



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015138036/28, 07.09.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
07.09.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 07.09.2015

(45) Опубликовано: 10.07.2016

Адрес для переписки:

394006, г. Воронеж, Университетская пл., 1,
ФГБОУ ВПО "ВГУ", ЦКТ

(72) Автор(ы):

Васильева Вера Ивановна (RU),
Акберова Эльмара Маликовна (RU),
Малыхин Михаил Дмитриевич (RU),
Голева Елена Алексеевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Воронежский государственный
университет" (ФГБОУ ВПО "ВГУ") (RU)

(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕМБРАННОЙ СИСТЕМЫ

(57) Реферат:

Полезная модель относится к оборудованию, используемому при исследовании локальных характеристик массообмена, теплопереноса и гидродинамического состояния в системе ионообменная мембрана-раствор в условиях наложения электрического тока. Предложено устройство для комплексного исследования локальных транспортных, электрохимических, гидродинамических и температурных характеристик в системе ионообменная мембрана-раствор, включающее семикамерную ячейку с проточными камерами, между которыми укреплены исследуемая и вспомогательные мембраны, и дифференциальную хромель-алюмелевую термопару, один спай которой располагается на произвольно выбранном расстоянии от поверхности исследуемой мембраны, а другой - в среде с характеристической температурой таяния льда. Измерительные хлоридсеребряные электроды расположены по обе стороны от исследуемой мембраны на одинаковом расстоянии к ее поверхности. Для задания тока и регистрации потенциала, как и у прототипа, используются потенциостат и вольтметр. Кроме того, установка содержит три буферные емкости, одна из них - с раствором электролита заданной концентрации для подачи в камеру обессоливания и камеры

концентрирования, две другие - с рабочими растворами электролитов для подачи в буферные и электродные камеры, три емкости для подачи соответствующих растворов электролитов в соответствующие буферные емкости с помощью трех насосов. Причем, в соответствии с методикой несимметричной поляризации ионообменных мембран в буферные секции подавали растворы, имеющие на порядок большую величину концентрации по сравнению с секцией обессоливания. В состав установки входит интерферометр по схеме Маха-Цендера с перестраиваемым аргоновым лазером ЛГН-503 (ОАО «Плазма», г. Рязань) с регулируемой мощностью излучения до 1 Вт, дающим излучение с длинами волн 457,9 нм и 514,5, и система регистрации интерферограмм, содержащая видеокамеру VEI-135 (ЗАО «ЭВС», С-Петербург, Россия) с частотой дискретизации 30 Гц, передающую информацию на компьютер Intel Core Duo E8400 с тактовой частотой 3.00 Гц. Устройство универсальное и позволяет комплексно изучать транспортные характеристики, электрохимическое и гидродинамическое поведение системы ионообменная мембрана-раствор в условиях наложенного электрического поля.

Фиг. 7.

G01N27/40

УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕМБРАННОЙ СИСТЕМЫ

5 Полезная модель относится к оборудованию, используемому при исследовании локальных транспортных, электрохимических, гидродинамических и температурных характеристик в системе ионообменная мембрана - раствор при условии наложения электрического поля.

10 Использование средних величин для количественного описания массопереноса в электромембранных системах является недостаточным в связи с неоднородностью распределения в них концентраций, скоростей и температур. Возникает необходимость измерения локальных характеристик, образующих поля, что позволяет не только дать исходные определения явлений, но и понять природу протекающих процессов, предложить их количественное описание, дающее возможность научного прогноза и совершенствования электромембранных технологий [1]. Кроме того, исследование электроконвективного механизма доставки вещества к границе мембрана-раствор при сверхпредельных токовых режимах является одним из приоритетных направлений в области электрохимии мембран. Для описания закономерностей переноса в этом случае должны быть известны не только электродиффузионные характеристики, но и поля температуры и скоростей. Таким образом, использование экспериментальных методов и устройств для исследования локальных характеристик массообмена, теплопереноса и гидродинамического состояния становится необходимостью при решении фундаментальных и прикладных проблем мембранной электрохимии. Самым информативным *in situ* методом экспериментального исследования концентрационных полей и визуализации гидродинамических явлений в растворах является лазерная интерферометрия [2].

25 Известно устройство для проведения динамического локально-распределительного анализа в многокомпонентных растворах [3]. Данное устройство, использующее линейную область и аддитивность смещения интерференционной полосы как функции концентрации индивидуальных компонентов, позволяет проводить *in situ* измерения концентрационных полей в многокомпонентных растворах. Но в устройстве не предусмотрена возможность измерения локальных характеристик массопереноса на межфазных границах в гетерогенных системах. Также устройство не позволяет визуализировать гидродинамические явления и измерять электрохимические и температурные характеристики в растворе на границе с мембраной, т.е. данная установка ограничена в применении.

35 Наиболее близким аналогом заявляемому устройству является экспериментальная установка для изучения усредненных массообменных и электрохимических характеристик ионообменных мембран [4]. Устройство состоит из шестикамерной ячейки с проточными камерами, между которыми укреплены исследуемая и вспомогательные мембраны, измерительные хлоридсеребряные электроды и капилляры Луггина-Габера, три буферные емкости, одна из них - с рабочим раствором электролита, две другие - с обессоливаемым растворами электролита заданной концентрации, две емкости для подачи соответствующих растворов электролитов в соответствующие буферные емкости с помощью двух насосов, потенциостат и вольтметр, сопряженный с персональным компьютером. Камеры ячейки через штуцеры, расположенные в каналах со щелевидными соосно расположенными прорезями на горизонтальных плоскостях рамки каждой из камер ячейки, гидравлически через трубопроводы соединены с

соответствующими емкостями. Устройство также содержит кондуктометр, кондуктометрическую ячейку, рН-метр, комбинированный электрод, устройство, обеспечивающее дозирование титранта в третью дополнительную буферную емкость с магнитной мешалкой. Устройство-прототип позволяет получить

5 хронопотенциограммы и определить вольтамперные характеристики ионообменной мембраны, оценить изменения средней концентрации в дополнительной буферной емкости, что позволяет рассчитать числа переноса ионов соли и продуктов диссоциации воды через исследуемую мембрану при заданной силе тока.

Основными недостатками известного устройства-прототипа являются получение 10 только усредненных величин массообменных и электрохимических характеристик ионообменной мембраны, отсутствие возможности визуализации гидродинамического состояния и измерения температуры в растворе на межфазной границе.

Технической задачей предлагаемой полезной модели является разработка универсального устройства, позволяющего проводить комплексное изучение 15 транспортных, электрических, гидродинамических и температурных локальных характеристик электромембранной системы в условиях наложенного электрического поля.

Для решения поставленной технической задачи предложено устройство для комплексного исследования локальных транспортных, электрохимических, 20 гидродинамических и температурных характеристик электромембранной системы, содержащее ячейку с проточными камерами, между которыми укреплены исследуемая и вспомогательные мембраны, а также интерферометр по схеме Маха-Цендера с источником монохроматического излучения, проектирующей оптической системой и системой регистрации интерферограмм. В состав установки входит дифференциальная 25 хромель-алюмелевая термопара, расположенная в секции обессоливания. Как и у прототипа, для регистрации потенциала и задания тока используются вольтметр и потенциостат. Измерительные хлоридсеребряные электроды расположены по обе стороны исследуемой мембраны на одинаковом расстоянии от ее поверхности. В состав установки входят три буферные емкости. Кроме того, установка содержит три емкости 30 для подачи соответствующих растворов электролитов в соответствующие буферные емкости с помощью трех насосов.

Камеры ячейки через штуцеры гидравлически через трубопроводы соединены с соответствующими емкостями. Штуцеры входов в электродные камеры ячейки гидравлически соединены трубопроводами с буферной емкостью с рабочим раствором 35 электролита. Штуцеры выходов электродных камер ячейки гидравлически трубопроводами соединены с соответствующей емкостью для подачи рабочего раствора электролита. Штуцеры выхода смежной с исследуемой мембраной камеры концентрирования соединены с емкостью для сбора раствора на компонентный анализ. Штуцеры выходов буферных камер и второй камеры концентрирования ячейки 40 гидравлически трубопроводами соединены с емкостью для слива отработанного раствора электролита. Штуцер входа в камеру обессоливания ячейки гидравлически трубопроводом соединен с буферной емкостью с обессоливаемым раствором, а штуцер выхода - с емкостью для слива отработанного раствора. Для поддержания постоянного уровня растворов электролитов в буферных емкостях и емкостях для подачи раствора 45 электролита использованы три насоса.

Предлагаемое устройство отличается от прототипа тем, что включает интерферометр по схеме Маха-Цендера, позволяющий проводить измерение концентрационных полей и визуализацию гидродинамических явлений на межфазной границе мембрана - раствор,

ячейка адаптирована к интерферометрическим измерениям и выполнена семикамерной, что дает возможность устранить влияние противоположной мембраны в секции обессоливания на характеристики исследуемой мембраны, а также исключить доставку продуктов электродных реакций к ее поверхности. Другим отличием устройства является то, что для измерения локальной температуры в растворе на произвольно выбранном расстоянии от поверхности с мембраной установлена дифференциальная хромель-алюмелевая термопара, один спай которой располагается на заданном расстоянии от изучаемой мембраны в секции обессоливания, а другой находится в среде с характеристической температурой таяния льда.

Одновременное определение вольтамперных характеристик и возможность получения данных об изменении средней концентрации раствора при помощи заявляемого устройства упрощают анализ и интерпретацию экспериментальных данных по сопоставлению локальных и средних характеристик электромембранной системы.

На фигуре 1 изображена схема заявляемого устройства для комплексного исследования локальных транспортных, электрохимических, гидродинамических и температурных характеристик электромембранной системы; на фигуре 2 - схема интерферометра Маха-Цендера с электродиализной ячейкой; на фигуре 3 - концентрационные профили хлорида натрия на границе ионообменная мембрана - раствор при различных плотностях тока; на фигуре 4 - сравнение зависимостей величин локальной концентрации на границе раствора с мембраной и средней концентрации на выходе из канала обессоливания от степени поляризации электромембранной системы; на фигуре 5 - зависимость поверхностной концентрации от плотности тока и вольтамперная характеристика в электромембранной системе сульфокатионообменная мембрана - раствор хлорида натрия; на фигуре 6 - зависимость гидродинамических пульсаций скорости в растворе на границе с сульфокатионообменной мембраной при устойчивой и неустойчивой стратификации системы; на фигуре 7 - изменение локальной температуры в растворе на границе с сульфокатионообменной мембраной при устойчивой стратификации.

Устройство для комплексного исследования локальных транспортных, гидродинамических, электрохимических и температурных характеристик электромембранной системы (фиг. 1) состоит из семикамерной ячейки 1 (27) с исследуемой мембраной 2, относительно которой симметрично расположены вспомогательные мембраны 3, образующие две электродные камеры 4, две буферные камеры 5, две камеры концентрирования 6, камеру обессоливания 7. Хлоридсеребряные электроды 8 встроены в секции, прилегающие с двух сторон к исследуемой мембране 2. Семикамерная ячейка 1 (27) также содержит электроды 9, 10. Ток задается с помощью потенциостата 11. Заявляемое устройство включает в себя вольтметр 12, для регистрации потенциала, соединенный с хлоридсеребряными электродами 8, дифференциальную хромель-алюмелевую термопару 13, соединенную с комбинированным цифровым прибором 14 и емкостью 15 с характеристической температурой таяния льда, буферные емкости 16 и 17, предназначенные для накопления рабочего раствора электролита, третью буферную емкость 18, предназначенную для накопления обессоливаемого раствора электролита. Емкости 19, 20 для подачи рабочего раствора электролита и емкость 21 заполняются раствором электролита вручную до начала эксперимента. Все имеющиеся емкости соединены с насосами и камерами семикамерной ячейки 1 (27) гидравлически трубопроводами 22.

Семикамерная ячейка комплектуется следующим образом. Корпус изготовлен из органического стекла и состоит из семи блоков секций, которые в определенной

последовательности зажимаются между двумя основаниями. Исследуемую мембрану 2 и вспомогательные мембраны 3 зажимают между блоками секциями. Для проведения интерферометрических измерений по бокам к корпусу с помощью рамок прижимаются болтами оптические стекла высокой степени однородности. Для герметизации семикамерной ячейки между корпусом, стеклами и рамками помещают резиновые прокладки. Анод (9) и катод (10) выполнены из платины. Крепление электродиализной ячейки в интерферометре с помощью поворотного механизма позволяет перемещать ее в трех взаимно перпендикулярных направлениях, что дает возможность сводить к минимуму оптические погрешности, связанные при интерферометрических измерениях с фокусировкой и не параллельностью поверхности мембраны лучу монохроматического источника света.

Подача и отвод раствора в каждой из электродных камер 4, буферных камер 5, камеры концентрирования 6 и камеры обессоливания 7 семикамерной ячейки 1 (27) осуществляется внутри каждой камеры через штуцеры, которые представляют собой трубки, служащие для гидравлического соединения ячейки 1 (27) посредством трубопроводов 22 с буферными емкостями 16, 17, 18, емкостью 23 для слива отработанного раствора электролита и емкостью 24 для сбора раствора на компонентный анализ из смежной с исследуемой секцией концентрирования 6. Все эксперименты проводят под действием электрического тока, который прикладывают к электродам 9,10.

Семикамерную ячейку 1 (27), как и у прототипа, можно использовать в горизонтальном и вертикальном положениях для комплексного исследования массообменных и электрохимических характеристик ионообменной мембраны. Если семикамерная ячейка 1 (27) находится в вертикальном положении, то вблизи исследуемой мембраны 2 развиваются два вида конвекции: гравитационная и электроконвекция. Когда семикамерная ячейка 1 (27) расположена горизонтально, то в случае устойчивой концентрационно-температурной стратификации системы более легкий обедненный диффузионный слой электролита находится под исследуемой мембраной 2, и гравитационная конвекция в непосредственной близости от исследуемой мембраны отсутствует, а в случае неустойчивой стратификации электромембранной системы, когда обедненный диффузионный слой находится над исследуемой мембраной, на границе как и в случае вертикального положения ячейки могут реализоваться два вида конвекции [5].

В состав устройства также входит интерферометрическая установка по схеме Маха-Цендера (фиг. 2), состоящая из монохроматического источника излучения 23, двух отражающих 26 и двух разделяющих 25 световой пучок полупрозрачных зеркал, расположенных в виде прямоугольника или параллелограмма, конденсирующих линз 24, экрана 28, на котором регистрировалась интерференционная картина. Поток света от монохроматического источника света 23 коллимируют линзой 24 и разделяют светоразделительным зеркалом 3 на два световых потока (измерительный и опорный лучи). Измерительный луч проходит через семикамерную ячейку 27 (1) и совмещается с опорным лучом, давая интерференционную картину на экране 28.

Расшифровка интерферограмм проводилась согласно методике [6].

Для визуализации гидродинамической картины течения в секцию обессоливания ячейки 27 (1) подается раствор исследуемого вещества, содержащий частицы алюминиевой пудры или канифоли во взвешенном состоянии. Теневая картина течения фиксируется на видеокамеру при перекрытом опорном луче интерферометра. Скорость течения в локальной точке определяется путем измерения времени прохождения частицей

отрезка пути с учетом предварительно снятого масштаба.

Пример 1.

С помощью заявляемого устройства провели экспериментальное определение локальных и средних массообменных и электрохимических характеристик
5 сульфокатионообменной мембраны МК-40 с одновременной регистрацией гидродинамического состояния раствора на межфазной границе. Камера обессоливания 7 была образована исследуемой мембраной 2 (МК-40) и вспомогательной 3 анионообменной мембраной средней основности МА-40. Устройство работало в
10 прямоточном гидравлическом режиме. Концентрация рабочего раствора электролита хлорида натрия составляла 0,1 М, начальная концентрация обессоливаемого раствора хлорида натрия - 0,01 М. Семикамерная ячейка 1 (27) находилась в вертикальном
положении. Скорость подачи раствора в секцию обессоливания составляла $1,26 \cdot 10^{-3}$ м/с. Интерферограммы и вольтамперограммы снимали на координате по направлению
15 подачи раствора $1,1 \cdot 10^{-2}$ м (0,55 от высоты мембранного канала 7). Измерение концентрационного распределения в мембранном канале проводится в стационарном состоянии, критерием наступления которого являются постоянные величины разности потенциалов на клеммах электродиализатора и значений концентрации раствора, вытекающего из секций концентрирования электродиализатора. Время наступления
20 стационарного состояния в зависимости от плотности тока составляло от 15 до 40 минут. На фиг. 3 представлены концентрационные профили хлорида натрия на границе сульфокатионообменная мембрана - раствор при кратности превышения предельной плотности тока 0,5 (кривая 1), 0,8 (кривая 2) и 1,0 (кривая 3), свидетельствующие о
нелинейном распределении концентрации электролита в примембранном слое раствора.

Представленные на фиг. 4 зависимости поверхностной концентрации хлорида натрия (кривая 1) и средней концентрации на выходе из канала обессоливания (кривая 2) от
25 степени поляризации электромембранной системы мембрана МК-40 - раствор хлорида натрия, показывают экспоненциальное убывание средней концентрации с ростом тока и экспериментально доказывает неравномерность распределения и рост локальных
30 величин концентрации в области сверхпредельных токовых режимов.

Сравнительный анализ функции поверхностной концентрации C_s от плотности тока (кривая 1) и вольтамперной характеристики (кривая 2) в электромембранной системе
раствор хлорида натрия - мембрана МК-40, представленный на фиг.5, показал, что
35 пересечение с осью токов касательной, проведенной к начальному участку этой функции дает величину локальной предельной диффузионной плотности тока (точка I), согласующуюся с найденной традиционным методом вольтамперометрии по кривой 2. Минимуму поверхностной концентрации (точка II) соответствовала область токов второго изменения наклона вольтамперной кривой, что обусловлено наложением на
электродиффузионный перенос через мембрану сопряженных эффектов
40 концентрационной поляризации.

Пример 2.

С помощью заявляемого устройства обобщением полученных результатов по
распределению локальных концентраций, измерения потенциала и температуры, визуализации конвективных течений в растворе на границе с сульфокатионообменной
45 мембраной МК-40 выявлены причины возникновения конвективной стабильности и установлены доминирующие механизмы транспорта при интенсивных токовых режимах. Устройство работало в условиях устойчивой и неустойчивой концентрационно-температурной стратификации при горизонтальном расположении семикамерной

ячейки. Скорость подачи раствора хлорида натрия концентрации $1,0 \cdot 10^{-2}$ М в исследуемый канал 7 с межмембранным расстоянием $2,0 \cdot 10^{-3}$ м, образованный из однотипных исследуемых мембран МК-40, составляла $1,34 \cdot 10^{-3}$ м/с ($Re=2$). Измерения проводились при координате по направлению подачи раствора $2,7 \cdot 10^{-2}$ м (0,64 от высоты мембранного канала 7).

Результаты по визуализации течения в канал 7 с помощью суспензии канифоли, представленные на фиг.6, показали, что при высокоинтенсивных токовых режимах величины поперечной составляющей скорости гидродинамических пульсаций, доставляющих вещество из глубины раствора к поверхности исследуемой мембраны 2 и интенсифицирующих массоперенос (кривые 1' и 2'), были сопоставлены со скоростью подачи раствора в мембранный канал 7. Превышение скорости продольных (кривые 1, 2) и поперечных (кривые 1', 2') составляющих гидродинамических пульсаций скорости в растворе на границе с мембраной МК-40 при неустойчивой (1, 1') по сравнению с устойчивой (2, 2') стратификацией раствора хлорида натрия явилось доказательством более высокой эффективности перемешивания раствора при неустойчивой стратификации. Различия гидродинамических характеристик при устойчивой и неустойчивой стратификации электромембранной системы, обусловленные вкладом гравитационной конвекции, дополнительно подтверждены представленными на фиг. 7 результатами более значительного изменения локальной температуры в растворе на границе с мембраной МК-40 при устойчивой (кривая 1) по сравнению с неустойчивой (кривая 2) стратификацией электромембранной системы в гравитационном поле.

Использование заявляемого устройства позволяет в одной электрохимической ячейке измерять локальные характеристики массопереноса (концентрационные профили и градиенты концентрации) и температур, вольтамперные характеристики и визуализировать гидродинамические явления на межфазных границах электромембранной системы, что упрощает сравнение и интерпретацию экспериментальных данных. Расширить функциональные возможности универсального устройства позволило использование адаптированной к интерферометрическим измерениям семикамерной ячейки, дифференциальной термопары и интерферометра по схеме Маха-Цендера. Таким образом, с помощью заявляемого устройства можно в одних и тех же условиях измерять концентрационные профили у отдельной мембраны и концентрационное поле в секции электродиализатора с одновременным наблюдением за гидродинамическим состоянием пограничных слоев мембраны и мембранного канала, регистрацией вольтамперной характеристики и тепловых эффектов на межфазной границе, тогда как прототип позволял измерять средние массообменные и электрохимические характеристики. Расширенные функциональные возможности заявляемого устройства позволяют сделать исследование характеристик электромембранных систем гораздо более информативным.

Источники информации

1. Шапошник В.А. Явления переноса в ионообменных мембранах / В.А. Шапошник, В.И. Васильева, О.В. Григорчук. - М.: МФТИ, 2001. - 200 с].

2. Васильева В.И. Концентрационные поля и явления переноса в электромембранных системах: автореферат дис. д-ра хим. наук: 02.00.05 / В.И. Васильева; Воронеж, гос. ун-т; науч. консультант В.А. Шапошник. - Защищена 03.07.08. - Воронеж, 2008. - 40 с].

3. Пат. 116221. Интерферометрическое устройство для проведения динамического локально-распределительного анализа в многокомпонентных прозрачных средах / В.И. Васильева, М.Д. Малыхин, Ю.К. Маковеев, В.А. Шапошник, В.Ф. Селеменев,

А.В. Жильцова, Э.М. Акберова, С.А. Рогатнев; ФГБОУ ВПО ВГУ. - №2011152330/28, заявл. 21.12.2011; опубл. 20.05.2012 Бюл. №14. - 6 с.

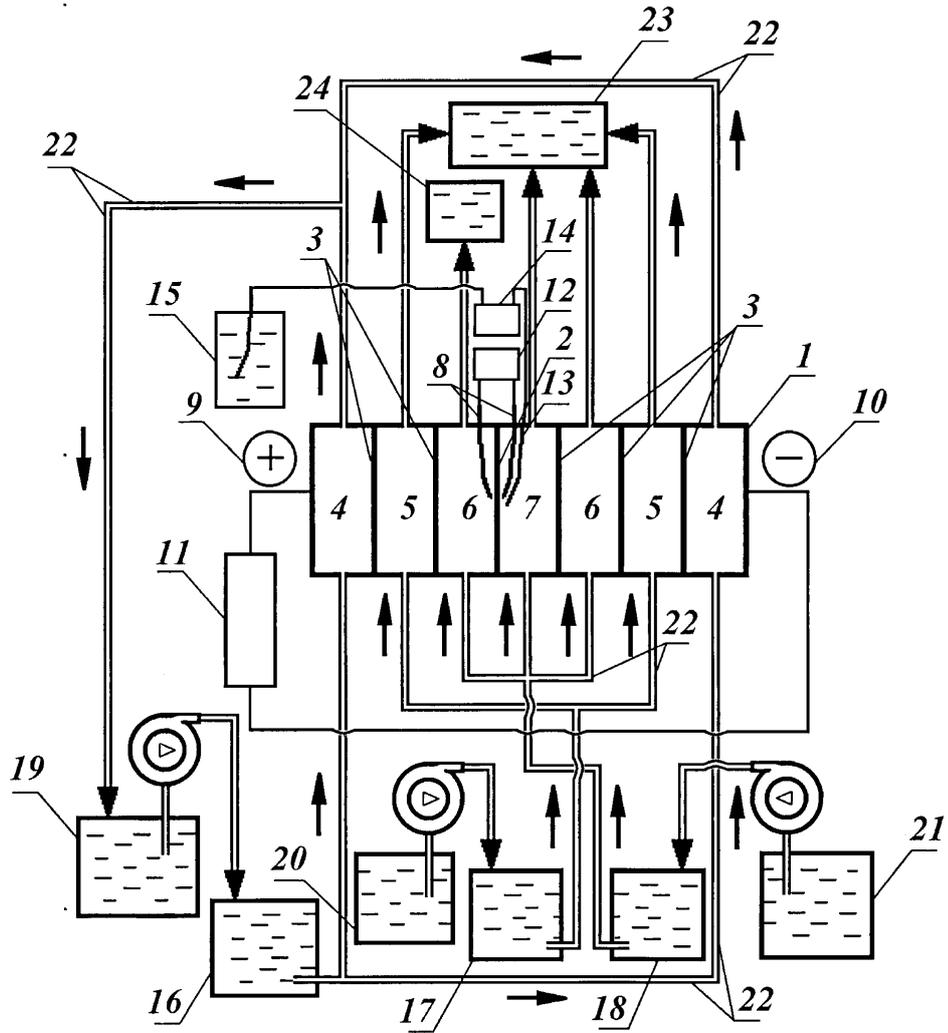
4. Пат. 100276. Устройство для комплексного исследования массообменных и электрохимических характеристик ионообменной мембраны / Н.Д. Письменская, В.В. Никоненко, Н.А. Мельник, Е.И. Белова; ГОУ ВПО КубГУ. - №2010129861/28, заявл. 16.07.2010; опубл. 10.12.2010 Бюл. №34.

5. Письменская Н.Д., Никоненко В.В., Белова Е.И., Лопаткова Г.Ю., Соста Ф., Пурселли Ж., Ларше К. Сопряженная конвекция раствора у поверхности ионообменных мембран при интенсивных токовых режимах // Электрохимия. - 2007. - Т.43. - №3. - С. 325-345.

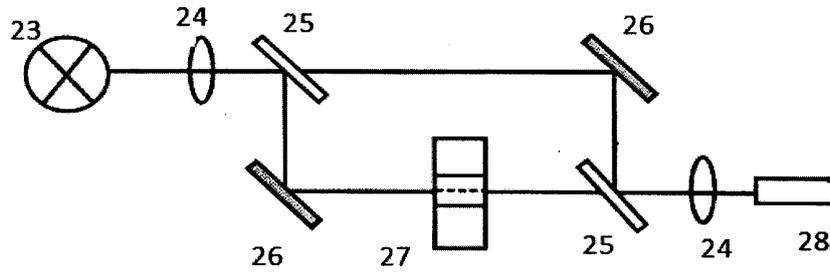
6. Васильева В.И., Шапошник В.А., Григорчук О.В., Малыхин М.Д. Лазерная интерферометрия в исследованиях кинетики электродиализа // Электрохимия. - 2002. - Т. 38, №8. - С. 949-955.

Формула полезной модели

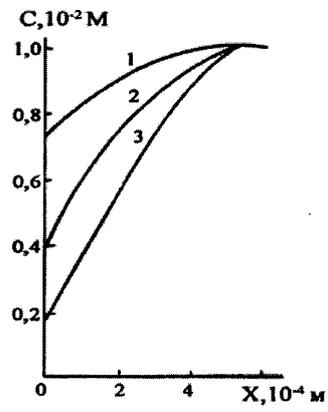
Устройство для комплексного исследования локальных транспортных, электрохимических, гидродинамических и температурных характеристик в системе ионообменная мембрана-раствор, содержащее ячейку с проточными камерами, между которыми укреплены исследуемая и вспомогательные мембраны, измерительные хлоридсеребряные электроды, расположенные по обе стороны от исследуемой мембраны, потенциостат и вольтметр, камеры ячейки через штуцеры гидравлически через трубопроводы соединены с емкостями для подачи соответствующих растворов, отличающееся тем, что устройство дополнительно содержит хромель-алюмелевую термопару и интерферометр по схеме Маха-Цендера с источником монохроматического излучения, проектирующей оптической системой и системой регистрации интерферограмм, включающей сопряженную с персональным компьютером видеокамеру, причем ячейка с исследуемой мембраной выполнена семикамерной и адаптирована к интерферометрическим измерениям.



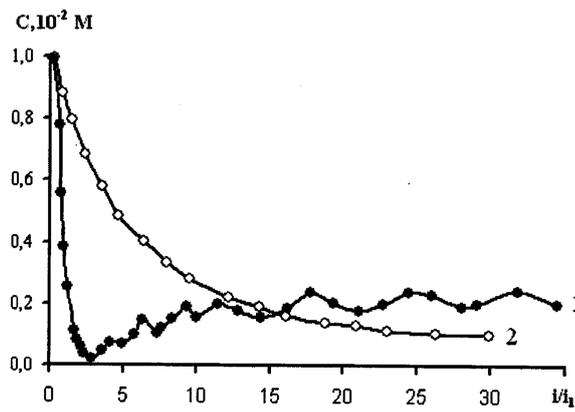
Фиг. 1



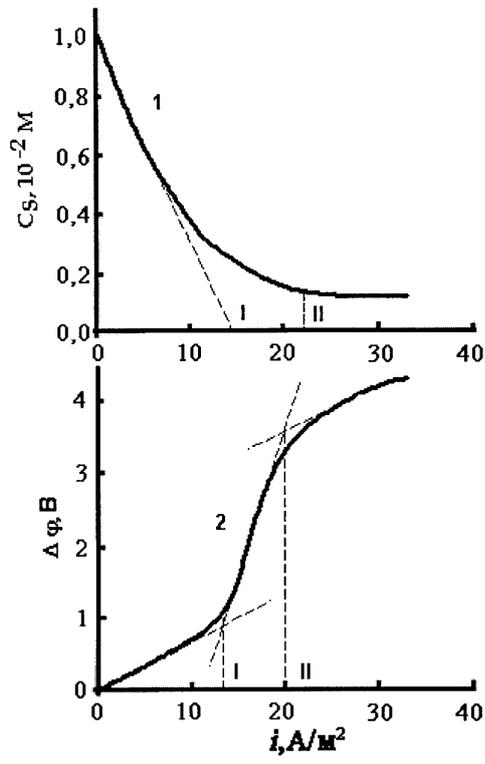
Фиг. 2



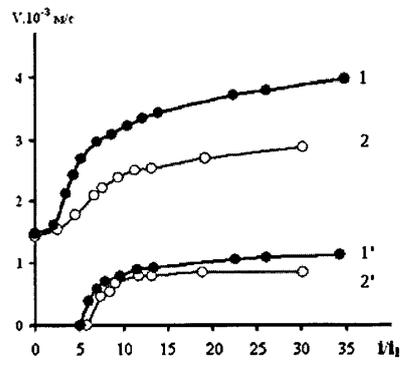
Фиг. 3



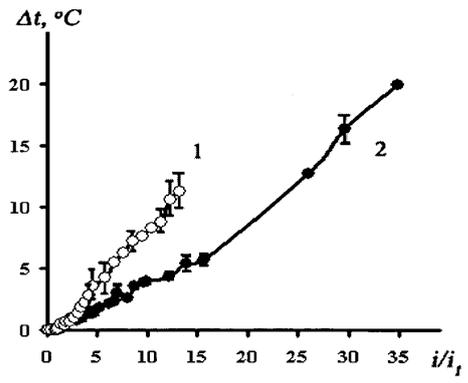
Фиг. 4



Фиг. 5.



Фиг. 6.



Фиг. 7.