартами. Для того чтобы обеспечить равенство ионной силы проб и стандартов, ко всем растворам добавляют регулятор ионной силы.

Инкрементные методы измерения проб удобны тем, что не требуют калибровки. Ниже описаны различные инкрементные методы измерения. Их можно использовать для измерения общей концентрации определенного иона при многократно (от 50 до 100 раз) превышающих концентрациях комплексообразователей. Как и в методе прямой калибровки, концентрация может быть выражена в любых удобных единицах.

- Метод стандартных добавок полезен при измерении разбавленных проб, проверке результатов прямой калибровки (в отсутствие комплексообразователей) или при измерении общей концентрации иона в условиях превышающей концентрации комплексообразователей. Электрод погружают в раствор пробы, затем добавляют к пробе аликвоту стандартного раствора, содержащего определяемые частицы. По разности значений потенциала, измеренных до и после добавления, определяют концентрацию иона в исходной пробе.

## Метод прямой калибровки

### Типичная кривая прямой калибровки

При использовании метода прямой калибровки калибровочная кривая либо хранится в памяти измерителя, либо строится на бумаге с полулогарифмической масштабной сеткой. Измеренные значения электродных потенциалов стандартных растворов откладываются в линейном масштабе от оси концентраций, имеющей логарифмический масштаб. На линейных участках для определения калибровочной кривой достаточно двух стандартов. Для определения нелинейных участков требуется большее количество точек. Описанные ниже процедуры прямой калибровки приводятся для диапазона концентраций, соответствующего линейному участку электродной характеристики. Процедуры измерения в области низких концентраций, соответствующих нелинейному участку электродной характеристики, описаны в следующем разделе.

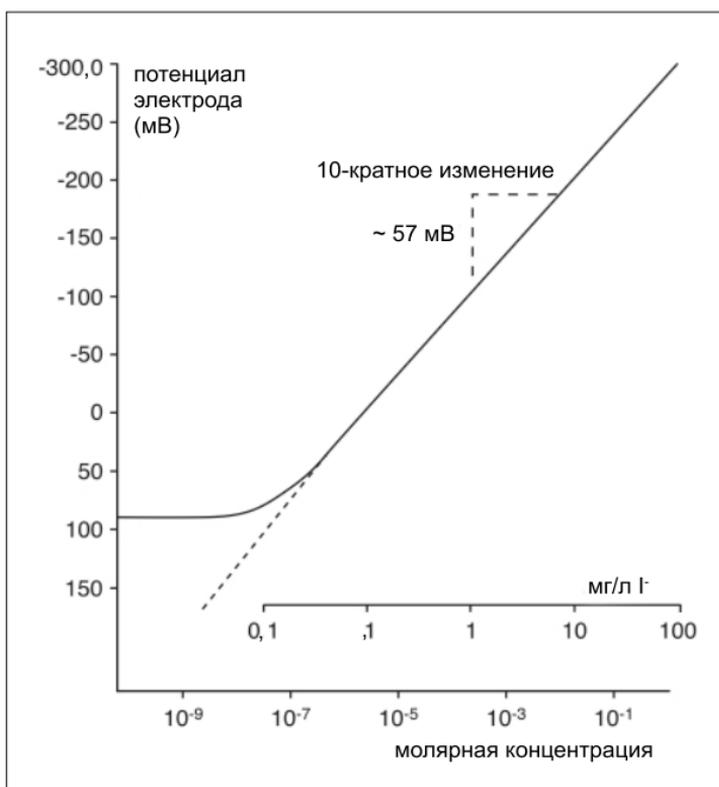


Рис. 2. Типичная кривая прямой калибровки

## Обзор метода прямой калибровки

Описанные ниже процедуры прямого измерения рекомендуется использовать в диапазонах низкой, умеренной и высокой концентрации. Концентрация йодид-иона в пробах должна быть выше  $5 \times 10^{-8}$  моль/л — т.е. соответствовать линейному участку характеристики электрода. В этом случае достаточно выполнить калибровку в двух точках, но можно использовать и большее количество точек. При использовании иономера значения концентрации можно считывать непосредственно с индикатора прибора. При работе с измерителем потенциала можно использовать калибровочную кривую, построенную на бумаге с полулогарифмической сеткой, либо ПО для вычисления линейной регрессии (относительно логарифмических значений концентрации) в табличном или графическом виде.

### Рекомендации по выполнению калибровки

- Используемые для калибровки стандарты должны охватывать весь диапазон ожидаемых концентраций в измеряемых пробах.
- Всегда добавляйте по 2 мл регулятора ионной силы на 100 мл стандарта или пробы.
- Для проб с высокой ионной силой (0,1 моль/л и выше) следует подготовить стандарты с фоновым составом, аналогичным составу проб, либо использовать измерение методом стандартных добавок.
- В процессе калибровки начинать следует со стандарта с наименьшей концентрацией, последовательно переходя к стандартам с более высокой концентрацией.

### Подготовка к проведению прямой калибровки

1. Подготовьте электрод согласно указаниям раздела «Подготовка электрода».
2. Подключите электрод к анализатору.
3. Подготовьте не менее двух стандартов, различающихся по концентрации на порядок и охватывающих весь диапазон ожидаемых концентраций в измеряемых пробах. При подготовке стандартов можно использовать любые единицы

измерения концентрации, требуемые по условиям измерений. Указания по подготовке стандартов см. в разделе «Последовательное разбавление». Все пробы и стандарты должны иметь одну и ту же температуру. Сведения о зависимости характеристик электрода от температуры см. в разделе «Влияние температуры».

### **Порядок выполнения прямой калибровки с использованием иономера**

**Примечание:** *дополнительные сведения см. в руководстве по эксплуатации измерительного прибора.*

1. Залейте 100 мл наименее концентрированного стандарта в стакан емкостью 150 мл, добавьте 2 мл регулятора ионной силы и тщательно перемешайте.
2. Ополосните электрод дистиллированной водой, тщательно просушите салфеткой и поместите в стакан с наименее концентрированным стандартом. После установления показаний отрегулируйте измеритель согласно указаниям руководства по эксплуатации таким образом, чтобы его показания соответствовали номинальной концентрации стандарта.
3. Залейте 100 мл более концентрированного стандарта во второй стакан емкостью 150 мл, добавьте 2 мл регулятора ионной силы и тщательно перемешайте.
4. Ополосните электрод дистиллированной водой, тщательно просушите салфеткой и поместите в стакан с более концентрированным стандартом. После установления показаний отрегулируйте измеритель согласно указаниям руководства по эксплуатации таким образом, чтобы его показания соответствовали номинальной концентрации второго стандарта.
5. Запишите результирующую величину крутизны. При температурах стандартов от 20 до 25°C крутизна должна лежать в пределах от -54 до -60 мВ.
6. Залейте 100 мл пробы в чистый стакан емкостью 150 мл, добавьте 2 мл регулятора ионной силы и тщательно перемешайте.
7. Ополосните электрод дистиллированной водой, тщательно просушите салфеткой и поместите в стакан с пробой. Считайте значение концентрации пробы на дисплее измерителя.

**Примечание:** *допускается использовать другие объемы растворов, сохраняя пропорцию между объемами раствора и регулятора ионной силы 50:1.*

## Порядок выполнения прямой калибровки с использованием измерителя потенциала

**Примечание:** дополнительные сведения см. в руководстве по эксплуатации измерительного прибора.

1. Включите анализатор в режим измерения потенциала.
2. Залейте 100 мл наименее концентрированного стандарта в стакан емкостью 150 мл, добавьте 2 мл регулятора ионной силы и тщательно перемешайте.
3. Ополосните электрод дистиллированной водой, тщательно просушите салфеткой и поместите в стакан с наименее концентрированным стандартом. После установления показаний запишите результат измерения в милливольтх и соответствующее значение концентрации.
4. Залейте 100 мл более концентрированного стандарта во второй стакан емкостью 150 мл, добавьте 2 мл регулятора ионной силы и тщательно перемешайте.
5. Ополосните электрод дистиллированной водой, тщательно просушите салфеткой и поместите в стакан с более концентрированным стандартом. После установления показаний запишите результат измерения в милливольтх и соответствующее значение концентрации.
6. Постройте калибровочную кривую на бумаге с полулогарифмической сеткой, откладывая измеренные значения электродных потенциалов в линейном масштабе от оси концентраций, имеющей логарифмический масштаб.
7. Залейте 100 мл пробы в чистый стакан емкостью 150 мл, добавьте 2 мл регулятора ионной силы и тщательно перемешайте.
8. Ополосните электрод дистиллированной водой, тщательно просушите салфеткой и поместите в стакан. После установления показаний запишите измеренную величину потенциала в милливольтх.
9. По калибровочной кривой, построенной на шаге 6, определите неизвестную величину концентрации пробы.

**Примечание:** допускается использовать другие объемы растворов, сохраняя пропорцию между объемами раствора и регулятора ионной силы 50:1.

## Метод прямой калибровки с малыми объемами растворов

В процессе решения своих аналитических задач используйте преимущества, которые обеспечивает особая конструкция комбинированного йод-селективного электрода perfectION™. Благодаря запатентованной конструкции системы сравнения Click & Clear™, этот электрод позволяет работать с пробами, объем которых не превышает 5 мл, используя модифицированный метод прямого измерения. Уменьшение необходимого объема раствора позволяет сократить расход стандартных йодидных растворов и регулятора ионной силы. Концентрация йодид-иона в пробах должна быть выше  $5 \times 10^{-8}$  моль/л. В этом случае достаточно выполнить калибровку в двух точках, но можно использовать и большее количество точек. В описанной ниже процедуре рекомендуется использовать пробы объемом 25 мл. Допускается использовать пробы меньшего объема при условии, что в процессе измерения раствор полностью покрывает торец электрода.

### Рекомендации по выполнению калибровки

- Используемые для калибровки стандарты должны охватывать весь диапазон ожидаемых концентраций в измеряемых пробах.
- Всегда добавляйте к стандартам и пробам регулятор ионной силы в пропорции 50:1.
- Для проб с высокой ионной силой (0,1 моль/л и выше) следует подготовить стандарты с фоновым составом, аналогичным составу проб, либо использовать измерение методом стандартных добавок.
- В процессе калибровки начинать следует со стандарта с наименьшей концентрацией, последовательно переходя к стандартам с более высокой концентрацией.
- Объем стандарта, используемого для калибровки, должен быть равен объему измеряемых проб.

## Подготовка к проведению прямой калибровки с малыми объемами растворов

1. Подготовьте электрод согласно указаниям раздела «Подготовка электрода».
2. Подключите электрод к анализатору.
3. Подготовьте не менее двух стандартов, различающихся по концентрации на порядок и охватывающих весь диапазон ожидаемых концентраций в измеряемых пробах. При подготовке стандартов можно использовать любые единицы измерения концентрации, требуемые по условиям измерений. Указания по подготовке стандартов см. в разделе «Последовательное разбавление». Все пробы и стандарты должны иметь одну и ту же температуру. Сведения о зависимости характеристик электрода от температуры см. в разделе «Влияние температуры».

## Порядок выполнения прямой калибровки с малыми объемами с использованием иономера

*Примечание: дополнительные сведения см. в руководстве по эксплуатации измерительного прибора.*

1. Залейте 25 мл наименее концентрированного стандарта в стакан емкостью 50 мл, добавьте 0,5 мл регулятора ионной силы и встряхните стакан, чтобы перемешать раствор.
2. Ополосните электрод дистиллированной водой, тщательно просушите салфеткой и поместите в стакан с наименее концентрированным стандартом. После установления показаний отрегулируйте измеритель согласно указаниям руководства по эксплуатации таким образом, чтобы его показания соответствовали номинальной концентрации стандарта.
3. Залейте 25 мл более концентрированного стандарта во второй стакан емкостью 50 мл, добавьте 0,5 мл регулятора ионной силы и встряхните стакан, чтобы перемешать раствор.
4. Ополосните электрод дистиллированной водой, тщательно просушите салфеткой и поместите в стакан с более концентрированным стандартом. После установления показаний отрегулируйте измеритель согласно указаниям руководства по эксплуатации таким образом, чтобы его показания соответствовали номинальной концентрации второго стандарта.
5. Запишите результирующую величину крутизны. При температурах стандартов от 20 до 25°C крутизна должна лежать в пределах от 25 до 30 мВ.
6. Залейте 25 мл пробы в чистый стакан емкостью 50 мл, добавьте 0,5 мл регулятора ионной силы и встряхните стакан, чтобы перемешать раствор.

7. Ополосните электрод дистиллированной водой, тщательно просушите салфеткой и поместите в стакан с пробой. Считайте значение концентрации пробы на дисплее измерителя.

**Примечание:** допускается использовать другие объемы растворов, сохраняя пропорцию между объемами раствора и регулятора ионной силы 50:1.

### **Порядок выполнения прямой калибровки с малыми объемами с использованием измерителя потенциала**

**Примечание:** дополнительные сведения см. в руководстве по эксплуатации измерительного прибора.

1. Включите анализатор в режим измерения потенциала.
2. Залейте 25 мл наименее концентрированного стандарта в стакан емкостью 50 мл, добавьте 0,5 мл регулятора ионной силы и встряхните стакан, чтобы перемешать раствор.
3. Ополосните электрод дистиллированной водой, тщательно просушите салфеткой и поместите в стакан с наименее концентрированным стандартом. После установления показаний запишите результат измерения в милливольтх и соответствующее значение концентрации.
4. Залейте 25 мл более концентрированного стандарта во второй стакан емкостью 50 мл, добавьте 0,5 мл регулятора ионной силы и встряхните стакан, чтобы перемешать раствор.
5. Ополосните электрод дистиллированной водой, тщательно просушите салфеткой и поместите в стакан с более концентрированным стандартом. После установления показаний запишите результат измерения в милливольтх и соответствующее значение концентрации.
6. Постройте калибровочную кривую на бумаге с полулогарифмической сеткой, откладывая измеренные значения электродных потенциалов в линейном масштабе от оси концентраций, имеющей логарифмический масштаб.
7. Залейте 25 мл пробы в чистый стакан емкостью 50 мл, добавьте 0,5 мл регулятора ионной силы и встряхните стакан, чтобы перемешать раствор.
8. Ополосните электрод дистиллированной водой, тщательно просушите салфеткой и поместите в стакан. После установления показаний запишите измеренную величину потенциала в милливольтх.
9. По калибровочной кривой, построенной на шаге 6, определите неизвестную величину концентрации пробы.

**Примечание:** допускается использовать другие объемы растворов, сохраняя пропорцию между объемами раствора и регулятора ионной силы 50:1.

## Метод стандартных добавок

Метод стандартных добавок удобен для измерения проб с концентрациями, соответствующими линейному участку характеристики электрода (выше 0,2 мг/л), поскольку не требует построения калибровочной кривой. Его можно использовать для проверки результатов прямой калибровки или при измерении общей концентрации иона в условиях превышающей концентрации комплексообразователей. Потенциал пробы измеряется до и после добавления стандартного раствора.

Для получения точных результатов измерений необходимо обеспечить соблюдение следующих условий:

- В результате добавления стандартного раствора концентрация должна возрастать приблизительно вдвое.
- Предполагаемая концентрация пробы должна отличаться от истинного значения не более чем в три раза.
- Комплексообразователи в растворе должны либо отсутствовать, либо присутствовать в большом избытке.
- Отношение концентраций несвязанного и связанного ионов не должно изменяться в результате добавления стандарта.
- Все пробы и стандарты должны иметь одну и ту же температуру.
- При двукратном или многократном добавлении известного, для последнего добавления необходимо использовать раствор с концентрацией, превышающей концентрацию пробы в 10-100 раз.
- Перед началом анализа добавьте по 2 мл регулятора ионной силы на каждые 100 мл пробы.

## Подготовка к измерениям с использованием метода стандартных добавок

1. Подготовьте электрод согласно указаниям раздела «Подготовка электрода».
2. Подключите электрод к анализатору.
3. Подготовьте стандартный раствор, добавление которого к раствору пробы будет приводить к удвоению концентрации йодид-иона в пробе. Используйте данные, приведенные в табл. 2.
4. Определите крутизну электрода в соответствии с указаниями раздела «Проверка функционирования электрода (крутизна)».
5. Ополосните электрод дистиллированной водой.

**Таблица 2.** Подготовка стандарта для измерения методом стандартных добавок

Объем добавляемого стандарта	Концентрация стандарта
1 мл	в 100 раз выше концентрации пробы
5 мл	в 20 раз выше концентрации пробы
10 мл*	в 10 раз выше концентрации пробы

\* Наиболее удобный для работы объем

Порядок измерения с использованием измерителя, имеющего специальный режим работы для измерений методом стандартных добавок

**Примечание:** дополнительные сведения см. в руководстве по эксплуатации измерительного прибора.

1. Включите анализатор в режим измерения методом стандартных добавок.
2. Отмерьте 100 мл пробы и 2 мл регулятора ионной силы и слейте растворы в стакан. Ополосните электрод дистиллированной водой и поместите в стакан с пробой. Тщательно перемешайте раствор.
3. После установления показаний выполните необходимые операции с измерителем согласно указаниям руководства по эксплуатации.
4. С помощью пипетки введите требуемое количество стандартного раствора в стакан с пробой. Тщательно перемешайте раствор.
5. После установления показаний запишите измеренную величину концентрации раствора пробы.

## Порядок измерения методом стандартных добавок с использованием измерителя потенциала

1. Включите анализатор в режим измерения относительного потенциала. Если измеритель не имеет такого режима, используйте режим измерения потенциала.
2. Отмерьте 100 мл пробы и 2 мл регулятора ионной силы и слейте растворы в стакан емкостью 150 мл. Тщательно перемешайте раствор.
3. Ополосните электрод дистиллированной водой, тщательно просушите салфеткой и поместите в стакан с пробой. После установления показаний установите измеритель на нуль. Если это невозможно, запишите отображаемое значение потенциала в милливольтках.
4. С помощью пипетки введите требуемое количество стандартного раствора в стакан с пробой. Тщательно перемешайте раствор.
5. После установления показаний запишите измеренную величину потенциала в милливольтках. Если измеритель не был установлен на нуль на шаге 3, рассчитайте величину  $\Delta E$  путем вычитания первого результата измерения из второго.
6. По табл. 4 определите величину  $Q$ , соответствующую изменению потенциала  $\Delta E$ . Для того чтобы определить исходную концентрацию пробы, умножьте величину  $Q$  на концентрацию добавленного стандартного раствора:

$$C_{\text{пробы}} = Q * C_{\text{стандарта}}$$

$C_{\text{стандарта}}$  = концентрация стандарта

$C_{\text{пробы}}$  = концентрация пробы

$Q$  = значение из табл. 4

Значения  $Q$ , приведенные в таблице, соответствуют изменению объема раствора на 10%. Величину  $Q$  для других значений крутизны и изменения объема можно рассчитать по следующей формуле:

$$Q = (p * r) / \{[(1 + p) * 10^{\Delta E/S}] - 1\}$$

$Q$  = значение из табл. 4

$\Delta E$  =  $E_2 - E_1$

$S$  = крутизна электрода

$p$  = объем стандарта/объем пробы и регулятора ионной силы

$r$  = объем пробы и регулятора ионной силы/объем пробы

## Использование таблиц Excel для вычисления результатов измерения методом стандартных добавок

В некоторых случаях удобно использовать электронные таблицы, подготовленные для вычисления результатов измерения методом стандартных добавок при произвольном отношении объемов пробы и добавляемого стандарта. Пример заполнения рабочего листа приведен в табл. 3. Числовые значения приведены в качестве примера, но формулы и их расположение необходимо скопировать без ошибок.

**Таблица 3.** Вычисление результатов измерения методом стандартных добавок с помощью таблиц Excel.

A	B	C
1		Введите значение
2	Объем пробы и регулятора ионной силы (мл)	102
3	Объем добавляемого стандарта (мл)	10
4	Концентрация добавляемого стандарта	10
5	Объем добавляемого стандарта	100
6	Исходное значение потенциала (мВ)	-45,3
7	Конечное значение потенциала (мВ)	-63,7
8	Крутизна электрода	-59,2
9		
10		Расчетные значения
11	Дельта E	=C7 - C6
12	Коэффициент объема раствора	=C3/C2
13	Степенной член	=10^ (C11/C8)
14	Коэффициент объема пробы	=C2/C5
15	Величина Q	=C12*C14/(((1+C12)*C13)-1)
16	Расчетное значение исходной концентрации пробы в тех же единицах, что и концентрация добавляемого стандарта.	=C15*C4

**Таблица 4.** Значения  $Q$  соответствующие изменению объема раствора на 10%; значения крутизны (в заголовках столбцов) указаны в милливольтках на декаду

$\Delta E$	Отношение концентраций $Q$			
	-57,2	-58,2	-59,2	-60,1
5,0	0,2917	0,2957	0,2996	0,3031
5,2	0,2827	0,2867	0,2906	0,2940
5,4	0,2742	0,2781	0,2820	0,2854
5,6	0,2662	0,2700	0,2738	0,2772
5,8	0,2585	0,2623	0,2660	0,2693
6,0	0,2512	0,2550	0,2586	0,2619
6,2	0,2443	0,2480	0,2516	0,2548
6,4	0,2377	0,2413	0,2449	0,2480
6,6	0,2314	0,2349	0,2384	0,2416
6,8	0,2253	0,2288	0,2323	0,2354
7,0	0,2196	0,2230	0,2264	0,2295
7,2	0,2140	0,2174	0,2208	0,2238
7,4	0,2087	0,2121	0,2154	0,2184
7,6	0,2037	0,2070	0,2102	0,2131
7,8	0,1988	0,2020	0,2052	0,2081
8,0	0,1941	0,1973	0,2005	0,2033
8,2	0,1896	0,1927	0,1959	0,1987
8,4	0,1852	0,1884	0,1914	0,1942
8,6	0,1811	0,1841	0,1872	0,1899
8,8	0,1770	0,1801	0,1831	0,1858
9,0	0,1732	0,1762	0,1791	0,1818
9,2	0,1694	0,1724	0,1753	0,1779
9,4	0,1658	0,1687	0,1716	0,1742
9,6	0,1623	0,1652	0,1680	0,1706
9,8	0,1590	0,1618	0,1646	0,1671
10,0	0,1557	0,1585	0,1613	0,1638
10,2	0,1525	0,1553	0,1580	0,1605
10,4	0,1495	0,1522	0,1549	0,1573
10,6	0,1465	0,1492	0,1519	0,1543
10,8	0,1437	0,1463	0,1490	0,1513
11,0	0,1409	0,1435	0,1461	0,1485
11,2	0,1382	0,1408	0,1434	0,1457
11,4	0,1356	0,1382	0,1407	0,1430
11,6	0,1331	0,1356	0,1381	0,1404
11,8	0,1306	0,1331	0,1356	0,1378
12,0	0,1282	0,1307	0,1331	0,1353
12,2	0,1259	0,1283	0,1308	0,1329
12,4	0,1236	0,1260	0,1284	0,1306
12,6	0,1214	0,1238	0,1262	0,1283
12,8	0,1193	0,1217	0,1240	0,1261
13,0	0,1172	0,1195	0,1219	0,1239
13,2	0,1152	0,1175	0,1198	0,1218
13,4	0,1132	0,1155	0,1178	0,1198
13,6	0,1113	0,1136	0,1158	0,1178
13,8	0,1094	0,1117	0,1139	0,1159
14,0	0,1076	0,1098	0,1120	0,1140
14,2	0,1058	0,1080	0,1102	0,1121
14,4	0,1041	0,1063	0,1084	0,1103
14,6	0,1024	0,1045	0,1067	0,1086
14,8	0,1008	0,1029	0,1050	0,1069

<b>ΔE</b>	<b>Отношение концентраций Q</b>			
	<b>-57,2</b>	<b>-58,2</b>	<b>-59,2</b>	<b>-60,1</b>
<b>15,0</b>	0,0992	0,1012	0,1033	0,1052
<b>15,5</b>	0,0953	0,0973	0,0994	0,1012
<b>16,0</b>	0,0917	0,0936	0,0956	0,0974
<b>16,5</b>	0,0882	0,0902	0,0921	0,0938
<b>17,0</b>	0,0850	0,0869	0,0887	0,0904
<b>17,5</b>	0,0819	0,0837	0,0856	0,0872
<b>18,0</b>	0,0790	0,0808	0,0825	0,0841
<b>18,5</b>	0,0762	0,0779	0,0797	0,0813
<b>19,0</b>	0,0736	0,0753	0,0770	0,0785
<b>19,5</b>	0,0711	0,0727	0,0744	0,0759
<b>20,0</b>	0,0687	0,0703	0,0719	0,0734
<b>20,5</b>	0,0664	0,0680	0,0696	0,0710
<b>21,0</b>	0,0642	0,0658	0,0673	0,0687
<b>21,5</b>	0,0621	0,0637	0,0652	0,0666
<b>22,0</b>	0,0602	0,0617	0,0631	0,0645
<b>22,5</b>	0,0583	0,0597	0,0612	0,0625
<b>23,0</b>	0,0564	0,0579	0,0593	0,0606
<b>23,5</b>	0,0547	0,0561	0,0575	0,0588
<b>24,0</b>	0,0530	0,0544	0,0558	0,0570
<b>24,5</b>	0,0514	0,0528	0,0541	0,0553
<b>25,0</b>	0,0499	0,0512	0,0525	0,0537
<b>25,5</b>	0,0484	0,0497	0,0510	0,0522
<b>26,0</b>	0,0470	0,0483	0,0495	0,0507
<b>26,5</b>	0,0456	0,0469	0,0481	0,0492
<b>27,0</b>	0,0443	0,0455	0,0468	0,0479
<b>27,5</b>	0,0431	0,0443	0,0455	0,0465
<b>28,0</b>	0,0419	0,0430	0,0442	0,0452
<b>28,5</b>	0,0407	0,0418	0,0430	0,0440
<b>29,0</b>	0,0395	0,0407	0,0418	0,0428
<b>29,5</b>	0,0385	0,0396	0,0407	0,0417
<b>30,0</b>	0,0374	0,0385	0,0396	0,0406
<b>30,5</b>	0,0364	0,0375	0,0385	0,0395
<b>31,0</b>	0,0354	0,0365	0,0375	0,0384
<b>31,5</b>	0,0345	0,0355	0,0365	0,0374
<b>32,0</b>	0,0335	0,0345	0,0356	0,0365
<b>32,5</b>	0,0327	0,0336	0,0346	0,0355
<b>33,0</b>	0,0318	0,0328	0,0337	0,0346
<b>33,5</b>	0,0310	0,0319	0,0329	0,0337
<b>34,0</b>	0,0302	0,0311	0,0320	0,0329
<b>34,5</b>	0,0294	0,0303	0,0312	0,0321
<b>35,0</b>	0,0286	0,0295	0,0305	0,0313
<b>35,5</b>	0,0279	0,0288	0,0297	0,0305
<b>36,0</b>	0,0272	0,0281	0,0290	0,0298
<b>36,5</b>	0,0265	0,0274	0,0282	0,0290
<b>37,0</b>	0,0258	0,0267	0,0275	0,0283
<b>37,5</b>	0,0252	0,0260	0,0269	0,0276
<b>38,0</b>	0,0246	0,0254	0,0262	0,0270
<b>38,5</b>	0,0240	0,0248	0,0256	0,0263
<b>39,0</b>	0,0234	0,0242	0,0250	0,0257
<b>39,5</b>	0,0228	0,0236	0,0244	0,0251

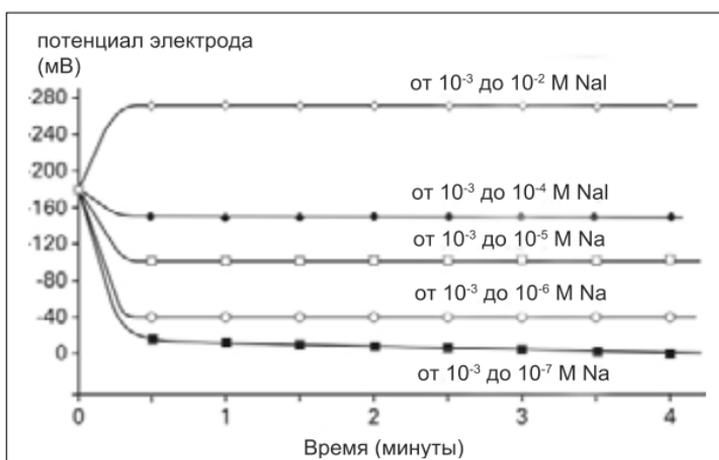
<b>ΔE</b>	<b>Отношение концентраций Q</b>			
	<b>-57,2</b>	<b>-58,2</b>	<b>-59,2</b>	<b>-60,1</b>
<b>40,0</b>	0,0223	0,0230	0,0238	0,0245
<b>40,5</b>	0,0217	0,0225	0,0232	0,0239
<b>41,0</b>	0,0212	0,0219	0,0227	0,0234
<b>41,5</b>	0,0207	0,0214	0,0221	0,0228
<b>42,0</b>	0,0202	0,0209	0,0216	0,0223
<b>42,5</b>	0,0197	0,0204	0,0211	0,0218
<b>43,0</b>	0,0192	0,0199	0,0206	0,0213
<b>43,5</b>	0,0188	0,0195	0,0202	0,0208
<b>44,0</b>	0,0183	0,0190	0,0197	0,0203
<b>44,5</b>	0,0179	0,0186	0,0192	0,0198
<b>45,0</b>	0,0175	0,0181	0,0188	0,0194
<b>45,5</b>	0,0171	0,0177	0,0184	0,0190
<b>46,0</b>	0,0167	0,0173	0,0179	0,0185
<b>46,5</b>	0,0163	0,0169	0,0175	0,0181
<b>47,0</b>	0,0159	0,0165	0,0171	0,0177
<b>47,5</b>	0,0156	0,0162	0,0168	0,0173
<b>48,0</b>	0,0152	0,0158	0,0164	0,0169
<b>48,5</b>	0,0148	0,0154	0,0160	0,0166
<b>49,0</b>	0,0145	0,0151	0,0157	0,0162
<b>49,5</b>	0,0142	0,0147	0,0153	0,0158
<b>50,0</b>	0,0139	0,0144	0,0150	0,0155
<b>50,5</b>	0,0135	0,0141	0,0146	0,0151
<b>51,0</b>	0,0132	0,0138	0,0143	0,0148
<b>51,5</b>	0,0129	0,0135	0,0140	0,0145
<b>52,0</b>	0,0126	0,0132	0,0137	0,0142
<b>52,5</b>	0,0124	0,0129	0,0134	0,0139
<b>53,0</b>	0,0121	0,0126	0,0131	0,0136
<b>53,5</b>	0,0118	0,0123	0,0128	0,0133
<b>54,0</b>	0,0116	0,0120	0,0125	0,0130
<b>54,5</b>	0,0113	0,0118	0,0123	0,0127
<b>55,0</b>	0,0110	0,0115	0,0120	0,0125
<b>55,5</b>	0,0108	0,0113	0,0118	0,0122
<b>56,0</b>	0,0106	0,0110	0,0115	0,0119
<b>56,5</b>	0,0103	0,0108	0,0113	0,0117
<b>57,0</b>	0,0101	0,0106	0,0110	0,0114
<b>57,5</b>	0,0099	0,0103	0,0108	0,0112
<b>58,0</b>	0,0097	0,0101	0,0105	0,0110
<b>58,5</b>	0,0095	0,0099	0,0103	0,0107
<b>59,0</b>	0,0093	0,0097	0,0101	0,0105
<b>59,5</b>	0,0091	0,0095	0,0099	0,0103
<b>60,0</b>	0,0089	0,0093	0,0097	0,0101

## 5. Характеристики электрода

### Выходной сигнал электрода

График зависимости потенциала электрода от концентрации, построенный в полупологарифмическом масштабе, имеет вид прямой линии с наклоном от  $-54$  до  $-60$  мВ на декаду.

Время установления сигнала электрода (время, за которое потенциал электрода достигает 99% от установившегося значения) варьирует от нескольких секунд в концентрированных растворах до нескольких минут вблизи предела чувствительности.



**Рис. 3.** Типичная реакция электрода на изменение концентрации NaI

### Повторяемость

Повторяемость ограничивается такими факторами, как колебания температуры, дрейф и шумы. В пределах рабочего диапазона электрода повторяемость не зависит от концентрации. При ежедневной калибровке электрода можно получить повторяемость измерений на уровне  $\pm 2\%$ .

## Влияние температуры

Поскольку температура непосредственно влияет на величину электродного потенциала, температуры проб и стандартных растворов должны совпадать с точностью не хуже  $\pm 1^\circ\text{C}$  ( $\pm 2^\circ\text{F}$ ). В области концентраций  $10^{-3}$  моль/л разность температур в  $1^\circ\text{C}$  приведет к возникновению погрешности приблизительно в 2 %. Абсолютный потенциал электрода сравнения медленно изменяется с температурой из-за равновесия растворимости, принципиально свойственного электроду. Изменение крутизны электрода с температурой связано с коэффициентом  $S$  в уравнении Нернста.

Теоретические значения крутизны для различных температур приведены в табл. 5. В случае изменения температуры необходимо выполнить процедуры калибровки измерителя и электрода.

Электрод может работать в диапазоне температур от 0 до  $80^\circ\text{C}$  при условии достижения теплового равновесия. Если измерения выполняются при температурах, существенно отличающихся от комнатной, калибровочные стандарты и пробы должны иметь одинаковую температуру. Измерения в растворах с температурой выше  $80^\circ\text{C}$  допускается выполнять только периодически.

**Таблица 5.** Теоретические значения крутизны электрода при различных температурах

Температура ( $^\circ\text{C}$ )	Крутизна (мВ)
0	27,1
10	28,1
20	29,1
25	29,6
30	30,1
40	31,1
50	32,1

Раствор для заполнения электрода сравнения Ion Electrolyte D, поставляемый в комплекте с электродом, минимизирует диффузный потенциал на жидкостном переходе и обеспечивает достижение оптимальных температурных и временных характеристик электрода.

## Мешающие ионы

Указанные в табл. 6 ионы образуют нерастворимые соли; слой соли, выпадающей на поверхности чувствительного элемента при достаточно высоких концентрациях этих ионов в растворе, может приводить к нарушению функционирования электрода. Кроме того, не допускается погружать электрод в сильные восстанавливающие растворы, например, фотографический проявитель — это может привести к образованию металлического слоя на поверхности чувствительного элемента. Для восстановления характеристик электрода в случае загрязнения поверхности чувствительного элемента ее следует отполировать с помощью полировальной ленты. Не допускается наличие ртути в пробах.

В табл. 6 максимально допустимые концентрации наиболее распространенных мешающих ионов указаны относительно концентрации йодид-ионов в пробе. Превышение максимально допустимой относительной концентрации приведет к нарушению функционирования электрода. Присутствие мешающих ионов в меньших концентрациях не оказывает отрицательного воздействия ни на точность измерений, ни на состояние поверхности чувствительного элемента.

Таблица 6. Мешающие ионы йод-селективного электрода

Мешающие ионы	Максимальная относительная концентрация (моль/л)	Максимальная относительная концентрация (мг/л)
(a) Cl <sup>-</sup>	10 <sup>-6</sup>	2,8 x 10 <sup>5</sup>
(a) Br <sup>-</sup>	5 x 10 <sup>3</sup>	3,1 x 10 <sup>3</sup>
(b) S <sup>2-</sup>	10 <sup>-6</sup>	2,5 x 10 <sup>-8</sup>
(b) CN <sup>-</sup>	0.4	8,2 x 10 <sup>-3</sup>
(c) S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	10 <sup>5</sup>	8,8 x 10 <sup>-3</sup>

- (a) Для измерения смесей галидов в растворе можно использовать титрование по методу Грана.
- (b) Для устранения сульфид- и цианид-ионов добавляют раствор, содержащий ионы никеля (+2).
- (c) Представляет комплексообразующие ионы. Превышение максимально допустимой концентрации не приводит к повреждению электрода. Указанное максимально допустимое значение соответствует погрешности в 1%.

## Пример

Какова максимально допустимая концентрация хлорид-иона в пробе с концентрацией йодид-иона  $10^{-3}$  моль/л? Согласно табл. 6, максимальная относительная концентрация составляет:

$$[\text{Cl}^-] / [\text{I}^-] = 10^6$$

$$[\text{Cl}^-] = 10^6 * [\text{I}^-] = 10^6 * 10^{-3} =$$

$10^3$  моль/л максимально допустимая концентрация хлорид-иона

## Пределы чувствительности

Нижний предел чувствительности определяется очень незначительной растворимостью чувствительного элемента в воде. При низких уровнях концентрации электрод реагирует как на йодид-ионы, так и на ионы, образующиеся в результате растворения чувствительного элемента. Несовпадение реальных характеристик электрода (сплошная линия) с теоретической линейной характеристикой объясняется реакцией электрода на ионы, образующиеся в результате растворения чувствительного элемента.

Для получения наилучших результатов измерений перед считыванием показаний следует выждать более длительное время.

## Комплексообразование

Йодид-ионы образуют комплексные соединения с ионами некоторых металлов. Поскольку электрод реагирует только на свободные йодид-ионы, в присутствии любых комплексообразователей измеренные значения концентрации окажутся заниженными. В табл. 7 указаны уровни концентраций комплексообразующих металлов, которые будут приводить к возникновению погрешности величиной 20%. Для измерения общей концентрации йодид-иона при многократно (от 50 до 100 раз) превышающих концентрациях комплексообразователей можно использовать описанный выше метод стандартных добавок.

Таблица 7. Комплексообразующие металлы

	Максимально допустимая концентрация (моль/л)	Максимально допустимая концентрация (мг/л)
$\text{Bi}^{3+}$	$2 \times 10^{-5}$ моль/л	4 мг/л
$\text{Cd}^{2+}$	$5 \times 10^{-4}$ моль/л	50 мг/л
$\text{Pb}^{2+}$	$5 \times 10^{-3}$ моль/л	1000 мг/л

## Теория работы

Йод-селективный электрод конструктивно состоит из чувствительного элемента, заключенного в корпус из эпоксидного пластика. Когда чувствительный элемент контактирует с раствором, содержащим йодид-ионы, на нем генерируется электродный потенциал. Этот потенциал, который зависит от концентрации свободных йодид-ионов в растворе, измеряется относительно постоянного потенциала электрода сравнения с помощью цифрового измерителя pH/mV или иономера (измерителя концентрации). Измеренная величина потенциала связана с концентрацией йодид-иона в растворе зависимостью, описываемой уравнением Нернста.

$$E = E_0 + S \cdot \log(A)$$

$E$  = измеренный электродный потенциал

$E_0$  = потенциал электрода сравнения (константа)

$A$  = уровень активности йодид-иона в растворе

$S$  = крутизна электрода (приблизительно -57 мВ на декаду)

$$S = (2,3 R T) / nF$$

где  $R$  и  $F$  — постоянные,  $T$  = температура по шкале Кельвина и

$n$  = заряд иона

Величина  $A$  — это уровень активности, или «эффективная концентрация» свободных йодид-ионов в растворе. Активность йодид-иона связана с концентрацией свободных йодид-ионов  $C_f$  через коэффициент активности  $\gamma$ .

$$A = \gamma \cdot C_f$$

Коэффициенты активности ионов представляют собой переменные величины с сильной зависимостью от общей ионной силы. Ионная сила раствора определяется всеми

присутствующими в нем ионами. Она вычисляется как полусумма произведений концентрации иона каждого вида на квадрат его заряда.

$$\text{Ионная сила} = 1/2 \sum (C_i Z_i^2)$$

$C_i$  = концентрация  $i$ -го иона

$Z_i$  = заряд  $i$ -го иона

$\sum$  значок суммирования по всем видам ионов, присутствующим в растворе.

Если фоновая ионная сила велика и постоянна относительно концентрации измеряемого иона, коэффициент активности также является постоянной величиной, а активность прямо пропорциональна концентрации. Для того чтобы фоновая ионная сила сохраняла высокое и постоянное значение относительно меняющейся концентрации йодидов, ко всем пробам и стандартным йодидным растворам добавляют регулятор ионной силы (ISA). В качестве регулятора ионной силы для йодидов рекомендуется использовать  $\text{NaNO}_3$  в концентрации 5 моль/л. Допускается использовать и другие растворы, которые не содержат ионов, являющихся мешающими по отношению йод-селективному электроду.

Для проб с высокой ионной силой (выше 0,1 моль/л) следует подготовить стандарты с фоновым составом, аналогичным составу пробы.

Необходимо также учитывать условия работы электрода сравнения. На границах раздела любых жидкостей, различающихся по составу, возникают диффузные потенциалы. Причиной этого является взаимная диффузия ионов на границе раздела двух растворов. Из-за разницы в скоростях диффузии различных ионов заряды, перенесенные через границу раздела жидкостей в обе стороны, не будут равны, в результате чего между растворами возникнет разность потенциалов. При выполнении электродных измерений важно, чтобы этот потенциал был одинаковым при погружении электрода сравнения в стандартный раствор и в раствор пробы; в противном случае изменение потенциала жидкостного перехода добавится к погрешности измерения ион-селективного электрода.

Наиболее важная переменная, которая имеется в распоряжении исследователя — это состав электролита электрода сравнения. Положительные и отрицательные ионы в электролите должны иметь одинаковую подвижность. Это значит, что скорости, с которыми положительные и отрицательные ионы в электролите диффундируют в раствор пробы, должны быть как можно ближе друг к другу. Если скорости переноса положительного и отрицательного зарядов в раствор пробы равны, на границе раздела не возникнет разности потенциалов. Растворы для заполнения электродов сравнения perfectION™ специально разработаны с учетом требований, предъявляемых к электродам сравнения.

## 6. Устранение неисправностей

При поиске причин неисправностей рекомендуется придерживаться определенной последовательности. Для упрощения поиска причин неисправностей измерительную систему можно условно разбить на четыре элемента: измеритель, электрод, проба/измерение и метод.

### Измеритель/титратор

Измеритель/титратор — это самый простой компонент системы с точки зрения выявления и устранения причин ошибки. Необходимые сведения см. в руководстве по эксплуатации измерителя/титратора.

### Электрод

1. Тщательно промойте электрод дистиллированной водой.
2. Проверьте функционирование электрода в соответствии с указаниями раздела **«Проверка функционирования электрода (крутизна)»**.
3. При неудовлетворительных результатах этой процедуры см. раздел **«Рекомендации по выполнению измерений»**. Тщательно очистите электрод, как указано в разделе **«Техническое обслуживание электрода»**. Слейте из электрода электролит и залейте свежий.
4. Повторите процедуру, описанную в разделе **«Проверка функционирования электрода (крутизна)»**.
5. Если проверка функционирования электрода прошла успешно, но проблемы при измерениях по-прежнему остаются, возможно, проба содержит мешающие ионы или комплексообразователи, либо используется неправильная методика измерения.
6. Прежде чем заменить электрод, еще раз прочитайте настоящее руководство и тщательно очистите электрод; выполните все указанные операции подготовки электрода; используйте рекомендованный электролит, регулятор ионной силы и калибровочные стандарты; выполните измерение проб, соблюдая все рекомендации и сверяясь с разделом **«Перечень контрольных операций при поиске неисправностей»**.

## Пробы/измерения

Качество получаемых результатов в большой мере зависит от качества используемых стандартов. При возникновении проблем в первую очередь приготовьте свежие стандарты — это может сэкономить часы безрезультатного поиска источников ошибок. Причиной ошибок может быть загрязнение стандартов, погрешности, допущенные в процессе разбавления, качество дистиллированной воды или арифметическая ошибка при расчете концентраций.

Лучший метод приготовления стандартных растворов — это последовательное разбавление. См. раздел «Последовательное разбавление». Электрод и измеритель могут правильно работать со стандартами и неправильно — с пробами. В этом случае проверьте состав пробы на наличие мешающих или несовместимых компонентов и убедитесь в отсутствии неучтенных температурных эффектов. См. разделы **«Требования к пробам»**, **«Влияние температуры»**, **«Мешающие ионы»** и **«Влияние pH»**.

## Метод

Если проблема сохраняется, проверьте используемые методики работы. Еще раз прочитайте разделы руководства с описаниями процедур калибровки и проверьте соблюдение всех приведенных в них указаний. Убедитесь в том, что ожидаемая концентрация измеряемого иона лежит в пределах чувствительности электрода.

Убедитесь в том, что используемый метод анализа совместим с измеряемыми пробами. Метод прямого измерения не во всех случаях дает наилучшие результаты. Если в пробах в больших количествах присутствуют комплексообразователи, оптимальные результаты могут быть получены при использовании метода стандартных добавок. При измерении низких концентраций следуйте указаниям, приведенным в разделе **«Калибровка в области низких концентраций»**.

## Перечень контрольных операций при поиске неисправностей

- Не залит электролит — залейте электролит до уровня заливочного отверстия электрода. См. дополнительные сведения в разделе **«Подготовка электрода»**.
- Используется несоответствующий электролит — см. рекомендуемый электролит в разделе **«Подготовка электрода»**.
- Сухая диафрагма электрода — нажмите на колпачок электрода, чтобы слить несколько капель электролита.
- Электрод загрязнен — см. указания по очистке электрода в разделе **«Техническое обслуживание электрода»**.
- Чувствительный элемент загрязнен или эродирован — см. указания по очистке электрода в разделе **«Техническое обслуживание электрода»**.
- Стандартные растворы загрязнены или приготовлены неправильно — приготовьте свежие стандартные растворы. См. разделы **«Рекомендации по выполнению измерений»** и **«Аналитические методы»**.
- Не используется регулятор ионной силы либо используется несоответствующий регулятор — регулятор ионной силы необходимо добавлять ко всем стандартам и пробам. См. сведения о регуляторе ионной силы в разделе **«Необходимое оборудование»**.
- Пробы и стандарты имеют различную температуру — все растворы должны иметь одну и ту же температуру.
- Воздушные пузырьки на чувствительном элементе — извлеките электрод из раствора и снова погрузите его, чтобы удалить пузырьки.

- Электрод неправильно подключен к измерителю/титратору — отключите и снова подключите электрод к измерителю/титратору.
- Неправильное заземление измерителя/титратора или мешалки — проверьте цепи заземления измерителя/титратора и мешалки.
- Наличие зарядов статического электричества — протрите пластиковые детали измерителя/титратора раствором моющего средства.
- Неисправность измерителя/титратора — проверьте функционирование измерителя/титратора. См. руководство по эксплуатации измерителя/титратора



## 7. Информация для заказа

<b>Наименование</b>	<b>№ заказа</b>
Комбинированный йод-селективный электрод perfectION™ comb I <sup>-</sup> с разъемом BNC:	<b>51344718</b>
Комбинированный йод-селективный электрод perfectION™ comb I <sup>-</sup> с разъемом Lemo:	<b>51344818</b>
Электролит Ion Electrolyte D:	<b>51344753</b>
Стандартный йодидный раствор 1 000 мг/л:	<b>51344776</b>
Регулятор ионной силы для твердотельных ИСЭ:	<b>51344760</b>
Съемный конус:	<b>00022986</b>



## 8. Технические характеристики электрода

### Тип диафрагмы

твердотельная

### Диапазон измеряемых концентраций

от  $5 \times 10^{-8}$  моль/л до 1 моль/л  
от 0,005 мг/л до 127 000 мг/л

### Диапазон pH

от 0 до 12

### Диапазон температур

от 0 до 80°C в длительном режиме

### Сопротивление электрода

Менее 0,1 МОм

### Повторяемость

$\pm 2\%$

### Минимальный объем пробы

5 мл в стакане емкостью 50 мл

### Размеры

Диаметр корпуса: 13 мм

Диаметр колпачка: 16 мм

Длина кабеля: .....1,2 м

\* Технические характеристики могут быть изменены без уведомления.

**[www.mt.com](http://www.mt.com)**

Для получения дополнительной информации

Mettler-Toledo AG  
Analytical  
Sonnenbergstrasse 74  
CH-8603 Schwerzenbach  
Швейцария  
Тел. ++41 (0)44 806 77 11  
Факс ++41 (0)44 806 73 50  
Интернет: [www.mt.com](http://www.mt.com)

Возможны технические изменения  
©04/2011 Mettler-Toledo AG  
Издано в Швейцарии 1001/2.12  
ME-51710847