

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **040270**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2022.05.16**

(21) Номер заявки  
**201992533**

(22) Дата подачи заявки  
**2018.06.20**

(51) Int. Cl. *A61M 1/16* (2006.01)  
*B01D 17/02* (2006.01)  
*B01D 61/24* (2006.01)

---

(54) **КОНСТРУКЦИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ КОЛЛЕКТОРОВ В ЭЛЕКТРОДИАЛИЗНЫХ УСТРОЙСТВАХ**

---

(31) **62/522,732**

(32) **2017.06.21**

(33) **US**

(43) **2020.05.31**

(86) **PCT/US2018/038486**

(87) **WO 2018/236992 2018.12.27**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**ЭВОКУА УОТЕР ТЕКНОЛОДЖИЗ  
ЛЛК (US)**

(72) Изобретатель:  
**Гриффис Джошуа, Дьюкс Саймон  
Пол, Лян Ли-Шиан, Уилльям Лейн  
(US), Лим Крис Ви Лун (SG)**

(74) Представитель:  
**Хмара М.В., Ильмер Е.Г., Пантелеев  
А.С., Осипов К.В., Липатова И.И.,  
Дошечкина В.В., Новоселова С.В.  
(RU)**

(56) US-A1-20160009573  
US-A1-20160346737  
WO-A1-2016172526  
US-A1-20170029288  
US-A1-20120117789  
US-A1-20070295604

(57) Устройство электрохимического разделения включает в себя первый электрод, второй электрод, пакет ячеек, включающий в себя чередующиеся обедняющие камеры и концентрирующие камеры, расположенные между первым электродом и вторым электродом, впускной коллектор, выполненный с возможностью ввода текучей среды в обедняющие камеры или в концентрирующие камеры, выпускной коллектор и одно или более из направляющего устройства для потока текучей среды, расположенного внутри впускного коллектора и имеющего поверхность, выполненную с возможностью изменения пути потока текучей среды, введенной во впускной коллектор, и направления текучей среды в обедняющие камеры или в концентрирующие камеры, и второго направляющего устройства для потока текучей среды, расположенного внутри выпускного коллектора и имеющего поверхность, выполненную с возможностью изменения пути потока текучей среды, введенной в выпускной коллектор через обедняющие камеры или через концентрирующие камеры.

**040270**  
**B1**

**040270**  
**B1**

### **Родственные заявки**

Настоящая заявка на патент испрашивает приоритет согласно разделу 35 Свода законов США, § 119(e), по предварительной заявке на патент США № 62/522732, озаглавленной "Конструкция гидравлических коллекторов в электродиализных устройствах" и поданной 21 июня 2017 г., содержание которой полностью включено в настоящую заявку посредством ссылки.

### **Область техники, к которой относится изобретение**

Аспекты и варианты осуществления, раскрытые в настоящем документе, в целом относятся к электрохимическим мембранным системам и способу их эксплуатации.

### **Уровень техники**

Устройства для очистки текучих сред при помощи электрических полей могут применяться для обработки воды и других жидкостей, содержащих растворенные ионные формы (частицы). Двумя типами устройств, обрабатывающих воду таким способом, являются устройства для электродеионизации и электродиализа. Внутри этих устройств имеются концентрирующие и разбавляющие камеры, разделенные ионоселективными мембранами. Электродиализное устройство, как правило, включает в себя чередующиеся электроактивные полупроницаемые анионо- и катионообменные мембраны. Пространства между мембранами выполнены с возможностью создания камер жидкого потока с впускными и выпускными отверстиями. Внешнее электрическое поле, наложенное при помощи электродов, вызывает образование растворенных ионов, притягиваемых к соответствующим противоиэлектродам и мигрирующих через анионо- и катионообменные мембраны. Это обычно приводит к тому, что жидкость в разбавляющей камере обедняется ионами, а жидкость в концентрирующей камере обогащается перенесенными ионами.

Устройства, аналогичные по конструкции электродиализным устройствам, могут применяться в качестве устройств обращенного электродиализа (VOЭ). В два комплекта камер подают текучие среды с различными концентрациями ионов, разделенными ионоселективными мембранами, например морской водой и речной водой. Разность концентраций и химических потенциалов приводит к возникновению разности напряжений на каждой мембране, которая при суммировании по всему количеству мембран в устройстве приводит к возникновению потенциала, генерируемого на двух электродах, ограничивающих пакет камер и мембран.

### **Раскрытие изобретения**

В соответствии с одним или более аспектами система электрохимического разделения может содержать первый электрод, второй электрод, первый модульный блок электрохимического разделения, имеющий первый пакет ячеек, образующий множество чередующихся обедняющих камер и концентрирующих камер, поддерживаемых первой рамой, при этом первый модульный блок электрохимического разделения расположен между первым электродом и вторым электродом и второй модульный блок электрохимического разделения, расположенный рядом и взаимодействующий с первым модульным блоком электрохимического разделения, имеющий второй пакет ячеек, образующий множество чередующихся обедняющих камер и концентрирующих камер, поддерживаемых второй рамой, при этом второй модульный блок электрохимического разделения расположен между первым модульным блоком электрохимического разделения и вторым электродом.

В соответствии с одним или более аспектами способ сборки системы электрохимического разделения может включать в себя монтаж первого модульного блока электрохимического разделения, имеющего первый пакет ячеек, окруженный первой рамой, в сосуде между первым электродом и вторым электродом, и монтаж второго модульного блока электрохимического разделения, имеющего второй пакет ячеек, окруженный второй рамой, в сосуде между первым модульным блоком электрохимического разделения и вторым электродом.

В соответствии с одним или более аспектами модульный блок электрохимического разделения может содержать пакет ячеек, образующий множество чередующихся обедняющих камер и концентрирующих камер, и раму, окружающую пакет ячеек и включающую в себя систему коллектора, выполненную с возможностью обеспечения потока текучей среды через пакет ячеек.

В соответствии с одним или более аспектами распределитель потока для электрохимического разделения может содержать множество первых проходов (каналов), ориентированных в первом направлении и выполненных с возможностью доставки подаваемого материала к по меньшей мере одной камере устройства электрохимического разделения, и множество вторых проходов, ориентированных во втором направлении, при этом множество вторых проходов сообщается по текучей среде со множеством первых проходов и с впускным коллектором, связанным с устройством электрохимического разделения.

В соответствии с одним или более аспектами система электрохимического разделения может содержать первый электрод, второй электрод, первый модульный блок электрохимического разделения, включающий в себя множество чередующихся обедняющих камер и концентрирующих камер, расположенных между первым и вторым электродами, и второй модульный блок электрохимического разделения, включающий в себя множество чередующихся обедняющих камер и концентрирующих камер, при этом второй модульный блок электрохимического разделения предназначен для совместного функционирования с первым модульным блоком электрохимического разделения и расположен между первым модульным блоком электрохимического разделения и вторым электродом, и распорную деталь, разме-

шенную между и рядом с первым и вторым модульными блоками электрохимического разделения, выполненную с возможностью уменьшения токовых потерь в системе.

В соответствии с одним или более вариантами осуществления модульная система электрохимического разделения, которая может также называться устройством или аппаратом электрической очистки, может повышать эффективность или общую гибкость различных процессов обработки. В некоторых вариантах осуществления перекрестноточные устройства электрохимического разделения, такие как перекрестноточные электродиализные устройства (устройства ЭД), могут быть реализованы в качестве привлекательной альтернативы традиционным рамным устройствам. Перекрестноточные устройства раскрыты в US 8627560 B2, US 8741121 B2 и US 20160346737 A1, все из которых полностью включены в настоящую заявку во всех отношениях посредством ссылки. В некоторых вариантах осуществления значения неэффективности тока в перекрестноточных устройствах электрохимического разделения могут быть уменьшены. В по меньшей мере некоторых вариантах осуществления неэффективность тока вследствие протекания тока в обход через впускные и выпускные коллекторы может быть устранена. Потребление энергии и требования к мембранам также могут быть снижены, при этом то и другое может повлиять на расходы за срок службы в различных применениях. В некоторых вариантах осуществления может достигаться по меньшей мере 85% использования мембран. Снижение требований к мембранам может, в свою очередь, привести к уменьшению стоимости изготовления, веса и требований к размерам для устройств электрохимического разделения.

В некоторых конкретных вариантах осуществления эффективность технологического процесса перекрестноточных электродиализных устройств может быть значительно повышена. В некоторых вариантах осуществления эффективность систем электрохимического разделения может быть повышена для обеспечения обессоливания жесткой воды, морской воды и соляных растворов при газонефтедобыче. В по меньшей мере некоторых вариантах осуществления стоимостная конкурентоспособность электродиализа может быть улучшена по сравнению с обратным осмосом (ОС), который в настоящее время представляет собой ведущую технологию обессоливания.

Один или более вариантов осуществления, раскрытых в настоящем документе, относятся к устройствам, способным очищать при помощи электричества текучие среды, которые могут содержаться внутри корпуса, а также способам их изготовления и применения. Жидкости или другие текучие среды, подлежащие очистке, поступают в очистное устройство и под воздействием электрического поля обрабатываются для получения обедненной ионами жидкости. Частицы из поступающих жидкостей собирают для получения ионно-концентрированной жидкости.

В соответствии с одним или более вариантами осуществления система или устройство электрохимического разделения могут быть модульными. Каждый модульный блок может, как правило, функционировать в качестве субблока общей системы электрохимического разделения. Модульный блок может включать в себя любое требуемое количество пар ячеек. В некоторых вариантах осуществления количество пар ячеек на модульный блок может зависеть от общего количества пар ячеек и проходов в устройстве разделения. Оно может также зависеть от количества пар ячеек, которые могут быть термоскрепленными и герметизированными в раме с приемлемой частотой отказов при испытаниях на перекрестные утечки и другие критерии эффективности функционирования. Количество может быть основано на статистическом анализе производственного процесса и может быть увеличено по мере улучшения управления производственным процессом. В некоторых неограничивающих вариантах осуществления модульный блок может включать в себя от приблизительно 50 до приблизительно 100 пар ячеек. Модульные блоки могут быть собраны в индивидуальном порядке и подвергнуты испытаниям по контролю качества, таким как проверка утечек, показателей разделения и падение давления, перед встраиванием в более крупную систему. В некоторых вариантах осуществления пакет ячеек может быть установлен в раме в качестве модульного блока, который можно испытывать независимо. Множество модульных блоков могут быть собраны вместе для обеспечения общего расчетного количества пар ячеек в устройстве электрохимического разделения. В некоторых вариантах осуществления способ сборки может в общем случае включать в себя помещение первого модульного блока на втором модульном блоке, помещение третьего модульного блока на первом и втором модульных блоках и повторение для получения множества модульных блоков в требуемом количестве. В некоторых вариантах осуществления сборка или отдельные модульные блоки могут быть вставлены в сосуд высокого давления для осуществления эксплуатации. Конфигурации с многопроходным потоком возможны при помещении блокирующих мембран и/или распорных деталей между модульными блоками или внутри модульных блоков. Модульный принцип может улучшать технологичность изготовления с точки зрения экономии времени и затрат. Модульность может также способствовать обслуживанию системы, обеспечивая возможность выявления неисправностей, изолирования, демонтажа и замены отдельных модульных блоков. Отдельные модульные блоки могут включать в себя коллекторные системы и системы распределения потока, способствующие процессу электрохимического разделения. Отдельные модульные блоки могут сообщаться по текучей среде друг с другом, а также с центральной коллекторной и другими системами, связанными с общим процессом электрохимического разделения.

В соответствии с одним или более вариантами осуществления эффективность систем электрохими-

ческого разделения может быть повышена. Токовые потери являются одним из потенциальных источников неэффективности. В некоторых вариантах осуществления, таких как варианты, включающие в себя перекрестноточную конструкцию, возможность утечки тока может быть устранена. Эффективность тока может быть определена как процентная доля тока, которая эффективна при перемещении ионов из разбавленного потока в концентрированный поток. В системе электрохимического разделения могут существовать различные источники неэффективности тока. Один потенциальный источник неэффективности может включать в себя ток, проходящий в обход пар ячеек за счет протекания через впускной и выпускной коллекторы разбавленного и концентрированного потоков. Открытые впускной и выпускной коллекторы могут напрямую сообщаться по текучей среде с проточными камерами и могут уменьшать падение давления в каждом пути потока. Часть электрического тока от одного электрода до другого может проходить в обход пакета пар ячеек (шунтироваться), протекая через открытые зоны. Обходной ток (ток шунтирования) уменьшает эффективность тока и увеличивает потребление энергии. Другой потенциальный источник неэффективности может включать в себя ионы, поступающие в разбавленный поток из концентрированного вследствие неидеальной селективной проницаемости ионообменных мембран. В некоторых вариантах осуществления методы, связанные с герметизацией и заливкой мембран и экранов внутри устройства, могут способствовать уменьшению утечки тока.

В одном или более вариантах осуществления обходным путем через пакет можно манипулировать, способствуя протеканию тока по прямому пути через пакет ячеек, чтобы повысить эффективность тока. В некоторых вариантах осуществления устройство электрохимического разделения может быть выполнено и расположено таким образом, чтобы один или более обходных путей были более извилистыми, чем прямой путь через пакет ячеек. В по меньшей мере некоторых вариантах осуществления устройство электрохимического разделения может быть выполнено и расположено таким образом, чтобы один или более обходных путей представляли собой большее сопротивление, чем прямой путь через пакет ячеек. В некоторых вариантах осуществления, включая модульную систему, отдельные модульные блоки могут быть выполнены с возможностью повышения эффективности тока. Модульные блоки могут быть выполнены и расположены таким образом, чтобы способствовать образованию обходного пути тока, который будет вносить вклад в эффективность тока. В неограничивающих вариантах осуществления модульный блок может включать в себя коллекторную систему и/или систему распределения потока, выполненную с возможностью повышения эффективности тока. В по меньшей мере некоторых вариантах осуществления рама, окружающая пакет ячеек в модульном блоке электрохимического разделения, может быть выполнена и расположена таким образом, чтобы способствовать образованию обходного пути тока. В некоторых вариантах осуществления обеспечение конфигурации с многопроходным потоком внутри устройства электрохимического разделения может способствовать уменьшению утечки тока. В по меньшей мере некоторых неограничивающих вариантах осуществления блокирующие мембраны и/или распорные детали могут быть вставлены между модульными блоками, чтобы направлять разбавленные и/или концентрированные потоки в конфигурации с многопроходным потоком для повышения эффективности тока. В некоторых вариантах осуществления может достигаться эффективность тока, составляющая по меньшей мере 60%. В других вариантах осуществления может достигаться эффективность тока, составляющая по меньшей мере 70%. В еще других вариантах осуществления может достигаться эффективность тока, составляющая по меньшей мере 80%. В по меньшей мере некоторых вариантах осуществления может достигаться эффективность тока, составляющая по меньшей мере 85%.

В соответствии с одним или более аспектами аппарат электрохимического разделения может содержать пакет ячеек. Пакет ячеек может дополнительно содержать множество выровненных в одну линию пар ячеек, при этом каждая из множества выровненных в одну линию пар ячеек включает в себя камеру концентрации ионов, выполненную и расположенную таким образом, чтобы обеспечивать поток текучей среды в первом направлении, и камеру обеднения ионами, выполненную и расположенную таким образом, чтобы обеспечивать поток текучей среды во втором направлении, отличном от первого направления.

В соответствии с одним или более аспектами предлагается устройство электрохимического разделения. Устройство электрохимического разделения содержит первый электрод, второй электрод, пакет ячеек, включающий в себя чередующиеся обедняющие камеры и концентрирующие камеры, расположенные между первым электродом и вторым электродом, впускной коллектор, выполненный с возможностью ввода текучей среды в обедняющие камеры или в концентрирующие камеры, выпускной коллектор и одно или более направляющее устройство для потока текучей среды, расположенное внутри впускного коллектора и имеющее поверхность, выполненную с возможностью изменения пути потока текучей среды, введенной во впускной коллектор, и направления текучей среды в обедняющие камеры или в концентрирующие камеры, и второе направляющее устройство для потока текучей среды, расположенное внутри выпускного коллектора и имеющее поверхность, выполненную с возможностью изменения пути потока текучей среды, введенной в выпускной коллектор через обедняющие камеры или через концентрирующие камеры.

В некоторых вариантах осуществления путь потока текучей среды через обедняющие камеры перпендикулярен пути потока текучей среды через концентрирующие камеры.

В некоторых вариантах осуществления направляющее устройство для потока текучей среды расположено внутри впускного коллектора и выполнено с возможностью по меньшей мере частичного блокирования тока шунтирования через впускной коллектор. Направляющее устройство для потока текучей среды может определять путь потока текучей среды через впускной коллектор между различными участками пакета ячеек, имеющего площадь поперечного сечения меньше, чем площадь поперечного сечения впускного коллектора.

В некоторых вариантах осуществления пакет ячеек имеет среднюю эффективность тока, составляющую по меньшей мере 85%.

В некоторых вариантах осуществления пакет ячеек включает в себя множество субблоков, а направляющее устройство для потока текучей среды включает в себя множество наклонных направляющих (рампы), выполненных с возможностью направления текучей среды в различные соответствующие субблоки из множества субблоков. Зазор размером менее 1 мм может быть образован между краями каждой из наклонных направляющих и пакета ячеек.

В некоторых вариантах осуществления направляющее устройство для потока текучей среды включает в себя множество каналов, изолированных по текучей среде друг от друга. Каждый из множества каналов может заканчиваться у соответствующей наклонной направляющей из множества наклонных направляющих. Сумма площадей поперечного сечения множества каналов может быть меньше, чем площадь поперечного сечения впускного коллектора.

В некоторых вариантах осуществления устройство дополнительно содержит второе направляющее устройство для потока текучей среды, расположенное внутри выпускного коллектора. Второе направляющее устройство для потока текучей среды может быть выполнено с возможностью по меньшей мере частичного блокирования тока шунтирования через выпускной коллектор.

В некоторых вариантах осуществления устройство дополнительно содержит второй пакет ячеек, образующий чередующиеся вторые обедняющие камеры и вторые концентрирующие камеры, расположенные между пакетом ячеек и вторым электродом, второй впускной коллектор, выровненный в одну линию с выпускным коллектором и выполненный с возможностью введения текучей среды из выпускного коллектора во вторые обедняющие камеры или во вторые концентрирующие камеры, третье направляющее устройство для потока текучей среды, расположенное внутри второго впускного коллектора и имеющее поверхность, выполненную с возможностью изменения пути потока текучей среды, введенной во второй впускной коллектор, и направления текучей среды во вторые обедняющие камеры или во вторые концентрирующие камеры, второй выпускной коллектор, расположенный на противоположной стороне второго пакета ячеек относительно второго впускного коллектора, и перегородку, отделяющую впускной коллектор от второго выпускного коллектора по текучей среде.

В некоторых вариантах осуществления пакет ячеек включает в себя множество субблоков, а направляющее устройство для потока текучей среды включает в себя множество перегородок, выполненных с возможностью изоляции потока текучей среды в каждый из множества субблоков от потока текучей среды в другие из множества субблоков. Направляющее устройство для потока текучей среды может дополнительно включать в себя концентрирующие каналы для текучей среды.

В некоторых вариантах осуществления направляющее устройство для потока текучей среды включает в себя криволинейный выступ, проходящий внутрь в направлении пакета ячеек от стенки впускного коллектора. Направляющее устройство для потока текучей среды может уменьшать площадь поперечного сечения впускного коллектора на первую величину на конце впускного коллектора и на вторую величину, большую, чем первая величина, в средней точке вдоль длины впускного коллектора. Направляющее устройство для потока текучей среды может быть выполнено с возможностью уменьшения скорости потока текучей среды через камеры в центральной области пакета ячеек.

В некоторых вариантах осуществления устройство дополнительно содержит второе направляющее устройство для потока текучей среды, расположенное внутри выпускного коллектора. Второе направляющее устройство для потока текучей среды может иметь площадь поперечного сечения, которая уменьшается вдоль пути потока через выпускной коллектор. Второе направляющее устройство для потока текучей среды может быть выполнено с возможностью уменьшения падения давления текучей среды через устройство.

В некоторых вариантах осуществления устройство дополнительно содержит впускное отверстие для текучей среды, имеющее поперечное сечение, отличное от поперечного сечения впускного коллектора, и гидравлический адаптер, расположенный между впускным отверстием для текучей среды и впускным коллектором. Гидравлический адаптер может включать в себя канал, имеющий первую секцию с направленным внутрь конусом, в которой ширина канала уменьшается по первой оси, и вторую секцию с направленным наружу конусом, в которой ширина канала увеличивается по второй оси, при этом первая секция и вторая секция не перекрываются. Направленный внутрь конус первой секции канала может представлять собой эллиптический конус.

В некоторых вариантах осуществления устройство дополнительно содержит рециркуляционный канал, выполненный с возможностью направления концентрата, прошедшего через концентрирующие камеры, обратно в концентрирующие камеры.

В некоторых вариантах осуществления впускной коллектор разделен на изолированные по текучей среде каналы, выполненные с возможностью направлять заданные количества текучей среды к различным участкам пакета ячеек. Изолированные по текучей среде трубки могут иметь площади поперечного сечения, выбранные таким образом, чтобы обусловить скорость потока текучей среды через камеры в центральной области пакета ячеек, меньшую, чем скорость потока текучей среды через камеры в верхней и нижней областях пакета ячеек. Изолированные по текучей среде каналы могут иметь площади поперечного сечения, выбранные таким образом, чтобы обусловить скорость потока текучей среды через камеры в верхней области пакета ячеек, по существу равную скорости потока текучей среды через камеры в нижней области пакета ячеек.

В соответствии с одним или более аспектами предлагается способ повышения эффективности тока в аппарате электрохимического разделения, включающем в себя пакет ячеек, образующий чередующиеся обедняющие камеры и концентрирующие камеры, расположенные между первым электродом и вторым электродом, при этом путь потока текучей среды через обедняющие камеры перпендикулярен пути потока текучей среды через концентрирующие камеры. Способ включает в себя установку направляющего устройства для потока текучей среды во впускном коллекторе аппарата, при этом направляющее устройство для потока текучей среды имеет поверхность, выполненную с возможностью изменения пути потока текучей среды, введенной во впускной коллектор, направления текучей среды в одно из множества обедняющих камер или множества концентрирующих камер и по меньшей мере частичного блокирования тока шунтирования через впускной коллектор.

В некоторых вариантах осуществления способ дополнительно включает в себя повышение равномерности потока текучей среды через пакет ячеек посредством установки гидравлического адаптера на впуске впускного коллектора, при этом гидравлический адаптер включает в себя канал, имеющий первую секцию с направленным внутрь конусом, в котором ширина канала уменьшается по первой оси, и вторую секцию с направленным наружу конусом, в котором ширина канала увеличивается по второй оси, при этом первая секция и вторая секция не перекрываются. Первая ось может быть перпендикулярна второй оси.

В некоторых вариантах осуществления способ дополнительно включает в себя уменьшение падения давления в аппарате за счет установки конического направляющего устройства для потока текучей среды в выпускном коллекторе аппарата.

В некоторых вариантах осуществления способ дополнительно включает в себя установку второго направляющего устройства для потока текучей среды в выпускном коллекторе аппарата, при этом второе направляющее устройство для потока текучей среды имеет криволинейную поверхность, которая сужает путь потока через выпускной коллектор на первую величину в средней точке вдоль длины выпускного коллектора и на вторую величину, меньшую, чем первая величина, вблизи от конца выпускного коллектора.

В соответствии с одним или более аспектами предлагается электрохимическое мембранное устройство. Электрохимическое мембранное устройство содержит первый электрод, второй электрод, пакет ячеек, включающий в себя чередующиеся обедняющие камеры и концентрирующие камеры, расположенные между первым электродом и вторым электродом, ионоселективные мембраны, отделяющие обедняющие камеры от концентрирующих камер, впускной коллектор, выполненный с возможностью ввода текучей среды в обедняющие камеры или в концентрирующие камеры, выпускной коллектор и одно или более из направляющего устройства для потока текучей среды, расположенного внутри впускного коллектора и имеющего поверхность, выполненную с возможностью изменения пути потока текучей среды, введенной во впускной коллектор, и направления текучей среды в обедняющие камеры или в концентрирующие камеры, и второго направляющего устройства для потока текучей среды, расположенного внутри выпускного коллектора и имеющего поверхность, выполненную с возможностью изменения пути потока текучей среды, введенной в выпускной коллектор через обедняющие камеры или через концентрирующие камеры.

В некоторых вариантах осуществления устройство представляет собой электродиализное устройство для очистки текучих сред при помощи электрических полей.

В некоторых вариантах осуществления устройство представляет собой устройство обращенного электродиализа для генерирования электроэнергии на основе двух или более потоков текучей среды с различными концентрациями ионов.

Также другие аспекты, варианты осуществления и преимущества этих иллюстративных аспектов и вариантов осуществления подробно раскрыты ниже.

Варианты осуществления, раскрытые в настоящем документе, могут сочетаться с другими вариантами осуществления способом, соответствующим по меньшей мере одному из принципов, раскрытых в настоящем документе, при этом ссылки на "вариант осуществления", "некоторые варианты осуществления", "альтернативный вариант осуществления", "различные варианты осуществления", "один вариант осуществления" и т.п. необязательно являются взаимноисключающими и предназначены для указания на то, что конкретные описанные признаки, структура или характеристика могут быть включены в по меньшей мере один вариант осуществления. Необязательно все такие термины, появляющиеся в тексте на-

стоящего документа, относятся к одному и тому же варианту осуществления.

### **Краткое описание чертежей**

Приложенные чертежи не предназначены для выполнения в соответствии с масштабом. На чертежах каждый идентичный или почти идентичный компонент, изображенный на различных фигурах, представлен одним и тем же позиционным обозначением. В целях обеспечения ясности не каждый компонент может быть обозначен на каждом чертеже.

На фиг. 1А показан пример субблока электродиализного устройства.

На фиг. 1В показан пакет из четырех субблоков, представленных на фиг. 1А, перед установкой в корпусе.

На фиг. 1С показано собранное электродиализное устройство с прозрачным кожухом.

На фиг. 1D показано собранное электродиализное устройство с непрозрачным кожухом.

На фиг. 1Е показана вычислительная гидродинамическая (ВГД) модель электродиализного устройства из четырех субблоков.

На фиг. 2А изображена текучая среда, подаваемая в разбавляющие камеры электродиализного устройства по наружной трубе к переходному соединению.

На фиг. 2В изображена текучая среда, распределяемая по всем разбавляющим камерам электродиализного устройства параллельно через впускной коллектор.

На фиг. 2С изображена однопроходная конфигурация электродиализного устройства.

На фиг. 2D изображена двухпроходная конфигурация электродиализного устройства.

На фиг. 3 изображен неидеальный электродиализ с неэффективностью и потерей воды.

На фиг. 4 изображена упрощенная модель для протекания тока в разбавляющей или концентрической ячейке электродиализного устройства.

На фиг. 5 представлена сетевая модель электрической резистивной схемы для моделирования протекания тока в электродиализном устройстве.

На фиг. 6 изображено вычисление электрического сопротивления току шунтирования для конструкции с треугольными портами.

На фиг. 7 представлен график, иллюстрирующий пример изменения эффективности тока в зависимости от местоположения пары ячеек в проходе.

На фиг. 8 представлен график, иллюстрирующий пример средней эффективности тока как функции количества пар ячеек в проходе.

На фиг. 9 представлен график, иллюстрирующий пример средней эффективности тока как функции концентрации разбавленного подаваемого материала и соотношения средней концентрации в концентрате/средней концентрации в разбавленном потоке.

На фиг. 10А представлено поперечное сечение базовой конструкции электродиализного устройства.

На фиг. 10В изображены результаты ВГД-моделирования потока в пакете из четырех субблоков базовой конструкции, показанной на фиг. 10А.

На фиг. 10С представлен график, иллюстрирующий вертикальное положение в зависимости от расхода потока через пары ячеек в базовой конструкции, показанной на фиг. 10А.

На фиг. 11А изображены результаты ВГД-моделирования потока в самой верхней паре ячеек в базовой конструкции, показанной на фиг. 10А.

На фиг. 11В изображены результаты ВГД-моделирования потока в центральной паре ячеек в базовой конструкции, показанной на фиг. 10А.

На фиг. 11С изображены результаты ВГД-моделирования потока в самой нижней паре ячеек в базовой конструкции, показанной на фиг. 10А.

На фиг. 12А изображены элементы направления потока для электродиализного устройства в виде трубчатых каналов.

На фиг. 12В изображены элементы направления потока для электродиализного устройства в виде концентрических трубчатых каналов с перегородками.

На фиг. 12С изображены другие элементы направления потока для электродиализного устройства в виде концентрических трубчатых каналов с перегородками.

На фиг. 12D изображены элементы направления потока для электродиализного устройства в виде параллельных каналов с перегородками и наклонными направляющими.

На фиг. 12Е изображены другие элементы направления потока для электродиализного устройства в виде параллельных каналов с перегородками и наклонными направляющими.

На фиг. 13А изображена конфигурация коллектора в базовой конструкции, показанной на фиг. 10А.

На фиг. 13В изображен модифицированный коллектор, включающий в себя элементы, увеличивающие эффективность тока и улучшающие распределение потока.

На фиг. 14 представлена диаграмма, иллюстрирующая пример эффективности тока в зависимости от местоположения пары ячеек в единственном проходе электродиализного устройства с четырьмя гальванически развязанными субблоками.

На фиг. 15А изображены виды сбоку, спереди, сверху и в изометрии коллекторной вставки для электродиализного устройства, включающего в себя каналы для текучей среды, образованные перего-

родками с линейным профилем и эллиптическими наклонными направляющими.

На фиг. 15В изображена ВГД-модель электродиализного устройства, включающего в себя коллектор, показанный на фиг. 15А.

На фиг. 15С изображено сравнение между коллектором базовой конструкции, показанной на фиг. 10, и коллектором, показанным на фиг. 15А.

На фиг. 15D изображены виды однокомпонентной модификации коллекторной вставки, показанной на фиг. 15А, для применения в электродиализных устройствах с восемью субблоками.

На фиг. 15Е изображены виды двухкомпонентной модификации коллекторной вставки, показанной на фиг. 15А, для применения в электродиализных устройствах с восемью субблоками.

На фиг. 15F изображено сравнение между коллектором электродиализного устройства из восьми субблоков, имеющего базовую конструкцию, и коллектором электродиализного устройства из восьми субблоков, включающего в себя четыре коллекторные вставки, показанные на фиг. 15D.

На фиг. 16А изображено ВГД-моделирование составляющей Z скорости через центральные плоскости ZY, а также через верхнюю, среднюю и нижнюю плоскости ZX для базовой и оптимизированной конструкций при расходе потока  $4 \text{ м}^3/\text{час}$ .

На фиг. 16B изображено ВГД-моделирование составляющей Z скорости через центральные плоскости ZY, а также через верхнюю, среднюю и нижнюю плоскости ZX для базовой и оптимизированной конструкций при расходе потока  $10 \text{ м}^3/\text{час}$ .

На фиг. 16C изображено ВГД-моделирование составляющей Z скорости через центральные плоскости ZY для базовой и оптимизированной конструкций, показанных на фиг. 15F.

На фиг. 16D изображена эффективность технологического процесса в зависимости от тока (расхода потока текучей среды) для базовой и оптимизированной конструкций, показанных на фиг. 15F.

На фиг. 17А представлен график результатов ВГД-моделирования величин расхода потока на пару ячеек при различных высотах (положениях на оси Y) для базовой и оптимизированной конструкций электродиализного устройства при расходе потока  $4 \text{ м}^3/\text{час}$ .

На фиг. 17B представлен график результатов ВГД-моделирования величин расхода потока на пару ячеек при различных высотах (положениях на оси Y) для базовой и оптимизированной конструкций электродиализного устройства при расходе  $10 \text{ м}^3/\text{час}$ .

На фиг. 18А представлена тепловая карта распределения падения давления по ячейкам в базовой конструкции электродиализной системы.

На фиг. 18B представлена тепловая карта распределения падения давления по ячейкам в оптимизированной конструкции электродиализной системы.

На фиг. 19А изображены положения измерения для падения давления в зависимости от расхода потока при ВГД-моделировании базовой и оптимизированной конструкций электродиализной системы.

На фиг. 19B представлен график результатов ВГД-моделирования падения давления в зависимости от расхода для различных субблоков в базовой конструкции электродиализной системы.

На фиг. 19C представлен график результатов ВГД-моделирования падения давления в зависимости от расхода для различных субблоков в оптимизированной конструкции электродиализной системы. На фиг. 19C представлен график результатов ВГД-моделирования падения давления на всем модуле устройства ЭДИ как в базовой, так и в оптимизированной конструкциях электродиализной системы.

На фиг. 20А изображено поперечное сечение первоначальной конструкции коллектора электродиализного устройства.

На фиг. 20B изображено поперечное сечение альтернативной конструкции коллектора электродиализного устройства.

На фиг. 20C изображено поперечное сечение альтернативной конструкции коллектора электродиализного устройства.

На фиг. 20D изображено поперечное сечение альтернативной конструкции коллектора электродиализного устройства.

На фиг. 21 показаны моделируемые эффективности процесса для конструкций коллектора, представленных на фиг. 20А-20С.

На фиг. 22 изображены результаты ВГД-моделирования электродиализного устройства, представленного на фиг. 20 в ячейках наверху, в средней части и внизу пакета ячеек электродиализного устройства.

На фиг. 23А представлено поперечное сечение электродиализного модуля с четырьмя субблоками в двухпроходной конфигурации.

На фиг. 23B представлено поперечное сечение электродиализного модуля с четырьмя субблоками в двухпроходной конфигурации с криволинейными выступающими вставками, установленными в коллекторах.

На фиг. 24А изображены результаты моделирования распределения давления через центр всего модуля, представленного на фиг. 23А.

На фиг. 24B изображены результаты моделирования распределения давления через центр всего модуля, представленного на фиг. 23B.

На фиг. 25 изображены результаты моделирования распределения скорости через центр всего модуля, представленного на фиг. 23В.

На фиг. 26 изображены результаты моделирования профилей массового потока (на пару ячеек) через модули, представленные на фиг. 23А и фиг. 23В.

На фиг. 27 изображены несколько примеров возможных выпускных коллекторных вставок.

На фиг. 28 представлено поперечное сечение первого прохода электродиализного модуля с четырьмя субблоками в двухпроходной конфигурации с криволинейной выступающей вставкой, установленной во впускном коллекторе, и прямой конусной вставкой в выпускном коллекторе.

На фиг. 29 изображены результаты моделирования профилей массового потока (на пару ячеек) через модули, представленные на фиг. 28 с выпускной коллекторной вставкой и без нее.

На фиг. 30 представлен график эффективности процесса в зависимости от соотношения средних концентраций в концентрате и разведенном растворе в электродиализном устройстве, изображенном на фиг. 20В, и электродиализном устройстве, изображенном на фиг. 23В.

На фиг. 31А изображен поток текучей среды через выпускной коллектор электродиализного устройства без выпускной коллекторной вставки.

На фиг. 31В изображен поток текучей среды через выпускной коллектор электродиализного устройства с наклонной выпускной коллекторной вставкой.

На фиг. 32А представлена таблица, иллюстрирующая воздействие наклонной профильной выпускной вставки на падение давления на электродиализном модуле в первом примере.

На фиг. 32В представлена таблица, иллюстрирующая воздействие наклонной профильной коллекторной вставки на падение давления на электродиализном модуле во втором примере.

На фиг. 33 представлено поперечное сечение электродиализного устройства, имеющего гидравлический адаптер, расположенный между впускным коллектором и наружным трубопроводом.

На фиг. 34А представлен вид в изометрии базового варианта осуществления неоптимизированного гидравлического адаптера электродиализного устройства.

На фиг. 34В представлен частично прозрачный вид гидравлического адаптера, показанного на фиг. 34А.

На фиг. 34С представлен вид сверху вниз гидравлического адаптера, показанного на фиг. 34А.

На фиг. 34Д представлен вид снизу вверх гидравлического адаптера, показанного на фиг. 34А.

На фиг. 34Е представлено поперечное сечение через первую ось гидравлического адаптера, показанного на фиг. 34А.

На фиг. 34F представлено поперечное сечение через вторую ось гидравлического адаптера, показанного на фиг. 34А.

На фиг. 35А представлен вид в изометрии варианта осуществления усовершенствованного гидравлического адаптера для электродиализного устройства.

На фиг. 35В представлен частично прозрачный вид гидравлического адаптера, показанного на фиг. 35А.

На фиг. 35С представлено поперечное сечение через первую ось гидравлического адаптера, показанного на фиг. 36А.

На фиг. 35D представлено поперечное сечение через вторую ось гидравлического адаптера, показанного на фиг. 35А.

На фиг. 36А изображены результаты моделирования потока текучей среды через впускной коллектор электродиализного устройства, включающего в себя гидравлический адаптер, показанный на фиг. 34А.

На фиг. 36В изображены результаты моделирования потока текучей среды через впускной коллектор электродиализного устройства, включающего в себя гидравлический адаптер, показанный на фиг. 35А.

На фиг. 37А изображены результаты моделирования распределения составляющей Z скорости распределения текучей среды через ячейки электродиализного устройства, включающего в себя гидравлический адаптер, показанный на фиг. 34А.

На фиг. 37В изображены результаты моделирования распределения составляющей Z скорости распределения текучей среды через ячейки электродиализного устройства, включающего в себя гидравлический адаптер, показанный на фиг. 35А.

### **Осуществление изобретения**

Аспекты и варианты осуществления, раскрытые в настоящем документе, не ограничены деталями конструкции и расположением компонентов, представленными в нижеследующем описании или изображенными на приложенных чертежах. Аспекты и варианты осуществления, раскрытые в настоящем документе, выполнены с возможностью принятия других вариантов осуществления и их применения на практике или реализации различными путями.

Электродеионизация (ЭДИ) представляет собой процесс, устраняющий одну или более ионизированных или ионизируемых частиц (или, по меньшей мере, уменьшающий их количество) из воды с использованием электрически активной среды и разности электрических потенциалов для воздействия на перенос ионов. Электрически активная среда, как правило, служит для поочередного улавливания и удаления ионных и/или ионизируемых частиц и в некоторых случаях содействия переносу ионов, который

может происходить непрерывно при помощи ионных или электронных механизмов замещения. Устройства ЭДИ могут содержать электрохимически активную среду с постоянным или временным зарядом и работать с порциями периодически, непрерывно и/или даже в режимах с изменением полярности. Устройства ЭДИ могут работать, активизируя одну или более электрохимических реакций, специально рассчитанных на достижение или улучшение эксплуатационных характеристик. Кроме того, такие электрохимические устройства могут содержать электрически активные мембраны, такие как полупроницаемые или избирательно проницаемые ионообменные или биполярные мембраны. Устройства непрерывной электродеионизации (НЭДИ) представляют собой устройства электродеионизации (ЭДИ), известные специалистам в данной области техники, работающие способом, при котором очистка воды может происходить непрерывно, в то время как ионообменный материал непрерывно повторно перезаряжается. Методы НЭДИ могут включать в себя такие процессы, как непрерывная деионизация, электродиализ в наполненных ячейках или электродиарез. В условиях управляемых напряжения и солёности молекулы воды в системах НЭДИ могут расщепляться, образуя ионы или частицы водорода или гидроксония и ионы или частицы гидроксида или гидроксила, которые могут регенерировать ионообменную среду в устройстве и тем самым облегчать высвобождение из нее захваченных частиц. Таким образом, поток воды, подлежащей обработке, можно непрерывно очищать без необходимости в химической перезарядке ионообменной смолы.

Устройства электродиализа (ЭД) работают на основе принципа, аналогичного НЭДИ, за исключением того, что устройства ЭД, как правило, не содержат электроактивной среды между мембранами. Ввиду отсутствия электроактивной среды подаваемые воды низкой солёности могут затруднять операцию электродиализа из-за повышенного электрического сопротивления. Кроме того, поскольку операция электродиализа на подаваемых водах высокой солёности может приводить к повышенному потреблению электрического тока, электродиализные аппараты наиболее эффективно применяются на исходных водах промежуточной солёности. Поскольку в системах на основе электродиализа отсутствует электроактивная среда, расщепление воды неэффективно и работы в этом режиме обычно избегают.

В устройствах НЭДИ и ЭД множество соседних ячеек или камер, как правило, разделены избирательно проницаемыми мембранами, которые обеспечивают возможность прохождения либо положительно, либо отрицательно заряженных частиц, но, как правило, не обоих видов. В таких устройствах камеры разбавления или обеднения, как правило, отделены промежутками от концентрирующих камер или камер концентрирования. В некоторых вариантах осуществления выражение "пара ячеек" может относиться к паре соседних концентрирующей и разбавляющей камер. По мере того как вода протекает через камеры обеднения, ионные и другие заряженные частицы, как правило, втягиваются в концентрирующие камеры под действием электрического поля, такого как поле постоянного тока. Положительно заряженные частицы притягиваются к катоду, как правило, находящемуся на одном конце пакета из множества камер обеднения и концентрирования, а отрицательно заряженные частицы аналогичным образом притягиваются к аноду таких устройств, как правило, находящемуся на противоположном конце пакета камер. Электроды, как правило, заключены в электролитных камерах, которые обычно частично изолированы от сообщения по текучей среде с камерами обеднения и/или концентрирования. Как только они оказываются в камере концентрирования, заряженные частицы, как правило, захватываются барьером из избирательно проницаемой мембраны, по меньшей мере частично ограничивающим камеру концентрирования. Например, в типичном случае предотвращается миграция анионов далее к катоду из камеры концентрирования посредством катионоселективной мембраны. Будучи уловленными в концентрирующей камере, захваченные заряженные частицы могут быть удалены в потоке концентрата.

В устройствах НЭДИ и ЭД к ячейкам, как правило, прикладывается поле постоянного тока от источника напряжения и электрического тока, подаваемых на электроды (анод или положительный электрод и катод или отрицательный электрод). Питание самого источника напряжения и тока (собирающего именуемого "источником питания") можно осуществлять с помощью множества различных средств, таких как источник питания переменного тока или, например, источник питания, получаемый от энергии солнца, ветра или волн. На границах раздела электрод/жидкость происходят электрохимические реакции в полужайке, инициирующие и/или облегчающие перенос ионов через мембраны и камеры. Специфическими электрохимическими реакциями, которые происходят на границах раздела электрод/жидкость, можно до некоторой степени управлять при помощи концентрации солей в специализированных камерах, где заключены электродные узлы. Например, материал, подаваемый в анодные электролитные камеры, имеющий высокую концентрацию хлорида натрия, будет проявлять тенденцию к образованию газообразного хлора и водород-ионов, при этом такой материал, подаваемый в катодную электролитную камеру, будет проявлять тенденцию к образованию газообразного водорода и гидроксид-ионов. Вообще говоря, водород-ионы, образующиеся в анодной камере, будут ассоциироваться со свободными анионами, такими как хлорид-ионы, сохраняя нейтральность заряда и создавая раствор соляной кислоты, и аналогичным образом гидроксид-ионы, образующиеся в катодной камере, будут ассоциироваться со свободными катионами, такими как ионы натрия, сохраняя нейтральность заряда и создавая раствор гидроксида натрия. Продукты реакции электродных камер, такие как образующиеся газообразный хлор и гидроксид натрия, можно использовать в процессе по мере необходимости в целях дезинфекции, в целях

очистки и прочистки мембран, а также в целях регулирования рН.

Для различных типов устройств электрохимической деионизации, включая, но не ограничиваясь ими, устройства электродиализа (ЭД) и электродеионизации (ЭДИ), применяются пластинчато-рамная и спирально-навитая конструкции. Имеющиеся в продаже устройства ЭД, как правило, имеют пластинчато-рамную конструкцию, а устройства ЭДИ выпускаются и в пластинчато-рамной, и в спиральной конфигурациях.

В предшествующих патентах были раскрыты "перекрестноточные" устройства электродиализа (ЭД) с разбавленными и концентрированными потоками, протекающими в перпендикулярных направлениях. Пакет пар ячеек в устройстве может быть собран из одного или более модульных блоков, называемых субблоками. На фиг. 1А показан пример субблока. На фиг. 1В показан пакет из четырех субблоков перед установкой в корпусе. Используемый в настоящем документе термин "пакет ячеек" относится к единственному субблоку или к пакету из множества субблоков. На фиг. 1С показано собранное электродиализное устройство с прозрачным кожухом. На фиг. 1D показано собранное электродиализное устройство с непрозрачным кожухом. На фиг. 1Е показана вычислительная гидродинамическая (ВД) модель электродиализного устройства из четырех субблоков.

Текущая среда может подаваться в разбавляющие камеры электродиализного устройства по наружной трубе к переходному соединению, как показано на фиг. 2А. Текущая среда затем распределяется по всем разбавляющим камерам параллельно через впускной коллектор, как изображено на фиг. 2В. Аналогичным образом продукт из всех разбавляющих камер может быть собран в выпускном коллекторе и доставлен по переходному соединению к наружной трубе. Втекание и вытекание потока из концентрирующих камер может быть организовано аналогично этому. Эту конфигурацию потока, как правило, называют "однопроходной". Однопроходная конфигурация электродиализного устройства изображена на фиг. 2С.

Протекание потока через разбавляющие и концентрирующие камеры может быть организовано змейкой при помощи перегородок. На фиг. 2D показана "двухпроходная" организация протекания для разбавляющего потока, например, за счет добавления перегородок, при этом может достигаться большее количество проходов. Несколько проходов в устройстве увеличивают длину пути потока, время пребывания, перенос ионов и удаление ионов, по-прежнему поддерживая скорость в оптимальном технологическом диапазоне.

Эффективность тока для пары ячеек в электродиализном устройстве может определяться следующим образом:

$$\eta_i = \frac{\left[ q_{di} \left( \frac{1}{2} \sum_i C_i |z_i| \right)_{in} - q_{do} \left( \frac{1}{2} \sum_i C_i |z_i| \right)_{out} \right]}{I} F = 100\% \quad (1)$$

где  $q_{di}$  - расход потока на камеру разбавления на впуске,

$q_{do}$  - расход потока на камеру разбавления на выпуске,

$d$  - концентрация ионов  $i$ ,

$\eta_i$  - эффективность тока,

$|z_i|$  - абсолютная величина валентности иона  $i$  (например,  $z_i-1$  для  $Na^+$ ),

$F$  - постоянная Фарадея=96 485 кулон/эквивалент,

$I$  - ток,

нижние индексы  $in$  - на входе,  $out$  - на выходе.

В идеальном электродиализном устройстве весь подаваемый ток протекает через каждую пару ячеек последовательно, ионообменные мембраны являются идеально селективными, механические перекрестные утечки между разбавленным потоком и концентратом отсутствуют и нет внешних утечек. Поэтому эффективность тока, определяемая уравнением 1, равна 100%.

В реальном электродиализном устройстве эффективность тока не составляла бы 100%, поскольку мембраны не являются идеально селективными. Катионообменная мембрана с селективностью 98%, например, обеспечивала бы приблизительно 98% тока, переносимого катионами, передаваемыми из разбавленного потока в концентрат, и 2% тока, переносимого анионами, передаваемыми обратно в разбавленный поток из концентрата. Эффективность тока поэтому уменьшилась бы приблизительно на 2%. Механические перекрестные утечки из концентрата в разбавленный поток также уменьшили бы результирующий коэффициент переноса ионов из разбавленного потока и, таким образом, общую эффективность тока. Кроме того, поскольку растворы, втекающие и вытекающие из пары ячеек через впускной и выпускной коллекторы, являются проводящими, часть тока будет проходить в обход пары ячеек, протекая через коллекторы; она не участвовала бы в переносе ионов, и эффективность тока снизилась бы соответственно. На фиг. 3 показан неидеальный электродиализ с местами обходного пути тока, указанными пунктирными овалами.

Модель резистивной схемы была разработана для моделирования обходного пути тока и оценки эффективности тока при различных условиях работы в электродиализном устройстве. Модель упрощен-

но предполагала, что поток тока в ячейке разбавленного потока или концентрата таков, как показано на фиг. 4, причем стрелки указывают протекание тока. Модель электрической схемы для пары ячеек показана на фиг. 5. Источники напряжения VDP представляют потенциалы Доннана на мембранах, которые должны быть включены в падение напряжения на паре ячеек.

Электрическое сопротивление в канале электродиализного устройства может быть вычислено при помощи уравнения 2 на фиг. 6. Сопротивление возрастает по мере уменьшения ширины канала, увеличения расстояния между коллекторами и активной площадью мембраны, уменьшения проводимости жидкости и/или уменьшения толщины канала. Электрическое сопротивление в слое коллектора, соответствующем паре ячеек, может быть вычислено при помощи уравнения 3 на фиг. 6. Сопротивление возрастает по мере уменьшения площади поперечного сечения коллектора, уменьшения проводимости жидкости и/или возрастания толщины слоя коллектора.

По мере возрастания электрических сопротивлений каналов и/или коллекторов ток, проходящий в обход каждой пары ячеек, уменьшается, при этом большая доля полного тока будет предпочтительно протекать через активную площадь мембраны, тем самым становясь эффективной при переносе ионов.

Были выполнены имитационные модели, которые указывают на то, что наибольшая эффективность тока достигается в единственном субблоке в проходе. Эффективность тока изменяется внутри прохода и является наибольшей в паре ячеек на концах и наименьшей в паре ячеек посередине (см. фиг. 7). Средняя эффективность тока уменьшается по мере увеличения количества пар ячеек в проходе (см. фиг. 7 и 8). Эффективность тока является функцией подаваемого тока, значений расхода разбавленного потока и концентрата, концентраций разбавляемого потока и концентрата на впуске и температуры (см. фиг. 8). Эффективность тока уменьшается линейно по мере увеличения отношения средней концентрации концентрата к средней концентрации разбавляемого потока (см. фиг. 9). Средняя концентрация представляет собой математическое среднее концентраций на впуске и выпуске соответственно.

ВГД-модель была разработана для раскрытого выше однопроходного перекрестноточного электродиализного устройства из четырех субблоков, изображенного на фиг. 2А и 2В. Эта модель будет по существу рассматриваться в качестве базовой конструкции.

На фиг. 10А показано центральное поперечное сечение базовой конструкции. Для упрощения вычислений каждый субблок из 100 пар ячеек был разделен на 10 секций; каждая секция представляет 10 пар ячеек. Моделирование потока выполнялось затем на основе этой геометрии. Как видно из графика, изображенного на фиг. 10В, составляющая  $Z$  скорости потока через каждую ячейку в плоскости  $ZY$  является неравномерной, что приводит к изменению расхода потока на пару ячеек, как показано на фиг. 10С, при этом расход потока является наименьшим в верхних ячейках возле входа текучей среды в коллектор.

Распределение скорости по оси  $Z$  было дополнительно охарактеризовано с использованием плоскостей сечения  $ZX$ , проходящих через верхнюю, среднюю и нижнюю часть пакета (фиг. 11А-11С), при этом суммарная скорость по оси  $Z$  в верхнем сечении составляет приблизительно половину скорости в нижней части.

Как показано на фиг. 7, эффективность тока и тем самым доля тока, протекающая через мембраны, является наибольшей в парах ячеек на верхнем и нижнем концах прохода. Более высокая плотность тока будет увеличивать риск как ограничения, так и масштабирования тока в зонах с низкой скоростью потока. Кроме того, более низкий расход потока через начальные разбавляющие ячейки прохода будет предотвращать работу этих ячеек при их наибольшей эффективности тока для удаления солей. Поэтому было бы предпочтительно обеспечить, чтобы все пары ячеек были оптимизированы по потоку.

Как описано выше, долю подаваемого тока, проходящего в обход пакета пар ячеек через коллекторы, можно уменьшить путем увеличения электрического сопротивления в каналах и коллекторах. Были предложены предшествующие конструкции, которые уменьшают протекание тока в обход (байпасирование) путем уменьшения площади поперечного сечения впускного и выпускного коллекторов. Хотя эти изменения эффективны при повышении эффективности тока, они приводят к увеличению падения давления в коллекторах и на электродиализном устройстве.

На фиг. 7 и 8 показано, что эффективность тока уменьшается при увеличении количества пар ячеек, имеющих электрическую связь с общим комплектом коллекторов.

В идеальной конструкции гидравлического коллектора значения сопротивления текучей среды будут сведены к минимуму, в то время как электрическое сопротивление току шунтирования будет максимально увеличено. Этого можно достичь, управляя субблоками, соединенными параллельно по текучей среде, но электрически изолированными друг от друга за исключением связи через пары ячеек.

Технические проблемы состоят, таким образом, в уменьшении протекания тока в обход внутри отдельного субблока, уменьшении протекания тока в обход через гидравлические коллекторы между субблоками, обеспечении достаточного потока к первым парам ячеек в проходе, улучшении распределения потока по всем парам ячеек в проходе и уменьшении до минимума давления, необходимого для управления таким электродиализным устройством. Аспекты и варианты осуществления, раскрытые в настоящем документе, включают в себя структуры и способы для решения этих проблем.

Аспекты и варианты осуществления, раскрытые в настоящем документе, включают в себя элементы направления потока, которые могут быть расположены внутри гидравлических коллекторов электродиа-

лизных устройств, чтобы максимально увеличить эффективность тока, нормализовать распределение потока и свести к минимуму падение давления.

В качестве термина, используемого в настоящем документе, элемент направления потока или направляющее устройство для потока текучей среды может включать в себя или состоять из любых из каналов, желобков, наклонных направляющих, труб, трубок, перегородок, лопаток или других вариантов осуществления. Профиль этих элементов может представлять собой математическую функцию, например линейную, полиномиальную, тригонометрическую, логарифмическую, коническое сечение, или быть свободно порожденным.

Конструкции гидравлических элементов могут состоять из вышеназванных элементов, образующих один или более каналов, направленных к одному или более субблокам, где поток внутри каждого канала может быть дополнительно подразделен путем использования дополнительных элементов направления потока.

Изготовление этих элементов может осуществляться при помощи любого из ряда методов, включая без ограничения 3D-печать, обработку на станке с ЧПУ или литьевое формование.

Примеры направляющего устройства для потока текучей среды могут включать в себя трубчатые каналы для текучей среды (фиг. 12A), концентрические трубчатые каналы 1215 для текучей среды с перегородками 1205 (фиг. 12B и 12C) и параллельные каналы 1225 со стенками 1220 и наклонными направляющими 1230 (фиг. 12D и 12E).

Как показано на фиг. 12A, пары перегородок 1205 могут определять различные области 1210 подачи текучей среды вдоль длины направляющего устройства для потока текучей среды. В других вариантах осуществления, например, как показано на фиг. 12B, в единственную область 1210 подачи текучей среды могут быть включены несколько перегородок 1205. Каждый из концентрических трубчатых каналов 1215 (которые в других вариантах осуществления могут иметь поперечные сечения, отличные от круговых) может подавать текучую среду к другой области 1210 подачи текучей среды. В некоторых вариантах осуществления самая нижняя область 1210L подачи текучей среды может не включать в себя канал 1215 для текучей среды. Каждая область 1210 подачи текучей среды может подавать текучую среду к единственному субмодулю или субблоку (SB1, SB2, SB3, SB4 на фиг. 13A и 13B) пакета ячеек. Размеры, например диаметры, концентрических трубчатых каналов 1215 и зазоры между соседними концентрическими трубчатыми каналами 1215 могут быть выбраны для подачи заданных количеств текучей среды к различным субблокам или различным областям пакета ячеек. В некоторых вариантах осуществления размеры концентрических трубчатых каналов 1215 выбирают таким образом, чтобы одинаковая или по существу одинаковая величина потока текучей среды или скорости потока текучей среды была обеспечена для различных субблоков или различных областей пакета ячеек. В других вариантах осуществления размеры концентрических трубчатых каналов 1215 выбирают таким образом, чтобы одинаковая или по существу одинаковая величина потока текучей среды или скорости потока текучей среды была обеспечена для субнабора, например, субблоков или областей в верхней и нижней областях пакета ячеек, в то время как другая, например, меньшая величина потока текучей среды или скорости потока текучей среды обеспечивается для других субблоков или областей в пакете ячеек, например субблоков или областей в центральной области пакета ячеек.

Как показано на фиг. 12D, варианты осуществления направляющего устройства для потока текучей среды могут включать в себя наклонные направляющие 1230, расположенные на нижних концах каналов 1225, ограниченных стенками 1220. Каналы 1225 могут завершаться на наклонных направляющих 1230. Наклонные направляющие 1230 могут быть образованы областями стенок 1220, ограничивающих каналы 1225, которые искривляются в направлении пакета ячеек с осью кривизны со стороны стенок 1220, ближней к пакету ячеек (фиг. 12D), или с осью кривизны со стороны стенок 1220, противоположной относительно пакета ячеек (фиг. 12E). В некоторых вариантах осуществления, как показано на фиг. 13B, наклонные направляющие 1230 могут представлять собой горизонтально расположенные пластины, которые стыкуются со стенками 1220 под углами 90°. В других вариантах осуществления, например, как показано на фиг. 15A, стенки 1220 могут образовывать наклонные направляющие 1230 путем искривления вдоль всей или по существу всей своей длины. Как также показано на фиг. 15A, дополнительная стенка 1220 может разделять области 1210 подачи текучей среды, ограниченные наклонными направляющими 1230, на два или более участков.

Размеры, например длина, ширина и/или площади, поперечного сечения каналов 1225 могут быть выбраны для подачи заданных количеств текучей среды к различным субблокам или различным областям пакета ячеек. В некоторых вариантах осуществления размеры каналов 1225 выбирают таким образом, чтобы одинаковая или по существу одинаковая величина потока текучей среды или скорости потока текучей среды была обеспечена для различных субблоков или различных областей пакета ячеек. В других вариантах осуществления размеры каналов 1215 выбирают таким образом, чтобы одинаковая или по существу одинаковая величина потока текучей среды или скорости потока текучей среды была обеспечена для субнабора, например, субблоков или областей в верхней и нижней областях пакета ячеек, в то время как другая, например, меньшая величина потока текучей среды или скорости потока текучей среды обеспечивается для других субблоков или областей в пакете ячеек, например субблоков или областей

в центральной области пакета ячеек.

В базовой конструкции, изображенной на фиг. 10А, впускной коллектор имеет начальную площадь  $A_j$  поперечного сечения и высоту  $H_i$  пакета (фиг. 13А). В варианте осуществления, изображенном на фиг. 13В, коллектор потока разделен на четыре канала 1225 с площадями поперечного сечения  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  и  $A_4$ . Каналы образованы внутренними перегородками или стенками 1220, изгибающимися на дне, образуя наклонные направляющие 1230, которые могут контактировать со стыками между субблоками SB1, SB2, SB3 и SB4. Каждый канал 1225, таким образом, сообщается по текучей среде только с одним субблоком. Каналы 1225 на любой из фиг. 12С, 12D или 13В или каналы, образованные между или внутри различных концентрических трубок 1215 на фиг. 12А и 12В, могут быть изолированы по текучей среде друг от друга. Сумма площадей поперечного сечения каналов 1225 на любых фиг. 12С, 12D или 13В или каналов, образованных между или внутри различных концентрических труб 1215 на фиг. 12А и 12В, может быть меньше, чем площадь поперечного сечения коллектора потока.

В других вариантах осуществления наклонные направляющие 1230 направляющего устройства для потока текучей среды могут не проходить полностью до пакета ячеек, а заканчиваться на некотором расстоянии, например, между 0,5 и 2 мм, меньше чем 2 мм (или около 2 мм), меньше чем 1 мм (или около 1 мм), меньше чем 0,5 мм (или около 0,5 мм) от пакета ячеек и образовывать зазоры, имеющие такие размеры, между наклонными направляющими 1230 и пакетом ячеек. Зазоры могут способствовать установке или извлечению направляющих устройств для потока текучей среды из коллекторов потока. Направляющее устройство для потока текучей среды может, таким образом, определять пути потока текучей среды через коллектор потока между различными участками пакета ячеек, имеющими площади поперечного сечения меньше, чем площадь поперечного сечения коллектора потока.

В конфигурации, изображенной на фиг. 13В, в дальнейшем именуемой "оптимальной конструкцией", протекание тока от одного субблока к другому по коллекторам ограничено. Внутри каждого субблока ток может по-прежнему проходить в обход пакета через секцию коллекторов, сообщающихся с ним по текучей среде. Для вычисления эффективности тока каждый субблок можно поэтому моделировать так, как если бы он представлял собой электродиализное устройство только с одним субблоком. На фиг. 14 показаны результаты вычисления эффективности тока для устройства с четырьмя субблоками; средняя эффективность тока равна эффективности единственного субблока на фиг. 7.

В различных вариантах осуществления электродиализное устройство, раскрытое в настоящем документе, может включать в себя одно или более из направляющего устройства для потока текучей среды, расположенного внутри впускного коллектора и имеющего поверхность, выполненную с возможностью изменения пути потока текучей среды, введенной во впускной коллектор, и направления текучей среды в обедняющие камеры или в концентрирующие камеры, и второго направляющего устройства для потока текучей среды, расположенного внутри выпускного коллектора и имеющего поверхность, выполненную с возможностью изменения пути потока текучей среды, введенной в выпускной коллектор через обедняющие камеры или через концентрирующие камеры.

На фиг. 15А показан один неограничивающий вариант осуществления оптимизированной конструкции, состоящей из каналов для текучей среды, образованных перегородками с линейным профилем и эллиптическими наклонными направляющими. Конструкция, включающая в себя перегородки и наклонные направляющие, изображенные на фиг. 15А, может быть выполнена в виде вставки, которая может быть установлена с возможностью съема в коллектор базовой конструкции. На фиг. 15В показана оптимизированная конструкция, встроенная в ВГД-модель. На фиг. 15С изображено сравнение центрального поперечного сечения электродиализного устройства для базовой и оптимизированной конструкций. В оптимизированной конструкции каналы электрически изолированы и гидравлически параллельны.

Оптимизированная конструкция на фиг. 15А может быть расширена для применения в электродиализных модулях, имеющих больше четырех субблоков, изображенных на фиг. 15В и 15С. Например, однокомпонентная конструкция для вставки из восьми субблоков изображена на фиг. 15D, а двухкомпонентная конструкция для вставки из восьми субблоков изображена на фиг. 15Е. На фиг. 15D и 15Е изображены эти конструкции на виде в изометрии, виде сверху, виде снизу, виде сзади, виде сбоку и виде спереди. В конструкциях из восьми субблоков небольшой канал 1505 сохраняется сзади коллектора, ниже задней стороны вставки, с отрезанием потока на каждой отдельной наклонной направляющей 1510. Наклонные направляющие в вариантах осуществления, изображенных на фиг. 15D и 15Е, являются по существу планарными в отличие от криволинейных наклонных направляющих варианта осуществления, изображенного на, например, фиг. 12D, 12Е и 15А. Термин "наклонная направляющая" в контексте настоящего документа включает в себя как криволинейные, так и плоские или планарные наклонные направляющие.

На фиг. 15F изображено сравнение центрального поперечного сечения электродиализного устройства из восьми субблоков для базовой и оптимизированной конструкций.

Как описано выше, распределение потока моделировали при изменяющихся значениях рабочего расхода, а затем оптимизировали при помощи программного обеспечения ВГД. Определение характеристик выполняли затем для составляющей  $Z$  скорости, расхода потока на среднюю пару ячеек и падения давления.

На фиг. 16А и 16В изображена составляющая  $Z$  скорости через центральные плоскости  $ZY$ , а также через верхнюю, среднюю и нижнюю плоскости  $ZX$  для базовой и оптимизированной конструкций на фиг. 15А-15С при расходе потока устройства, составляющем  $4 \text{ м}^3/\text{ч}$  и  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$  соответственно. Для базовой конструкции по всем величинам расхода потока скорость  $Z$  через центральную плоскость  $ZY$  изменяется, равно как и скорость  $Z$  в верхней, средней и нижней плоскостях  $ZX$ , в 2-4 раза. Для сравнения отметим, что скорость  $Z$  в оптимизированной конструкции представляется постоянной по всем плоскостям для всех величин расхода потока.

На фиг. 16С изображено ВГД-моделирование составляющей  $Z$  скорости через центральные плоскости  $ZY$  для базовой и оптимизированной конструкций, показанных на фиг. 15F. Скорость  $Z$  через центральную плоскость  $ZY$  оптимизированной конструкции является по существу более равномерной, чем в базовой конструкции. На фиг. 16D изображена эффективность технологического процесса в зависимости от тока (расхода потока текучей среды) для базовой и оптимизированной конструкций, показанных на фиг. 15F. Эффективность процесса для оптимизированной конструкции приблизительно на 5% выше, чем эффективность базовой конструкции для каждого из измеренных значений расхода потока текучей среды.

На фиг. 17А представлен график результатов ВГД-моделирования величин расхода потока на пару ячеек при различных высотах (положениях на оси  $Y$ ) для базовой и оптимизированной конструкций электродиализных устройств при расходе потока  $4 \text{ м}^3/\text{час}$ , а на фиг. 17В представлен график результатов ВГД-моделирования величин расхода потока на пару ячеек при различных высотах (положениях на оси  $Y$ ) для базовой и оптимизированной конструкций электродиализных устройств при расходе  $10 \text{ м}^3/\text{час}$ . Подкрепляя вышесказанное, расход потока на среднюю ячейку ближе к равномерному для оптимизированной конструкции.

На фиг. 18А и 18В показано распределение давления в центральном поперечном сечении, выраженное в процентах максимального давления. В базовой конструкции (фиг. 18А) давление на впуске субблоков является равномерным, тогда как давление на выпуске изменяется таким образом, что падения давления на субблоках увеличиваются от верхнего субблока к нижнему (см. также фиг. 19В). В оптимизированной конструкции (фиг. 18В) давление на впуске и выпуске субблоков изменяется так, что падение давления на субблоках является почти равномерным (см. также фиг. 19С).

На фиг. 19А показаны положения измерения давления при ВГД-моделировании и определены разности давлений для отдельных субблоков и всего устройства. На фиг. 19В и 19С изображено изменение падения давления по субблокам 1-4 для различных величин расхода подаваемого потока. Падения давления более равномерны в оптимизированной конструкции, как можно было бы предполагать при более равномерном распределении расхода потока на пару ячеек.

В другом аспекте предусмотрены элементы, улучшающие распределение потока по парам ячеек в проходе. В существующих перекрестноточных устройствах электродиализа, выпускаемых компанией Evoqua Water Technologies, впускные и выпускные коллекторы являются приближенно треугольными в поперечном сечении, как показано на фиг. 4. Переходное соединение передает поток подаваемого материала в трубе к впускному коллектору. Эта модель будет по существу рассматриваться в качестве первоначальной конструкции.

На фиг. 10В и 10С показаны результаты ВГД-моделирования потока в пакете из четырех субблоков, каждый с 100 парами ячеек. Поток не является равномерно распределенным по ячейкам. Сравнение распределения скорости потока в трех горизонтальных плоскостях, одной рядом с входом коллектора, одной посередине пакета и одной на дне пакета показывает, что поток через несколько первых пар ячеек ниже, с относительно большими зонами низкой скорости (см. фиг. 11А-11С).

Как показано выше на фиг. 7, эффективность тока (и тем самым доля тока, протекающая через мембраны) является наибольшей в парах ячеек на двух концах прохода. Полученная в результате более высокая плотность тока увеличивала бы риск как ограничения, так и масштабирования тока в зонах с низкой скоростью потока. Более низкий расход потока через первые несколько разбавляющих ячеек в проходе означал бы также, что полный потенциал более высокой эффективности тока при удалении солей не используется.

Технические проблемы состоят, таким образом, в уменьшении протекания тока в обход через впускной и выпускной коллекторы, улучшении распределения потока по парам ячеек в проходе и в особенности обеспечении достаточного потока к нескольким первым парам ячеек.

В настоящем документе раскрыты конструкции для впускных и выпускных коллекторов в электродиализных устройствах для повышения эффективности тока и улучшения распределения потока к парам ячеек.

Как описано выше, эффективность тока в паре ячеек можно повысить путем увеличения электрических сопротивлений во впускных и выпускных каналах и коллекторах. Начиная с первоначальной конструкции, изображенной на фиг. 20А, с площадью  $A_1$  поперечного сечения коллектора и расстоянием  $L_1$  от края активной площади мембраны до края коллектора существуют альтернативные конструкции, которые могут увеличивать эффективность тока. Коллектор меньшего размера, например, как показано на фиг. 20В, увеличивал бы сопротивление в каналах при расстоянии  $L_2 > L_1$ , а также увеличивал бы сопро-

тивление в коллекторах при  $A_2 < A_1$ . Коллектор меньшего размера, как показано на фиг. 20С, увеличивал бы сопротивление в коллекторах при  $A_3 < A_1$ . Сопротивление в каналах не изменилось бы при  $L_3 = L_1$ . Поперечное сечение, представляющее собой равнобедренную трапецию с "крыльями", показано на фиг. 20D. Площадь поперечного сечения коллектора на фиг. 20D меньше, чем у коллектора на фиг. 20В, тогда как среднее расстояние коллектора от активной площади приблизительно такое же. Уравнение для сопротивления на фиг. 6 может быть неприменимо к этой конструкции. Даже если предположить, что среднее расстояние равно  $L_4$ , вследствие режима течения тока шунтирования она может быть более сложной. Крылья могут направлять поток к зонам меньшей скорости в активной площади мембраны.

На фиг. 21 показаны моделируемые эффективности процесса для конструкций коллектора, представленных на фиг. 20А-20С. Эффективность процесса возрастает при уменьшении поперечного сечения коллектора, как и ожидалось, при этом две конструкции с одинаковой меньшей площадью имеют равную эффективность. Эффективность процесса связана с эффективностью тока и определяется уравнениями на фиг. 21.

На фиг. 22 показано, что распределение потока по парам ячеек в первоначальной конструкции не является однородным. Пары ячеек рядом с вершиной пакета ячеек имеют более низкий расход подаваемого потока, чем пары ячеек в более низких положениях в пакете ячеек.

Одно потенциальное решение по увеличению равномерности потока через различные ячейки в первоначальной конструкции заключается во встраивании выступов в коллектор, чтобы воздействовать на распределение потока по парам ячеек в проходе. Выступы могут представлять собой клинья, лопатки, перегородки, выпуклости или их комбинации. Выступы могут также иметь отверстия или пазы, позволяющие части потока проходить напрямую, уменьшая завихрения или водовороты ниже по течению.

Сравнение между существующей конструкцией и конструкцией, включающей в себя выступы во впускных коллекторах двухпроходного электродиализного устройства, изображено на фиг. 23А и 23В, где конструкция, включающая в себя выступы 2305, представлена на фиг. 23В. Профиль каждого выступа 2305 представляет собой дугу, проходящую от начала до конца коллектора. Дуга может быть круговой, или эллиптической, или свободно порожденной. В качестве термина, используемого в настоящем документе, "направляющее устройство для потока текучей среды" включает в себя варианты осуществления, такие как выступы 2305.

ВД-анализ выполняли для двух электродиализных устройств, изображенных на фиг. 23А и 23В, каждое с четырьмя субблоками, расположенными в двух проходах для текучей среды. Каждый субблок содержит 100 пар ячеек, поэтому общее количество пар ячеек на проход равно 200. Первое устройство имело поперечные сечения коллекторов, показанные на фиг. 23А, а второе - выступы с круговыми профилями, вставленные в коллекторы с такими же поперечными сечениями, как показано на фиг. 23В.

На фиг. 24А показано распределение давления в модуле базового варианта. Давление на проход возрастает постепенно сверху вниз, что соответствовало бы аналогичному профилю скорости через пакет. На фиг. 24В демонстрируется, как можно манипулировать полем давлений, используя выступы в коллекторе. В этом примере с криволинейной вставкой показано желаемое параболическое поле давлений с наибольшим давлением вверху и внизу прохода и наименьшим давлением посередине прохода. Это соответствует полю течения (потока), показанному на фиг. 25. На фиг. 26 показаны графики расхода потока на пару ячеек, поступающего в активную площадь на один проход в электродиализных устройствах с/без выступов, изображенных на фиг. 23В соответственно. Без выступов расход потока на ячейку является наименьшим в первой ячейке в проходе и возрастает на всем протяжении прохода. Выступы изменяют распределение потока таким образом, что расход потока на ячейку является наибольшим на обоих концах коллектора, где, как ожидается, эффективность тока и плотность тока в активной площади мембраны будут наибольшими (см. кривую для 200 пар ячеек на фиг. 7). Более высокие значения расхода потока уменьшали бы риск ограничения и масштабирования тока в ячейках на концах и увеличивали бы общее удаление солей в проходе.

Для коллекторов с равномерной площадью поперечного сечения модель электрической схемы, раскрытая выше, прогнозировала, что ток шунтирования будет наибольшим посередине в проходе. Уменьшение площади поперечного сечения будет уменьшать ток шунтирования и увеличивать эффективность тока. Выступы в электродиализном устройстве на фиг. 23В приводят к получению площадей поперечного сечения впускного коллектора, которые изменяются на протяжении каждого прохода, будучи наименьшими в средней точке коллектора, что будет ограничивать ток шунтирования.

Чтобы еще больше снизить ток шунтирования, могут быть встроены дополнительные вставки в впускных коллекторах каждого прохода. Форму ставок можно оптимизировать, чтобы занимать наибольший объем в впускных коллекторах, сохраняя при этом требуемый профиль потока. Аналогично впускным вставкам, обеспечение электродиализного устройства вставками, создающими небольшую площадь поперечного сечения в средней точке впускного коллектора, значительно уменьшит ток шунтирования. Геометрия впускной коллекторной вставки или впускной коллекторной вставки могла бы содержать клинья, лопатки, перегородки, выпуклости или их комбинации. Отверстия или пазы также могли бы быть встроены, чтобы позволить части потока проходить напрямую, уменьшая завихрения/водовороты

ниже по течению или распределяя поток. Различные возможные конструкции выпускных коллекторных вставок показаны на фиг. 27.

ВГД-анализ выполняли для предварительных конструкций выпускных коллекторных вставок с использованием одной и той же предварительной схемы ВГД: две ступени, модуль с двумя субблоками/ступенями. На фиг. 28 показана первая ступень модуля с впускной и выпускной коллекторными вставками. Вставка 2805 впускного коллектора имеет форму дуги, а вставка 2810 выпускного коллектора имеет линейное сужение (конус) с самой широкой частью сверху модуля и самой узкой частью внизу модуля. В качестве термина, используемого в настоящем документе, "направляющее устройство для потока текучей среды" включает в себя варианты осуществления, такие как вставка 2805 впускного коллектора и вставка 2810 выпускного коллектора. Впускная вставка была непрерывной гладкой кривой с вершиной в средней части прохода и уменьшала коллектор до 5-миллиметрового канала.

Выпускная вставка была прямым сужением (конусом), которое ограничивало выпускной коллектор 4-миллиметровым каналом сверху и обеспечивала широко открытый канал внизу. Моделируемый расход потока был установлен равным 12 гал/мин. Профили массового расхода потока (на пару ячеек) построены на фиг. 29 и показывают, что если геометрия выпускной вставки является плавной и постепенной, профили потока в основном остаются неизменными, когда предусмотрена выпускная вставка.

Эксперименты выполняли с двумя перекрестноточными электродиализными устройствами, каждое с двумя проходами, по два субблока на проход. Первое устройство имело поперечные сечения коллекторов, показанные на фиг. 20В, а второе имело выступы с круговыми профилями, изображенными на фиг. 23В, вставленными в коллекторы с одинаковыми поперечными сечениями.

Значения расходов разбавленного и/или концентрированного потоков были в диапазоне 40-41 л/мин, соответствующем средней скорости  $\sim 2,5$  см/с в камерах. Подача в разбавляющие и концентрирующие камеры осуществлялась из отдельных резервуаров, содержащих растворы NaCl. Исходные концентрации составляли  $556$  моль/м<sup>3</sup> в питающем резервуаре разбавленного раствора и  $796$  моль/м<sup>3</sup> в концентрате. Подаваемый ток составлял 10А.

Продукт из разбавляющих камер возвращали в питающий резервуар разбавленного раствора, а отбракованный материал из концентрирующих камер возвращали в питающий резервуар концентрата. На протяжении эксперимента концентрация растворенной соли уменьшалась в резервуаре разбавленного раствора и увеличивалась в концентрате.

На фиг. 30 показана эффективность процесса в зависимости от соотношения средней концентрации в концентрате и средней концентрации в разбавленном растворе. Соотношение возрастало по мере обезсоливания. Эффективность была приблизительно на 10% выше в устройстве со вставками в результате улучшенного распределения потока и уменьшения площади поперечного сечения коллектора посередине каждого прохода.

Были проведены дополнительные испытания, в ходе которых выпускную вставку встраивали в аппарат электрохимического разделения для улучшения распределения потока. Выпускные вставки, помещенные в субблоки, имели наклонные или сходящиеся на конус поверхности, такие, что повороты (изгибы), составлявшие 90° без вставок, были преобразованы в уклоны, направлявшие поток воды с поворотом, вместо того чтобы создавать турбулентность на углах изгибов. Сравнение между потоком текучей среды с выпускными вставками и без них показано на фиг. 31А и 31В. Было установлено, что направление потока воды со вставкой в выпускном коллекторе электродиализного устройства помогает уменьшить падение давления внутри модуля. Однако выпускная вставка вызывает ограничение потока жидкости через выпускной коллектор аналогично заперению потока на пути водопроводной трубы путем помещения объекта на пути потока трубы. Общий суммарный эффект состоял в том, что падение давления фактически немного уменьшилось по сравнению с вариантом без выпускной вставки, что оказалось неожиданным результатом. Применение наклонной или сходящейся на конус выпускной вставки также увеличивало эффективность процесса и уменьшало потребление энергии электродиализным аппаратом. Эти данные показаны на фиг. 32А и 32В.

Дополнительный аспект включает в себя гидравлический адаптер для передачи потока из наружного трубопровода с одной геометрической формой поперечного сечения к впускному коллектору электродиализного устройства с другой геометрической формой поперечного сечения. Гидравлический адаптер включает в себя проход для текучей среды, содержащий по меньшей мере одну сходящуюся на конус секцию или в некоторых вариантах осуществления две сходящиеся на конус секции. Каждая сходящаяся на конус секция имеет характеристическую длину для развивающегося потока. В некоторых вариантах осуществления сходящиеся на конус секции не перекрываются.

Поток в разбавляющие камеры электродиализного устройства может подаваться по наружной трубе к гидравлическому адаптеру, а затем распределяться по всем разбавляющим камерам параллельно через впускной коллектор, как показано на фиг. 33. Аналогичным образом продукт из всех разбавляющих камер может быть собран в выпускном коллекторе и доставлен по гидравлическому адаптеру к наружной трубе. Втекание и вытекание потока из концентрирующих камер может быть организовано аналогично этому.

Переход высокоскоростного турбулентного потока из наружного трубопровода к впускному кол-

лектору создает особые трудности, поскольку наружный трубопровод является в общем случае круговым в поперечном сечении, тогда как впускной коллектор может иметь поперечное сечение, которое является по существу круговым, прямоугольным, треугольным или имеющим какую-либо другую форму. Впускные коллекторы, которые обычно являются треугольными, изображены на фиг. 4, 20А и 20В. В связи с этим, как правило, предусмотрены гидравлические адаптеры со специализированными элементами направления потока.

Один пример гидравлического адаптера, обеспечивающего переход от кругового поперечного сечения к преимущественно треугольному поперечному сечению изображен на виде в изометрии на фиг. 34А, на частично прозрачном виде на фиг. 34В, на виде сверху вниз на фиг. 34С и на виде снизу вверх на фиг. 34D. Впускное отверстие этой конструкции является круговым в поперечном сечении (фиг. 34С), тогда как выпускное отверстие является приблизительно треугольным (фиг. 34D). Внутри диаметр потока уменьшается по первой оси (фиг. 34Е, D1-D2), поперек первой характеристической длины (фиг. 34Е, L1) при посредстве крутого, наклоненного конуса. Затем поток получает возможность расширяться и развиваться по второй оси (фиг. 34Е, D3-D4), поперек второй характеристической длины (фиг. 34F, L2), при посредстве широкого, наклоненного конуса, который перекрывается с первым конусом.

Усовершенствованная конструкция гидравлического адаптера для вариантов осуществления электродиализных устройств, раскрытых в настоящем документе, изображена на фиг. 35А-35D. Впускное отверстие этой конструкции также является круговым в поперечном сечении, тогда как выпускное отверстие является приблизительно треугольным. В этой конструкции поток также уменьшается по первой оси (фиг. 35С, D1-D2), однако первая характеристическая длина больше (фиг. 35С, L1) и конус является более плавным и эллиптическим, чем в предыдущей конструкции, изображенной на фиг. 34А-34F. Поток снова получает возможность расширяться и развиваться по второй оси (фиг. 35D, D3-D4), и аналогично вышеуказанному вторая характеристическая длина, по которой развивается поток, больше (фиг. 35D, L2), чем в предыдущей конструкции. В этой конструкции конусы не перекрываются.

На фиг. 36А и 36В показаны результаты моделирования величины скорости отдельных линий движения потока внутри впускного коллектора, равномерно отобранных во впускном отверстии, для базовой и оптимизированной конструкций соответственно. Вследствие струйных эффектов скорость во впускном коллекторе значительно выше в базовой конструкции (слева), чем в оптимизированной конструкции (справа).

На фиг. 37А и 37В отображены результаты моделирования составляющей Z скорости потока текучей среды через центральные плоскости ZY, а также через верхнюю, среднюю и нижнюю плоскости ZX для электродиализных устройств, включая базовую и оптимизированную конструкции соответственно. Сравнивая распределение составляющей Z скорости, отметим, что изменение в электродиализных устройствах, включающих базовый гидравлический адаптер, выше, чем в оптимизированной конструкции.

Аспекты и варианты осуществления, раскрытые в настоящем документе, не ограничены электродиализным аппаратом. Все устройства электрохимического разделения могут извлекать преимущество из улучшенного распределения потока. Устройства электрохимического разделения включают, без ограничения, электродиализ, обращение электродиализа, непрерывную деионизацию, непрерывную электродеионизацию, электродеионизацию, электродиарез и емкостную деионизацию. Другие электрохимические устройства, которые извлекали бы преимущество из улучшенного распределения потока, включают в себя проточные батареи, топливные элементы, электрохлорирующие элементы и электролизеры для получения щелочи и хлора.

Используемые в настоящем документе фразеология и терминология служат для описательных целей и не должны рассматриваться как ограничительные. В контексте настоящего документа термин "множество" относится к двум или более позициям или компонентам. Термины "содержащий", "включающий в себя", "несущий", "имеющий", "вмещающий" и "охватывающий", используемые в текстовом описании или формуле изобретения и т.п., представляют собой неограничивающие термины, т.е. означают "включающий в себя, без ограничений". Таким образом, использование таких терминов предназначено для того, чтобы охватывать перечисленные после них элементы и их эквиваленты, а также дополнительные элементы. Только переходные фразы "состоящий из" и "состоящий по существу из" представляют собой закрытые или полужакрытые переходные фразы соответственно в отношении формулы изобретения. Использование порядковых терминов, таких как "первый", "второй", "третий" и т.п., в формуле изобретения для модификации элемента формулы изобретения само по себе не подразумевает какой-либо приоритет, старшинство или порядок одного элемента формулы по сравнению с другим или временной порядок, в котором выполняются действия способа, а применяется просто в качестве меток, чтобы отличать один элемент формулы, имеющий определенное название, от другого элемента, имеющего такое же название (но с употреблением порядкового термина), что позволяет различать указанные в формуле элементы.

## ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Устройство электрохимического разделения, содержащее  
первый электрод;  
второй электрод;  
пакет ячеек, включающий в себя чередующиеся обедняющие камеры и концентрирующие камеры, расположенные между первым электродом и вторым электродом;  
впускной коллектор, выполненный с возможностью ввода текучей среды в обедняющие камеры или в концентрирующие камеры;  
выпускной коллектор;  
направляющее устройство для потока текучей среды, расположенное внутри впускного коллектора и содержащее множество наклонных направляющих, выполненных с возможностью изменения пути потока текучей среды, введенной во впускной коллектор, и направления текучей среды в обедняющие камеры или в концентрирующие камеры; и  
второе направляющее устройство для потока текучей среды, расположенное внутри выпускного коллектора и содержащее множество наклонных направляющих, выполненных с возможностью изменения пути потока текучей среды, введенной в выпускной коллектор через обедняющие камеры или через концентрирующие камеры.
2. Устройство по п.1, отличающееся тем, что путь потока текучей среды через обедняющие камеры перпендикулярен пути потока текучей среды через концентрирующие камеры.
3. Устройство по п.2, отличающееся тем, что направляющее устройство для потока текучей среды расположено внутри впускного коллектора и выполнено с возможностью по меньшей мере частичного блокирования тока шунтирования через впускной коллектор.
4. Устройство по п.3, отличающееся тем, что направляющее устройство для потока текучей среды определяет путь потока текучей среды через впускной коллектор между различными участками пакета ячеек, имеющими площадь поперечного сечения, меньшую, чем площадь поперечного сечения впускного коллектора.
5. Устройство по п.4, отличающееся тем, что пакет ячеек включает в себя множество субблоков, а наклонные направляющие выполнены с возможностью направления текучей среды в различные соответствующие субблоки из множества субблоков.
6. Устройство по п.5, отличающееся тем, что между краями каждой из наклонных направляющих и пакетом ячеек образован зазор размером менее 1 мм.
7. Устройство по п.5, отличающееся тем, что направляющее устройство для потока текучей среды включает в себя множество каналов, изолированных по текучей среде друг от друга.
8. Устройство по п.7, отличающееся тем, что каждый из множества каналов заканчивается у соответствующей наклонной направляющей из множества наклонных направляющих.
9. Устройство по п.8, отличающееся тем, что сумма площадей поперечного сечения множества каналов меньше, чем площадь поперечного сечения впускного коллектора.
10. Устройство по п.9, дополнительно содержащее  
второй пакет ячеек, образующий чередующиеся вторые обедняющие камеры и вторые концентрирующие камеры, расположенные между пакетом ячеек и вторым электродом;  
второй впускной коллектор, выровненный в одну линию с выпускным коллектором и выполненный с возможностью введения текучей среды из выпускного коллектора во вторые обедняющие камеры или во вторые концентрирующие камеры;  
третье направляющее устройство для потока текучей среды, расположенное внутри второго впускного коллектора и содержащее множество наклонных направляющих, выполненных с возможностью изменения пути потока текучей среды, введенной во второй впускной коллектор, и направления текучей среды во вторые обедняющие камеры или во вторые концентрирующие камеры;  
второй выпускной коллектор, расположенный на противоположной стороне второго пакета ячеек относительно второго впускного коллектора; и  
перегородку, отделяющую по текучей среде впускной коллектор от второго выпускного коллектора.
11. Устройство по п.3, отличающееся тем, что пакет ячеек включает в себя множество субблоков, а направляющее устройство для потока текучей среды включает в себя множество перегородок, выполненных с возможностью изоляции потока текучей среды в каждый из множества субблоков от потока текучей среды в другие из множества субблоков.
12. Устройство по п.11, отличающееся тем, что направляющее устройство для потока текучей среды дополнительно включает в себя концентрические каналы для текучей среды.
13. Устройство по п.3, отличающееся тем, что направляющее устройство для потока текучей среды включает в себя криволинейный выступ, проходящий внутрь в направлении пакета ячеек от стенки впускного коллектора.

14. Устройство по п.13, отличающееся тем, что направляющее устройство для потока текучей среды выполнено с возможностью уменьшения площади поперечного сечения впускного коллектора на первую величину на конце впускного коллектора и на вторую величину, большую, чем первая величина, в средней точке вдоль длины впускного коллектора.

15. Устройство по п.14, отличающееся тем, что направляющее устройство для потока текучей среды выполнено с возможностью уменьшения скорости потока текучей среды через камеры в центральной области пакета ячеек.

16. Устройство по п.15, отличающееся тем, что второе направляющее устройство для потока текучей среды имеет площадь поперечного сечения, которая уменьшается вдоль пути через выпускной коллектор.

17. Устройство по п.16, отличающееся тем, что второе направляющее устройство для потока текучей среды выполнено с возможностью уменьшения падения давления текучей среды через устройство.

18. Устройство по п.1, дополнительно содержащее впускное отверстие для текучей среды, имеющее поперечное сечение, отличное от поперечного сечения впускного коллектора, и гидравлический адаптер, расположенный между впускным отверстием для текучей среды и впускным коллектором.

19. Устройство по п.18, отличающееся тем, что гидравлический адаптер включает в себя канал, имеющий первую секцию с направленным внутрь конусом, в которой ширина трубки уменьшается по первой оси, и вторую секцию с направленным наружу конусом, в которой ширина канала увеличивается по второй оси, при этом первая секция и вторая секция не перекрываются.

20. Устройство по п.19, отличающееся тем, что направленный внутрь конус первой секции канала представляет собой эллиптический конус.

21. Устройство по п.1, дополнительно содержащее рециркуляционный канал, выполненный с возможностью направления концентрата, прошедшего через концентрирующие камеры, обратно в концентрирующие камеры.

22. Устройство по п.1, отличающееся тем, что впускной коллектор разделен на изолированные по текучей среде каналы, выполненные с возможностью направлять заданные количества текучей среды к различным участкам пакета ячеек.

23. Устройство по п.22, отличающееся тем, что изолированные по текучей среде каналы имеют площади поперечного сечения, выбранные таким образом, чтобы обусловить скорость потока текучей среды через камеры в центральной области пакета ячеек, меньшую, чем скорость потока текучей среды через камеры в верхней и нижней областях пакета ячеек.

24. Устройство по п.22, отличающееся тем, что изолированные по текучей среде каналы имеют площади поперечного сечения, выбранные таким образом, чтобы обусловить скорость потока текучей среды через камеры в верхней области пакета ячеек, по существу равную скорости потока текучей среды через камеры в нижней области пакета ячеек.

25. Способ повышения эффективности тока в аппарате электрохимического разделения, включающем в себя пакет ячеек, образующий чередующиеся обедняющие камеры и концентрирующие камеры, расположенные между первым электродом и вторым электродом,

при этом путь потока текучей среды через обедняющие камеры перпендикулярен пути потока текучей среды через концентрирующие камеры,

причем способ включает в себя следующий этап:

вставляют направляющее устройство для потока текучей среды во впускной коллектор аппарата,

при этом направляющее устройство для потока текучей среды содержит множество наклонных направляющих, выполненных с возможностью изменения пути потока текучей среды, введенной во впускной коллектор, и направления текучей среды в одно из множества обедняющих камер или множества концентрирующих камер,

при этом наклонные направляющие выполнены с возможностью предотвращения обхода потоком текучей среды каких-либо из обедняющих или концентрирующих камер и по меньшей мере частичного блокирования тока шунтирования через впускной коллектор.

26. Способ по п.25, дополнительно включающий в себя увеличение равномерности потока текучей среды через пакет ячеек посредством установки гидравлического адаптера на впуске впускного коллектора,

при этом гидравлический адаптер включает в себя канал, имеющий первую секцию с направленным внутрь конусом, в которой ширина канала уменьшается по первой оси, и вторую секцию с направленным наружу конусом, в которой ширина канала увеличивается по второй оси,

при этом первая секция и вторая секция не перекрываются.

27. Способ по п.26, дополнительно включающий в себя уменьшение падения давления в аппарате за счет установки конического направляющего устройства для потока текучей среды в выпускном коллекторе аппарата.

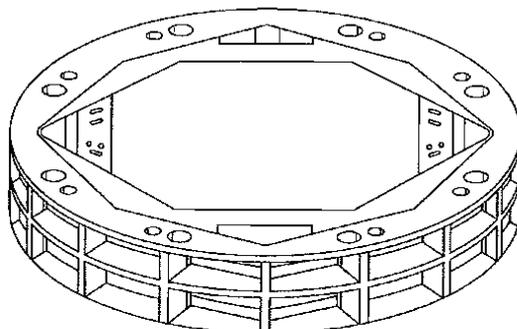
28. Способ по п.26, дополнительно включающий в себя установку второго направляющего устройства для потока текучей среды в выпускном коллекторе аппарата, при этом второе направляющее устройство для потока текучей среды имеет криволинейную поверхность, которая сужает путь потока через выпускной коллектор на первую величину в средней точке вдоль длины выпускного коллектора и на

вторую величину, меньшую, чем первая величина, вблизи от конца выпускного коллектора.

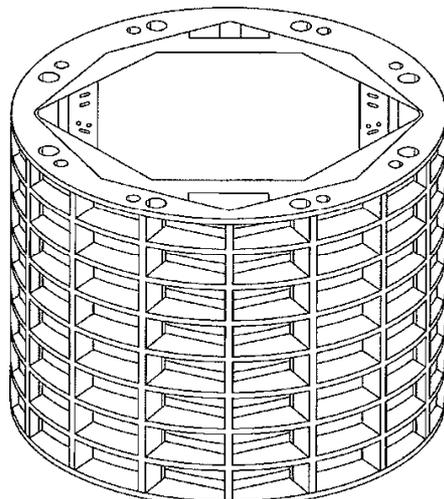
29. Устройство по любому из пп.1-24, дополнительно содержащее ионоселективные мембраны, отделяющие обедняющие камеры от концентрирующих камер.

30. Устройство по п.29, отличающееся тем, что представляет собой электродиализное устройство для очистки текучих сред при помощи электрических полей.

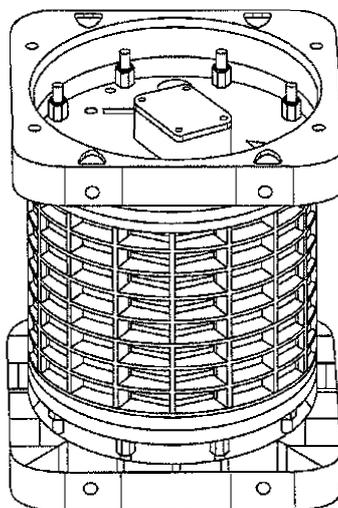
31. Устройство по п.29, отличающееся тем, что представляет собой устройство обращенного электродиализа для генерирования электроэнергии на основе двух или более потоков текучей среды с различными концентрациями ионов.



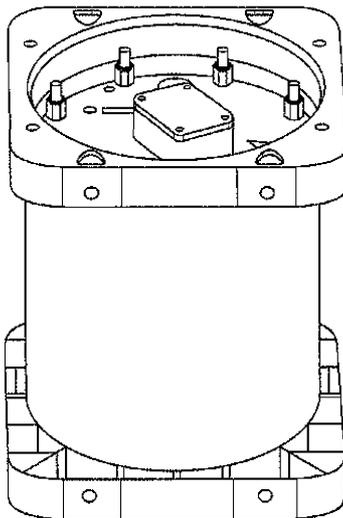
Фиг. 1А



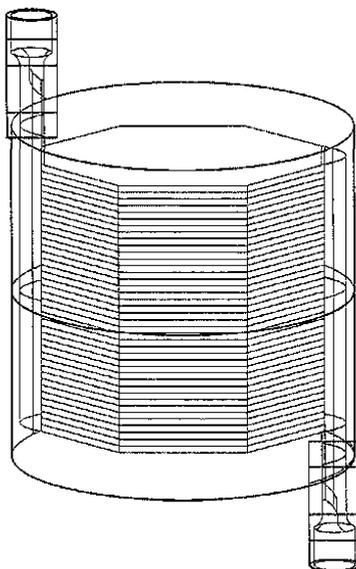
Фиг. 1В



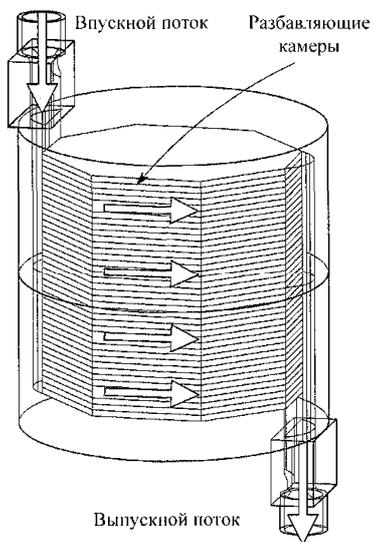
Фиг. 1С



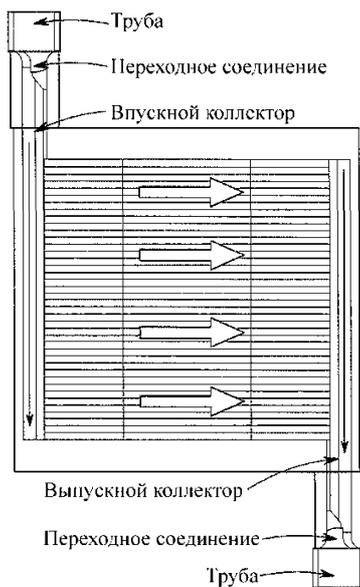
Фиг. 1D



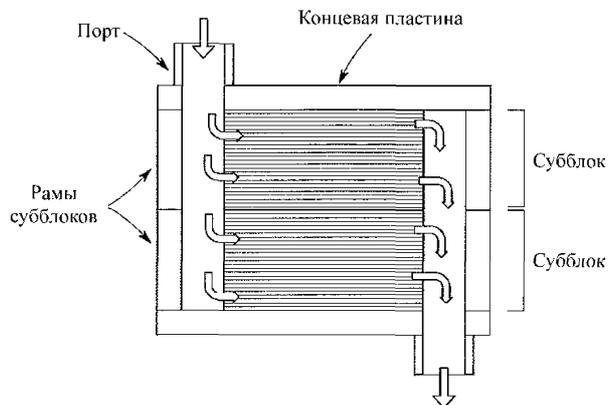
Фиг. 1E



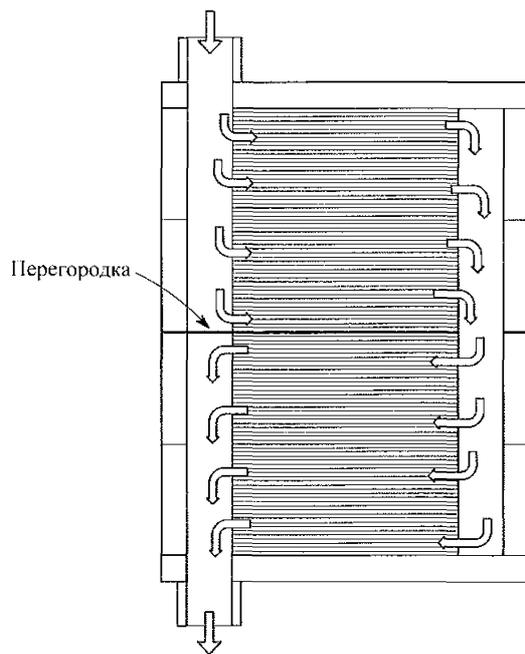
Фиг. 2A



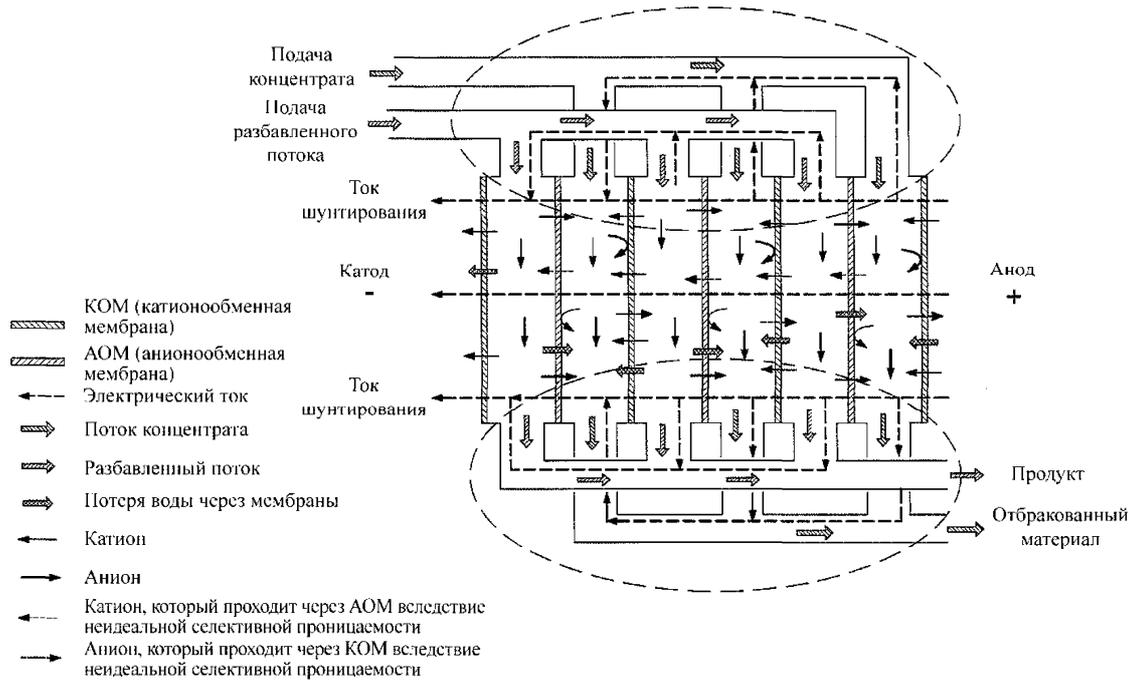
Фиг. 2В



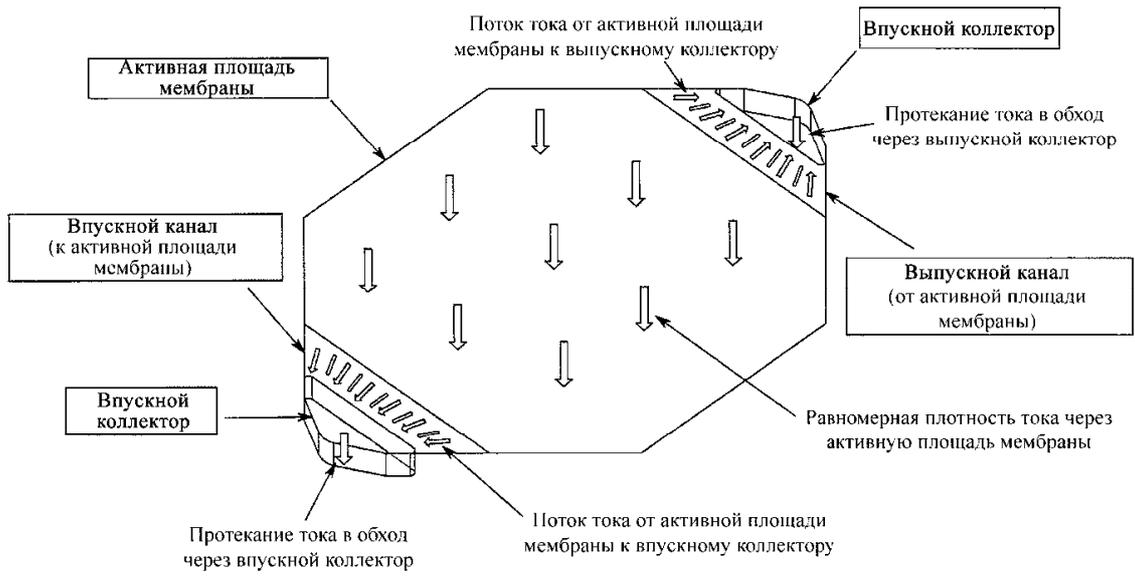
Фиг. 2С



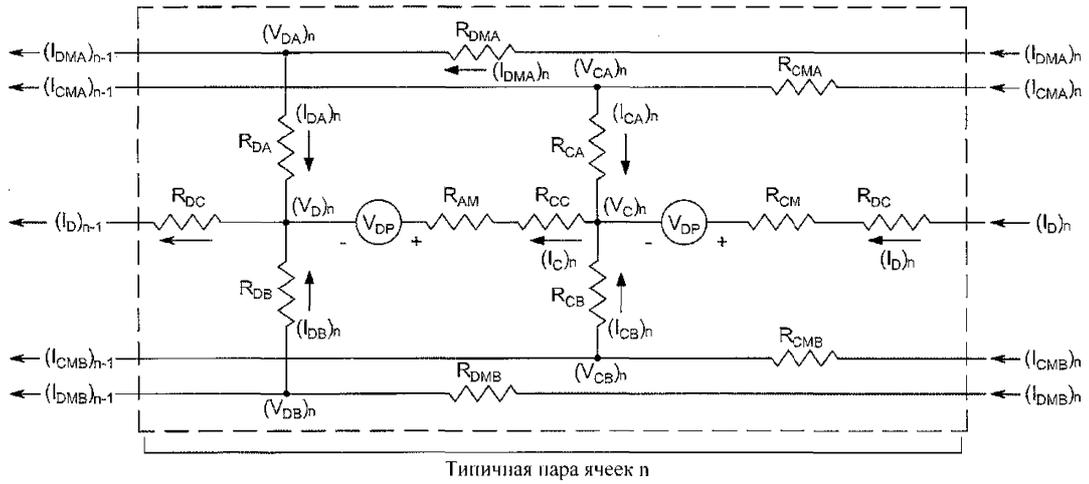
Фиг. 2D



Фиг. 3



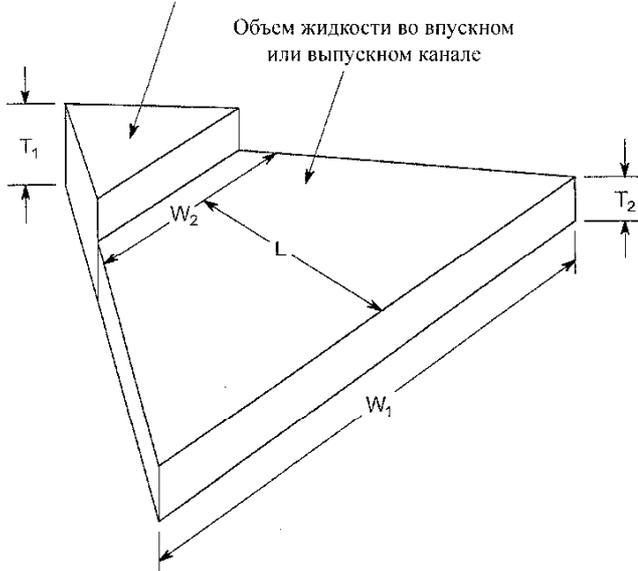
Фиг. 4



I = Ток V = Напряжение R = Сопротивление  
 Нижние индексы:  
 D = Разбавление C = Концентрирование A = Впускной коллектор  
 B = Выпускной коллектор CM = Катионная мембрана  
 AM = Анионная мембрана DC = Разбавляющая камера  
 CC = Концентрирующая камера  
 DMA = Разбавляющий коллектор A CMA = Концентрирующий коллектор  
 SMB = Концентрирующий коллектор B  
 DMB = Разбавляющий коллектор B DA = Разбавленный поток A DM = Разбавленный поток B  
 CA = Концентрат A CB = Концентрат B

Фиг. 5

Объем жидкости во впускном или выпускном коллекторе с площадью A



Сопротивление в канале

$$R = \frac{L \ln\left(\frac{W_1}{W_2}\right)}{\sigma T_2 \varepsilon (W_1 - W_2)} \quad (2)$$

Сопротивление в коллекторе

$$R = \frac{T_1}{\sigma A} \quad (3)$$

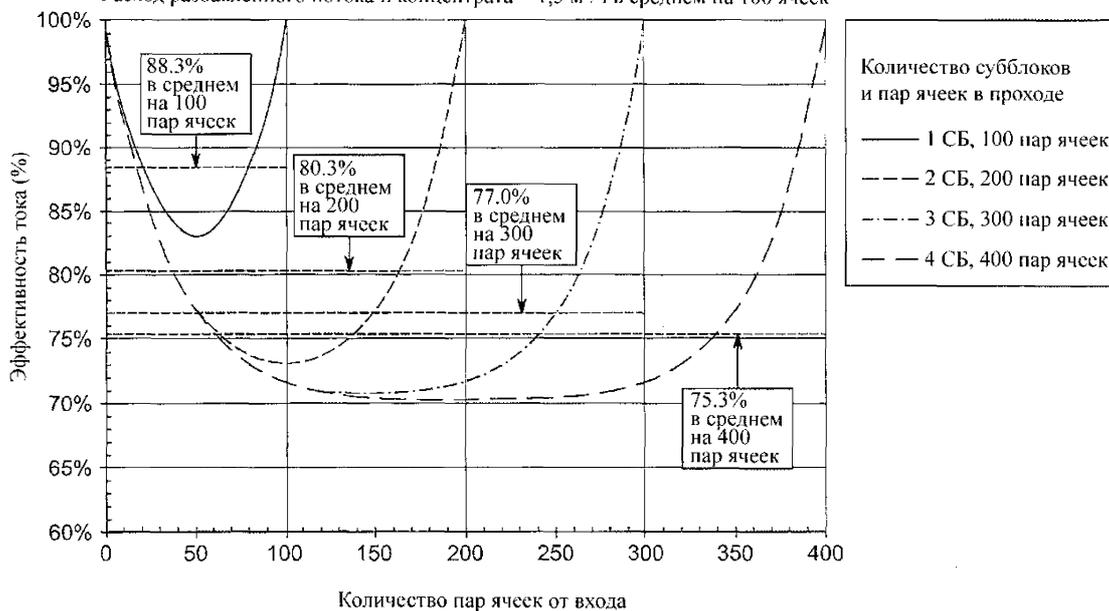
Где:

- $\sigma$  = Проводимость жидкости
- $\varepsilon$  = Доля пустот экрана в канале
- $T_1$  = Толщина пары ячеек
- $T_2$  = Толщина канала

Фиг. 6

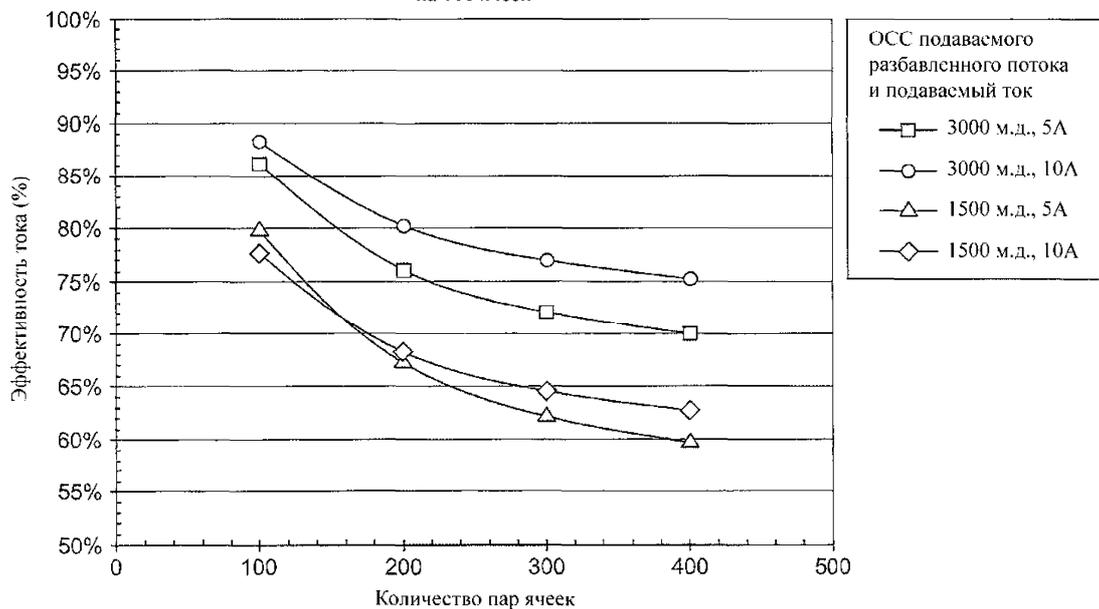
Изменение эффективности тока в зависимости  
от местоположения пар ячеек в проходе  
ОСС (общее солесодержание) подаваемого разбавленного потока = 3000 м.д.  
ОСС подаваемого концентрата = 15000 м.д.  
Температура = 20°C, Ток = 10А

Расход разбавленного потока и концентрата = 1,5 м<sup>3</sup>/ч в среднем на 100 ячеек



Фиг. 7

Средняя эффективность тока в зависимости от количества пар ячеек в одном проходе  
ОСС подаваемого концентрата = 15000 м.д., температура = 20°C  
Расход подаваемых разбавленного потока и концентрата = 1,5 м<sup>3</sup>/ч в среднем на 100 ячеек



Фиг. 8

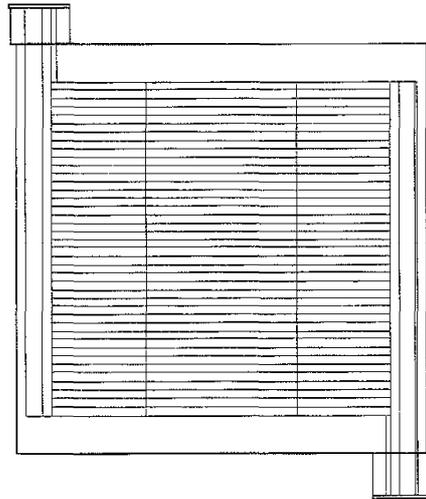
Эффективность тока в зависимости от:

Средней концентрации в концентрате/средней концентрации  
в разбавленном потоке

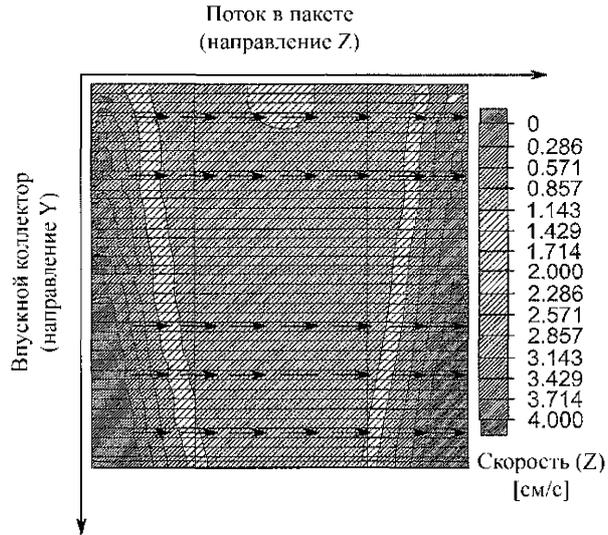
400 пар ячеек в одном проходе, ток = 10А, температура = 20°C  
Расход разбавленного потока и концентрата = 1,5 м³/ч  
Переменное ОСС подаваемого концентрата



Фиг. 9

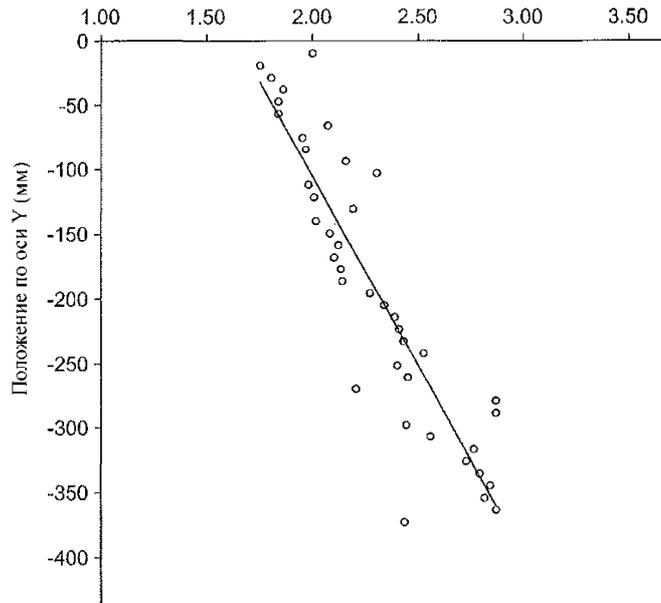


Фиг. 10А

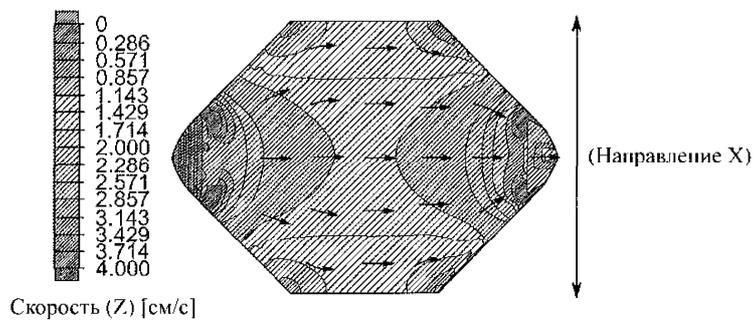


Фиг. 10В

Вариант 4 м<sup>3</sup>/ч: положение по оси Y в зависимости от среднего расхода потока через пару ячеек (мл/с)

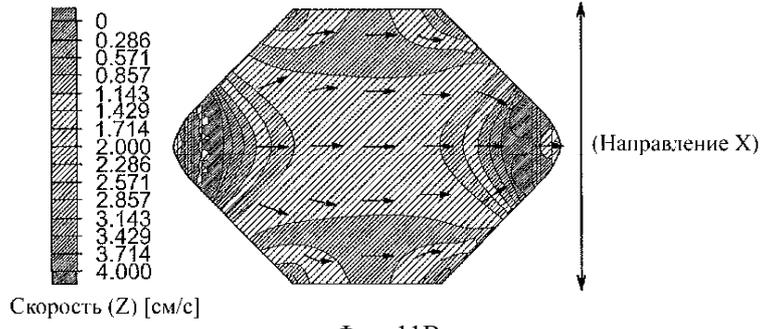


Фиг. 10С

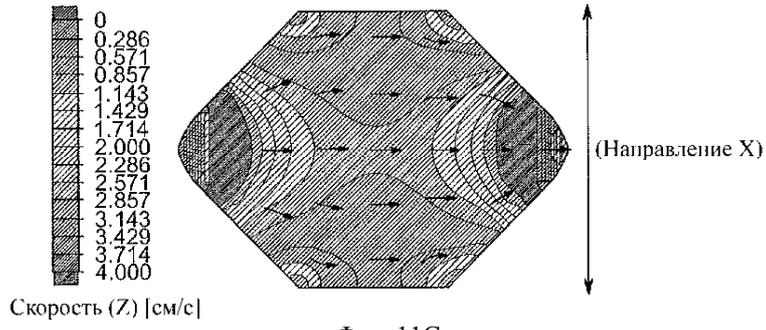


Фиг. 11А

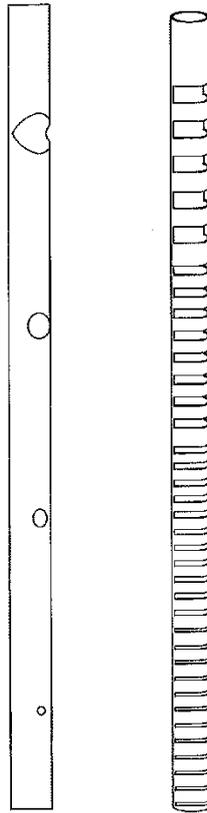
040270



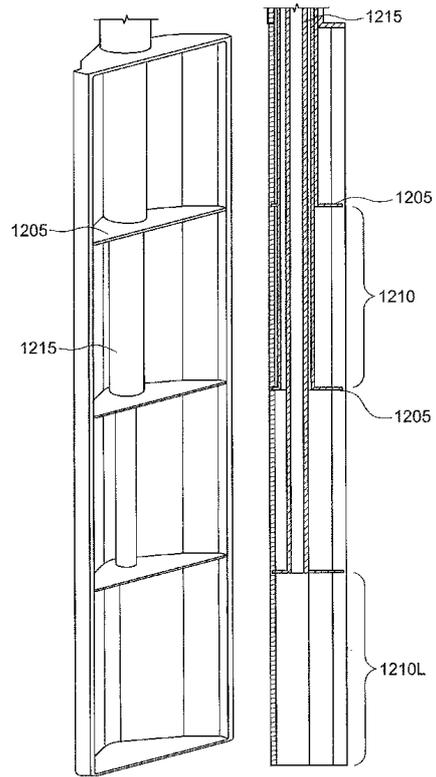
Фиг. 11В



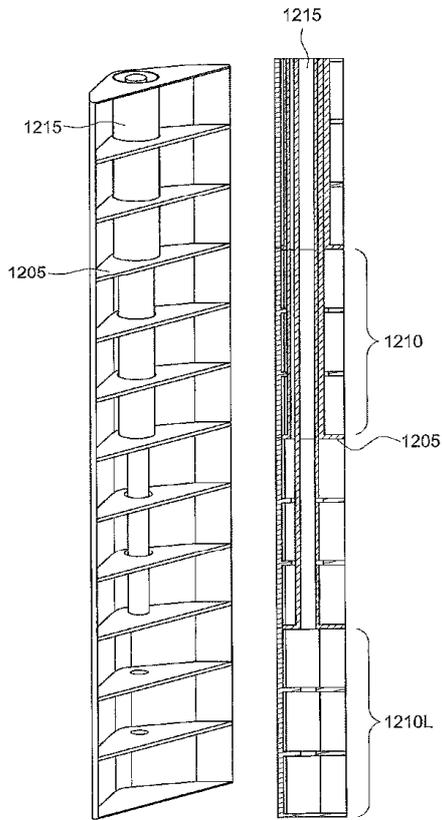
Фиг. 11С



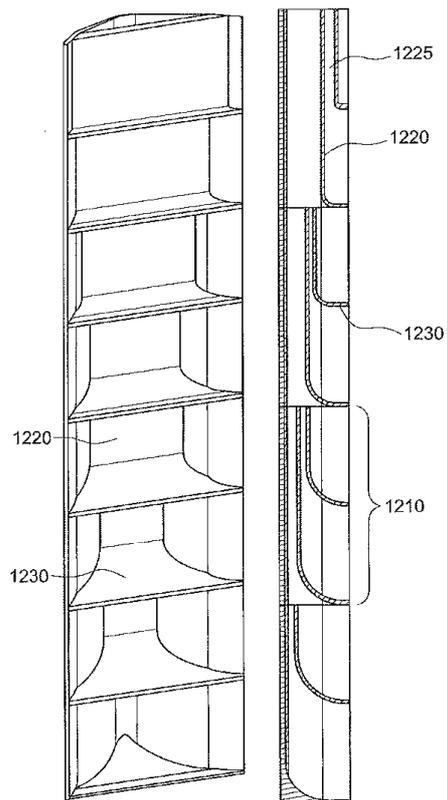
Фиг. 12А



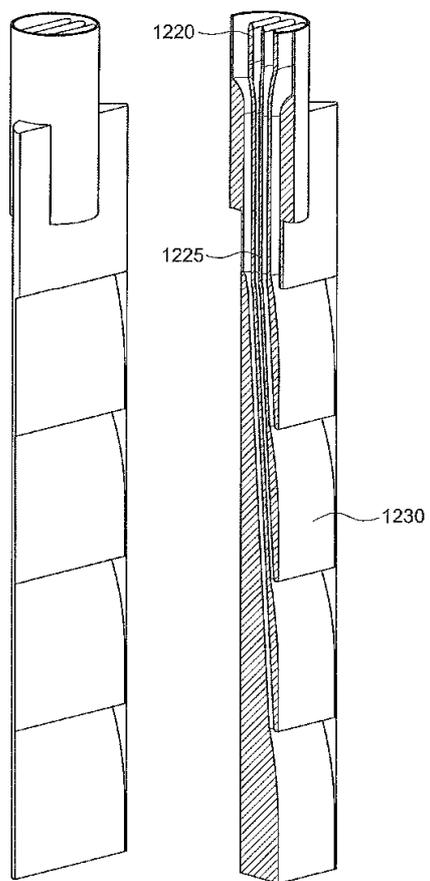
Фиг. 12В



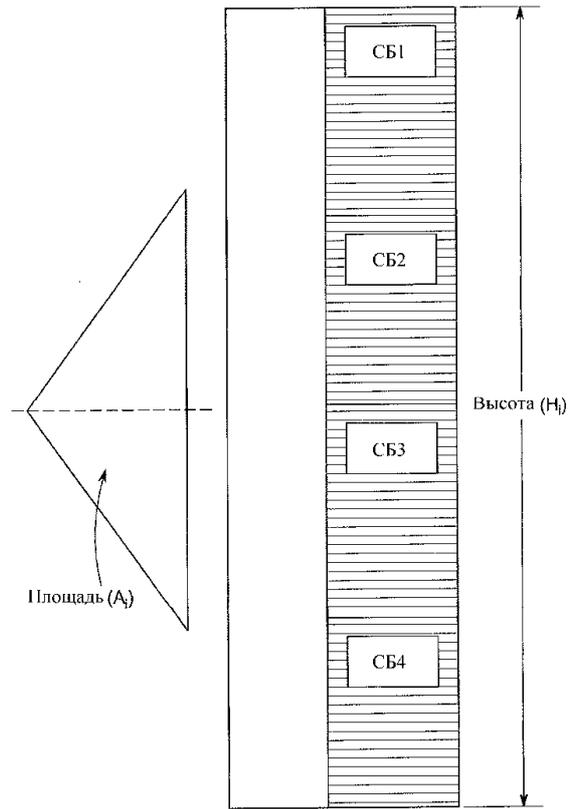
Фиг. 12С



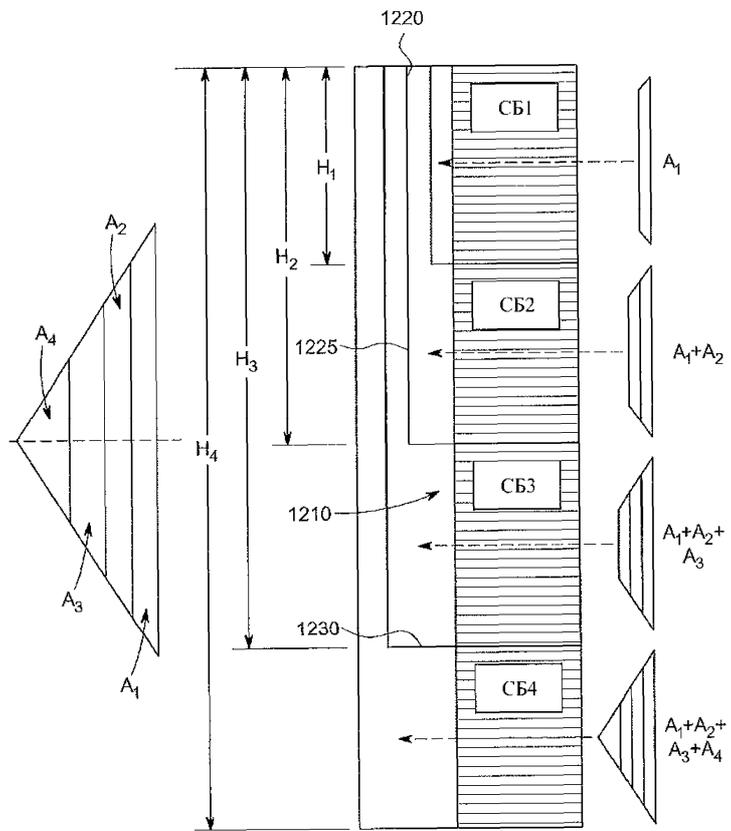
Фиг. 12D



Фиг. 12E

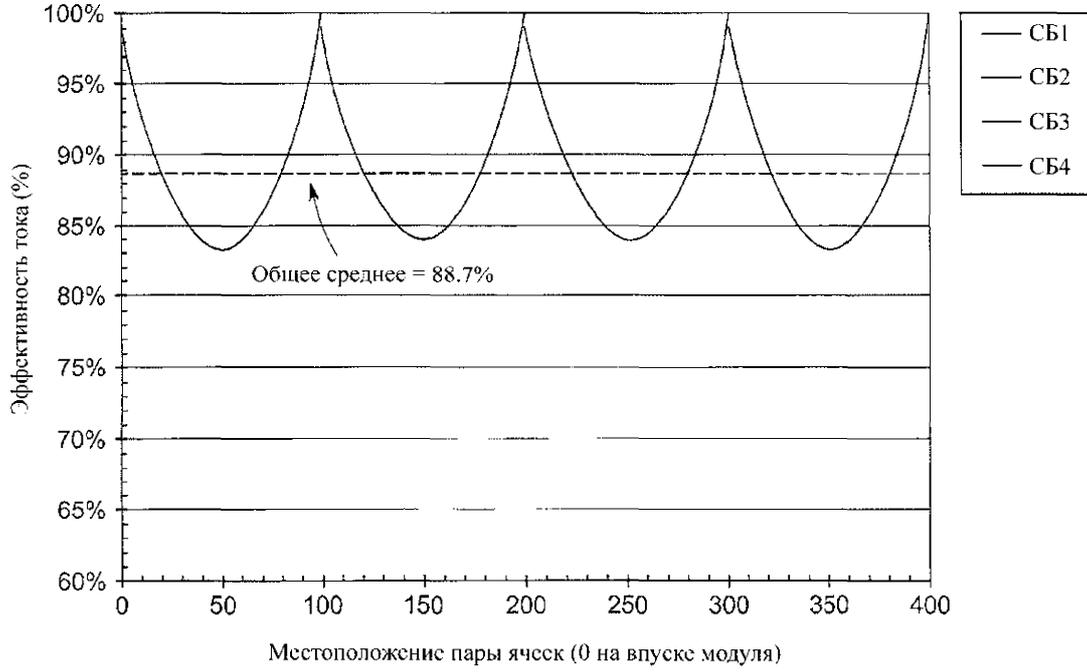


Фиг. 13А

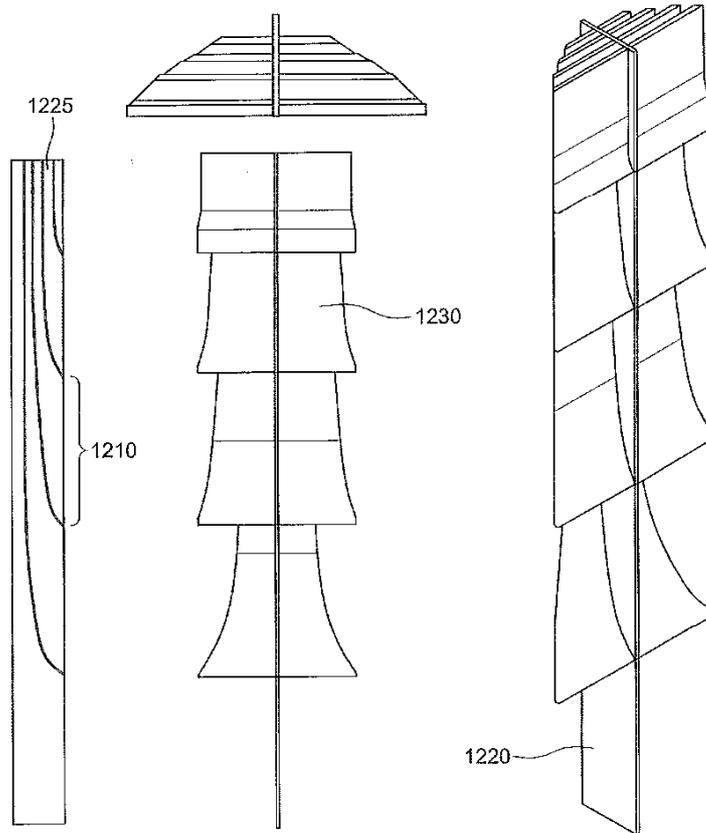


Фиг. 13В

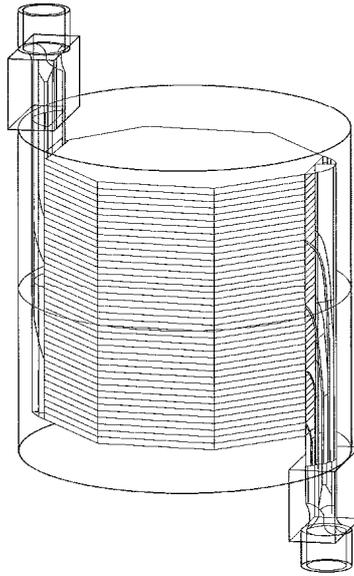
Средняя эффективность тока в зависимости от местоположения пары ячеек, 1 проход, 4 СБ  
 ОСС подаваемого разбавленного потока = 31949 м.д.,  
 ОСС подаваемого концентрата = 47307 м.д., T= 23,9°C  
 Расход разбавленного потока и концентрата = 5,46 м³/ч



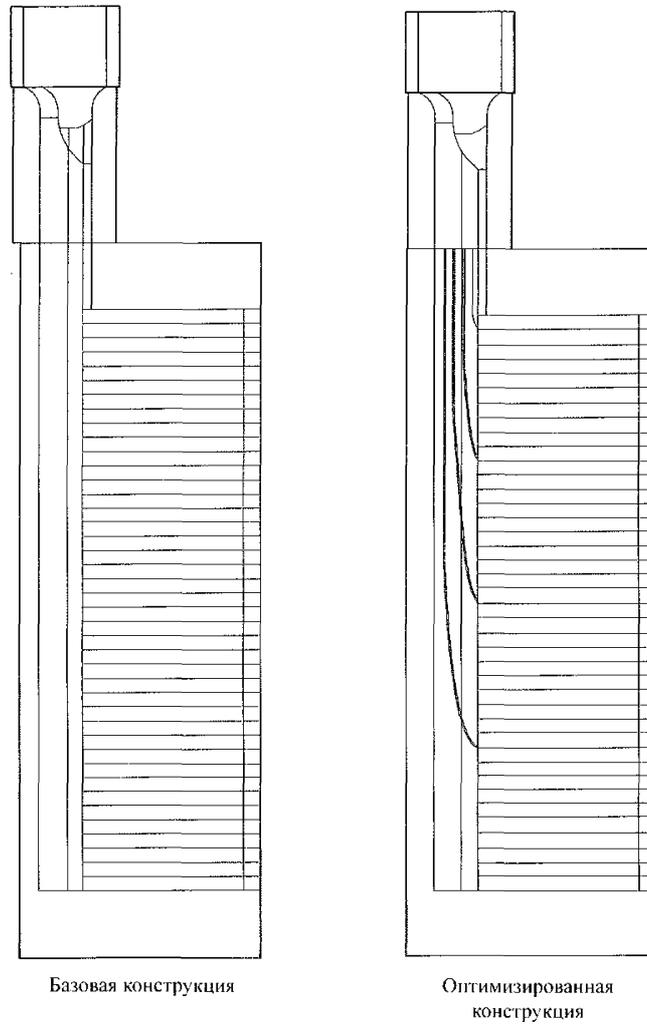
Фиг. 14



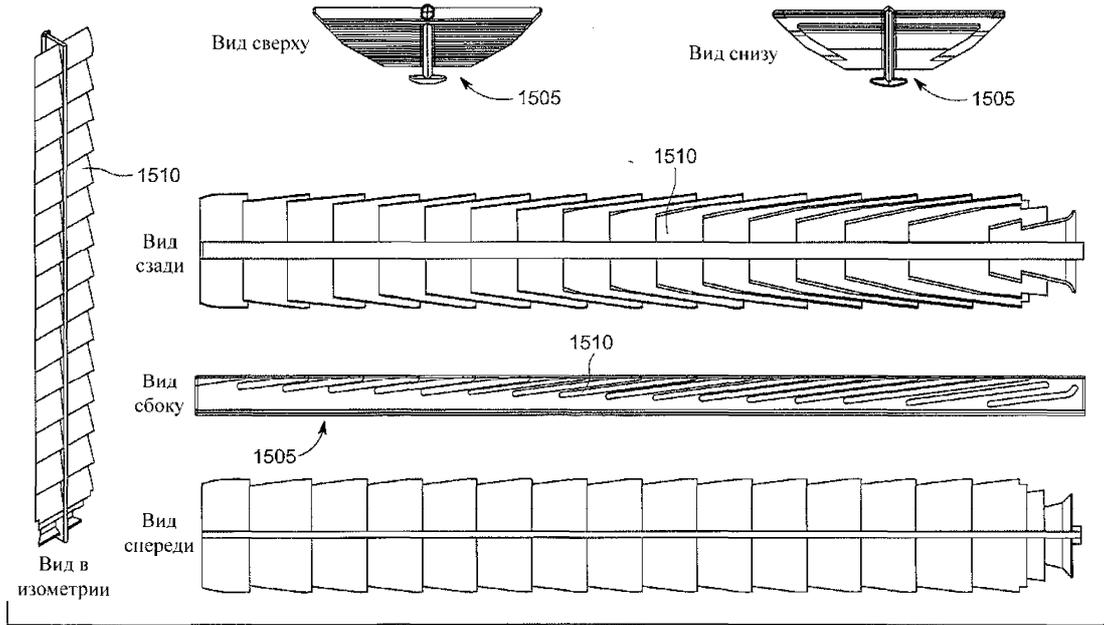
Фиг. 15А



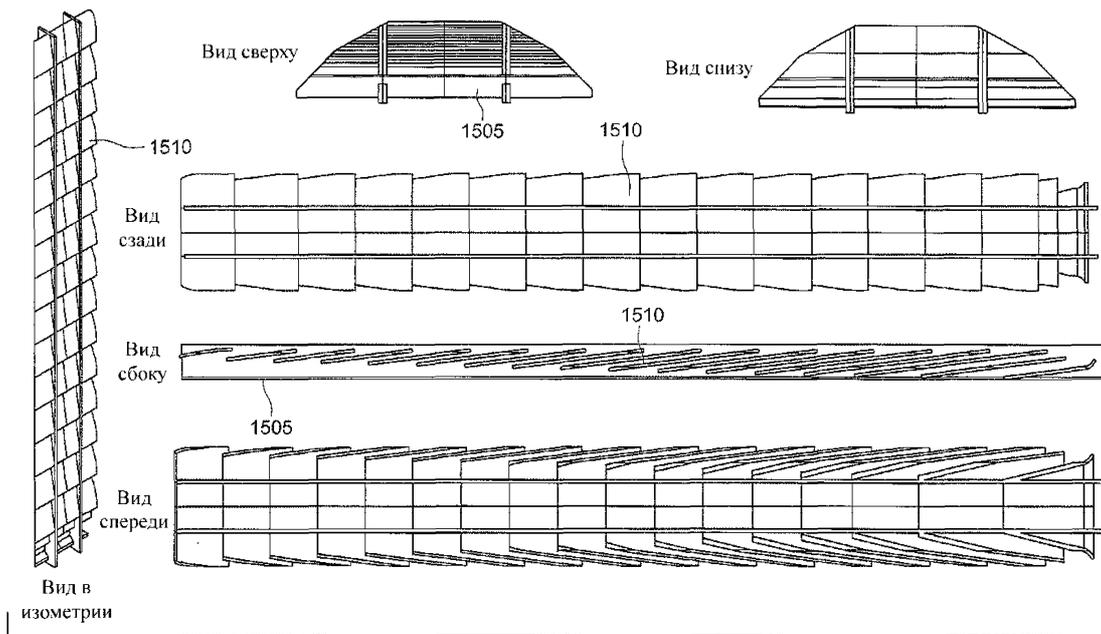
Фиг. 15В



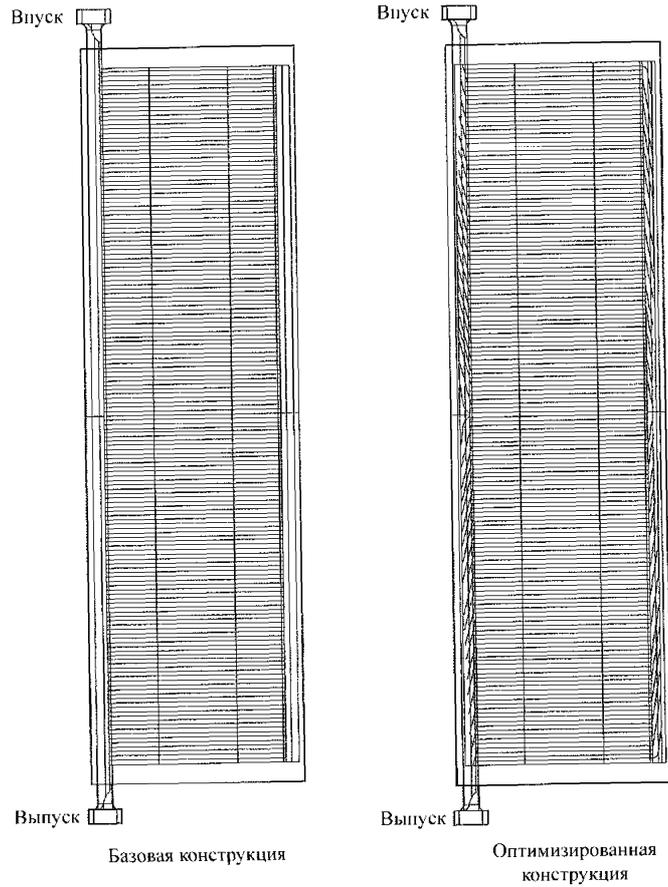
Фиг. 15С



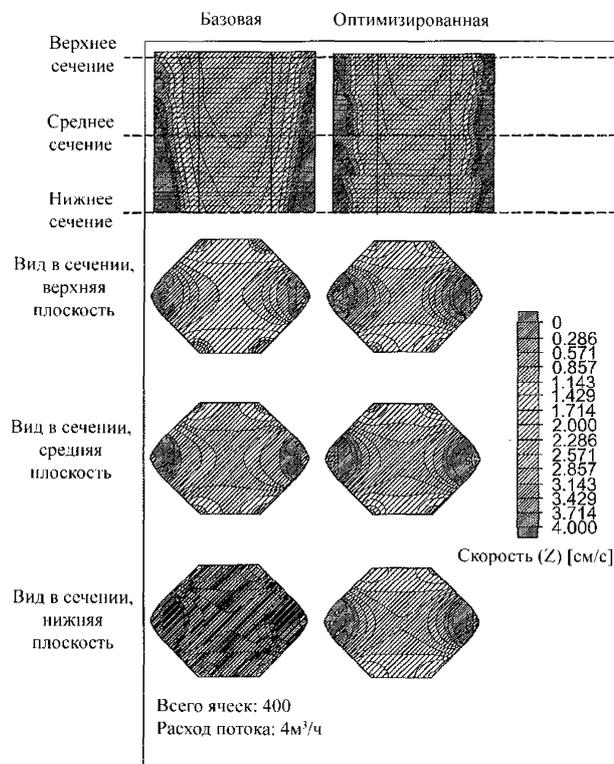
Фиг. 15D



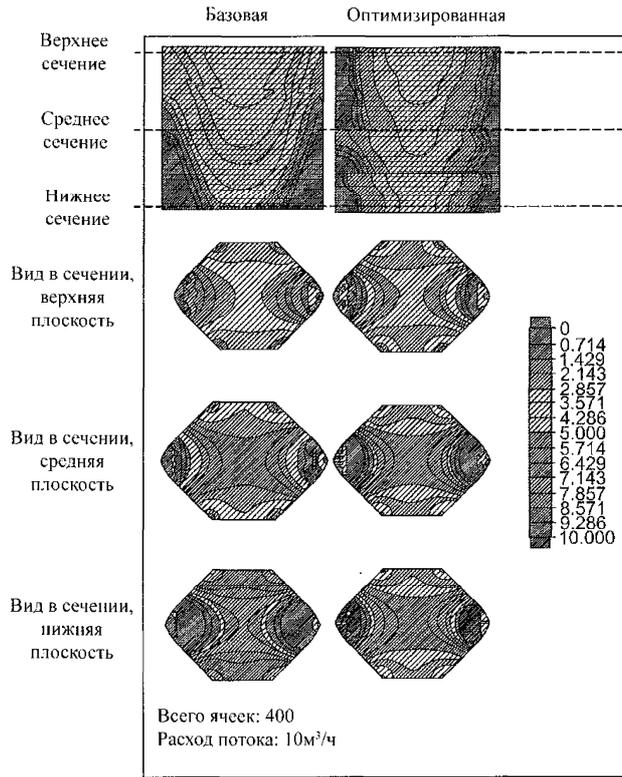
Фиг. 15E



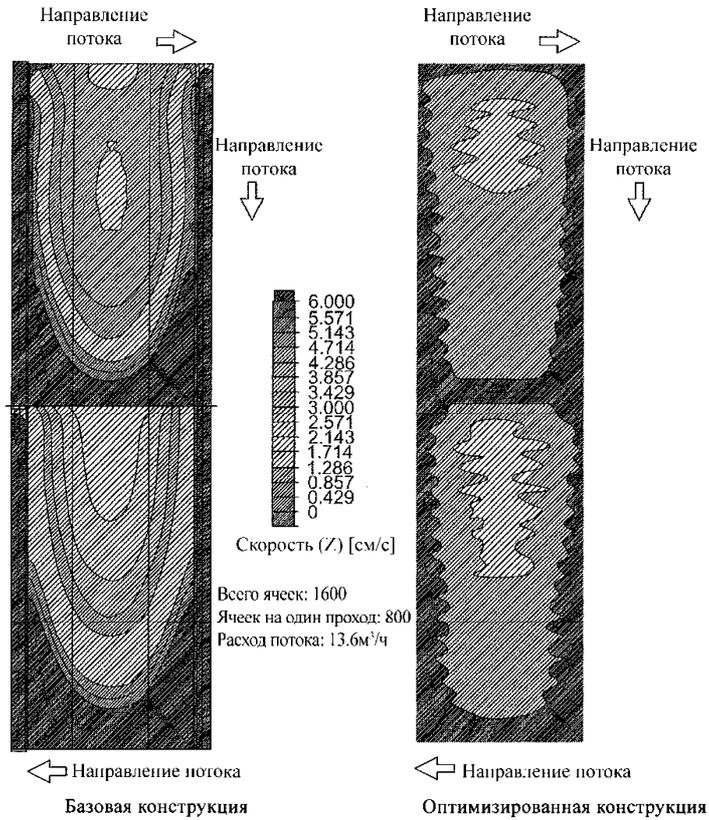
Фиг. 15F



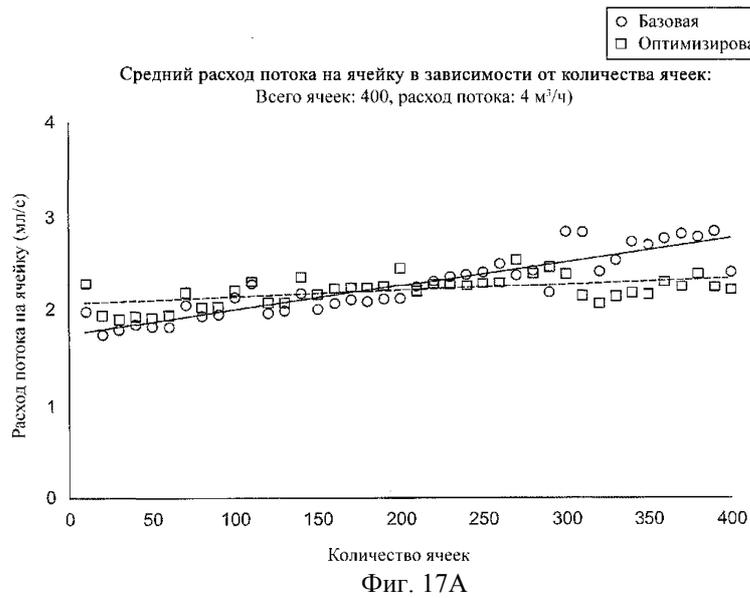
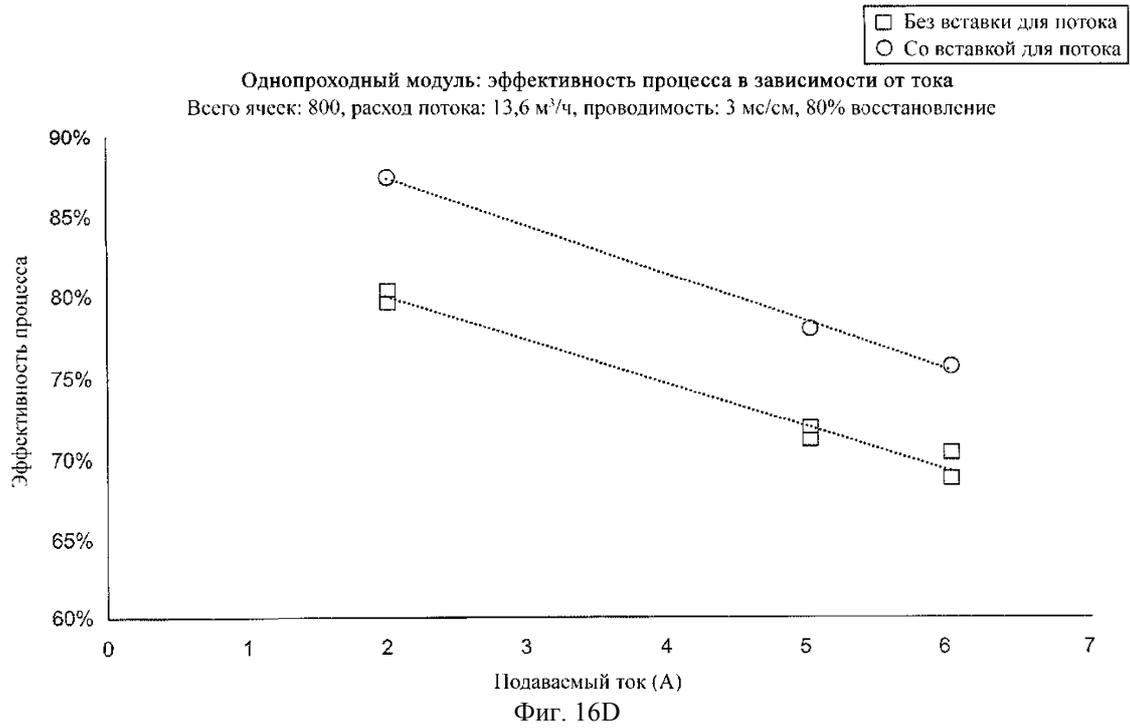
Фиг. 16А

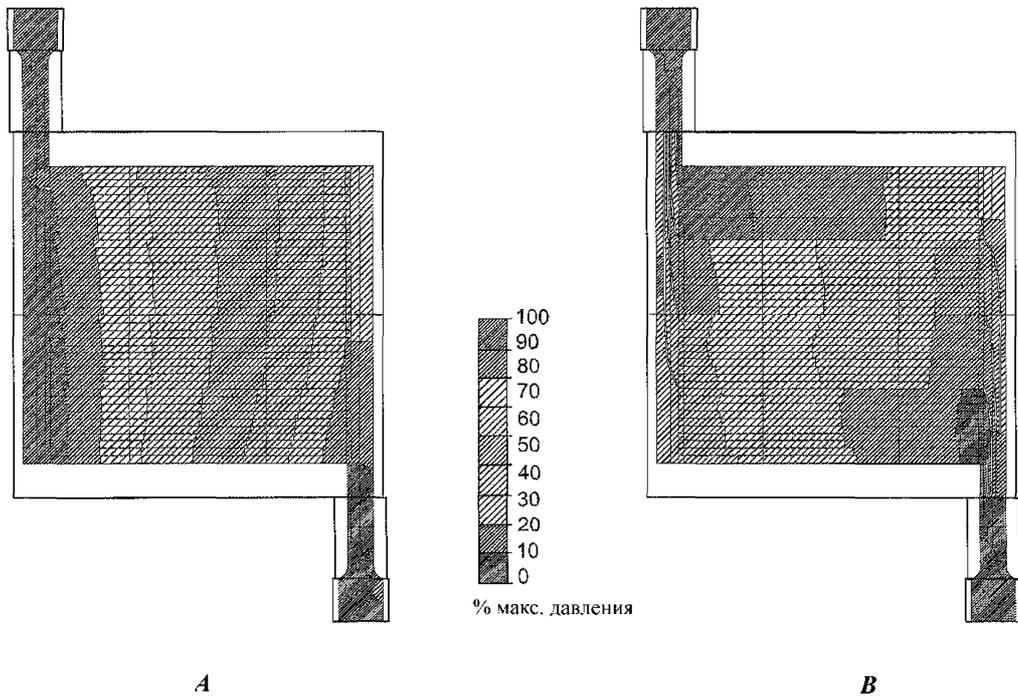
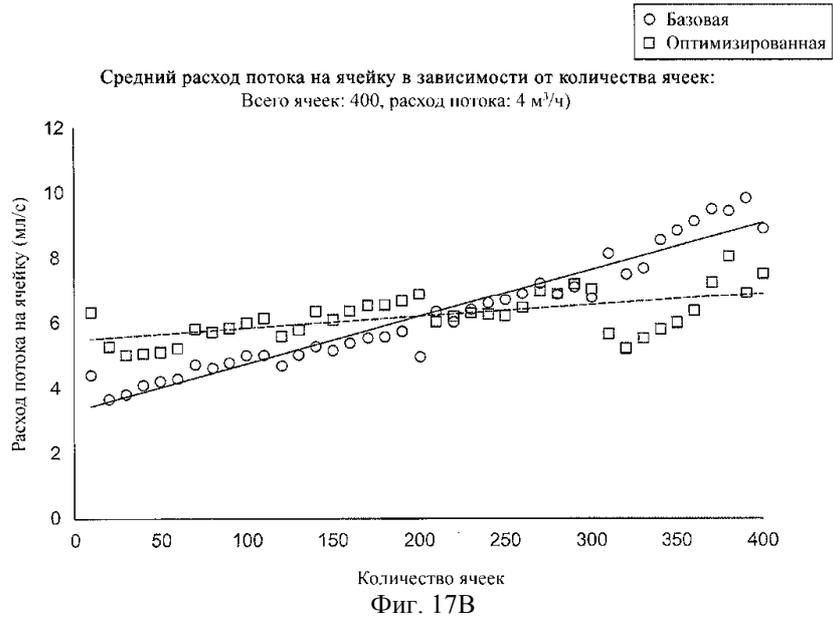


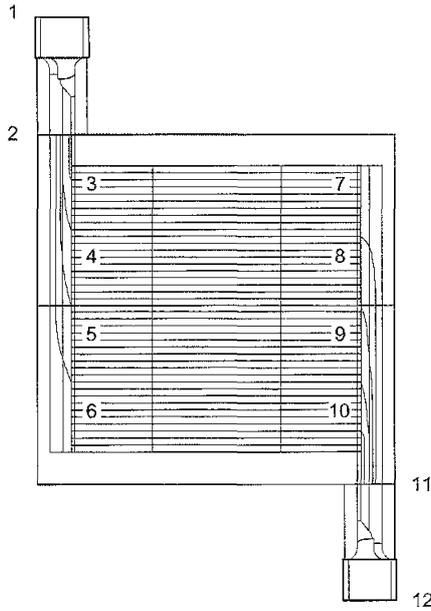
Фиг. 16В



Фиг. 16С





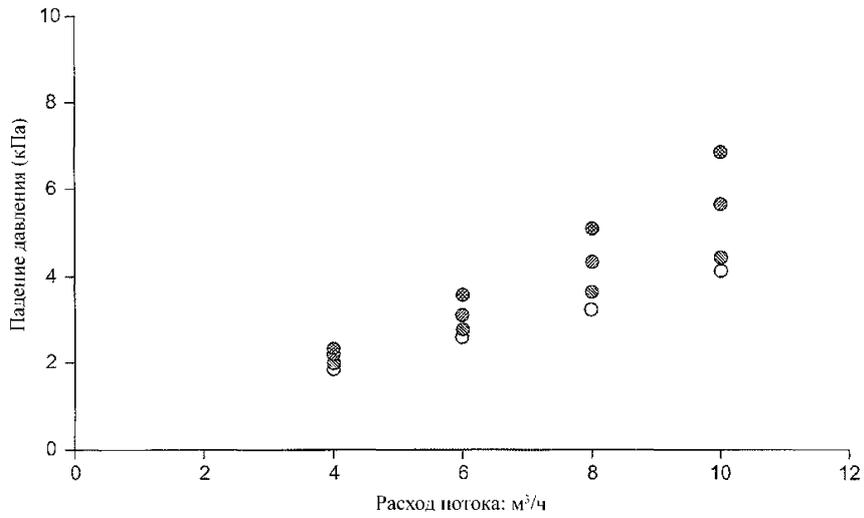


Количество субблоков	Пары ячеек	Место-положение впуска	Место-положение выпуска
СБ1	1-100	#3	#7
СБ2	101-200	#4	#8
СБ3	201-300	#5	#9
СБ4	301-400	#6	#10

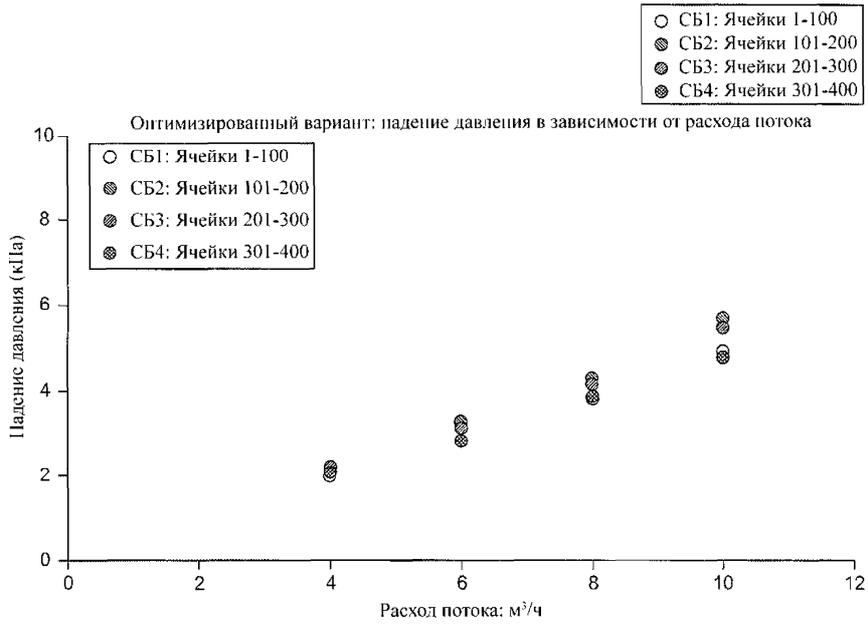
Фиг. 19А

- СБ1: Ячейки 1-100
- СБ2: Ячейки 101-200
- СБ3: Ячейки 201-300
- СБ4: Ячейки 301-400

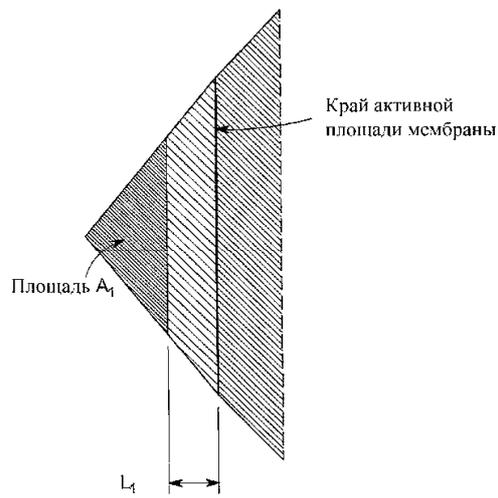
Базовый вариант: падение давления в зависимости от расхода потока



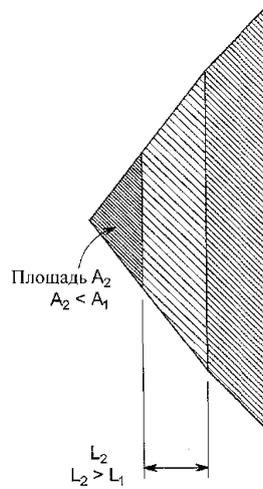
Фиг. 19В



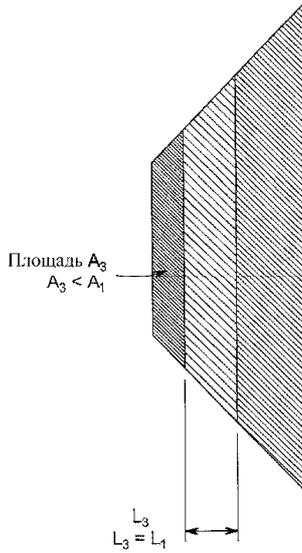
Фиг. 19С



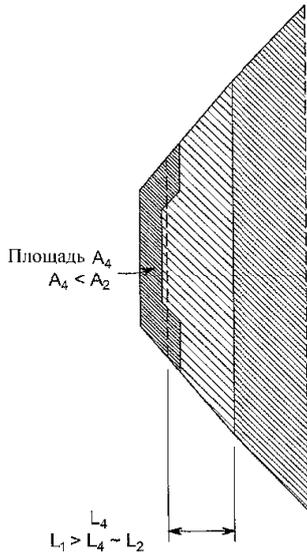
Фиг. 20А



Фиг. 20В



Фиг. 20С



Фиг. 20D



Фиг. 21

Эффективность процесса

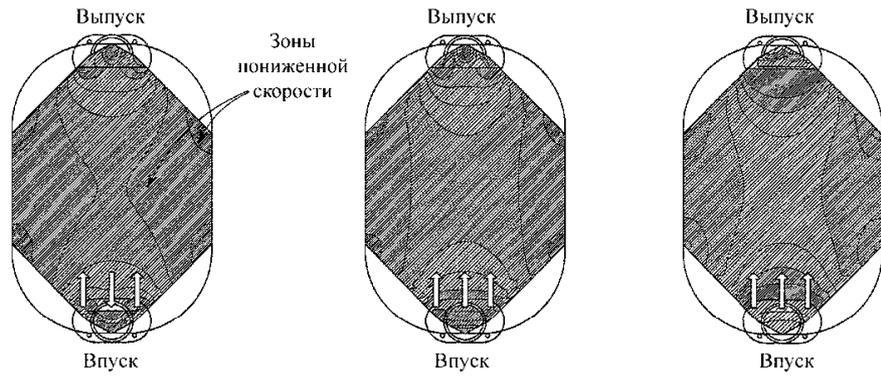
$$\eta_p = \frac{Q_{до}}{2N_{сп} l} \left[ \left( \sum_i C_i |z_i| \right)_{in} - \left( \sum_i C_i |z_i| \right)_{out} \right] F$$

Для раствора NaCl

$$\eta_p = \frac{Q_{до} (C_{in} - C_{out}) F}{N_{сп} l} = \eta_l - \frac{\Delta Q_d C_{in} F}{N_{сп} l}$$

Где:

- $\eta_p$  = Эффективность процесса
- $Q_{до}$  = Расход потока продукта из модуля ЭД
- $C$  = Концентрация раствора NaCl
- $N_{сп}$  = Количество пар ячеек
- $\Delta Q_d$  = Скорость потери воды

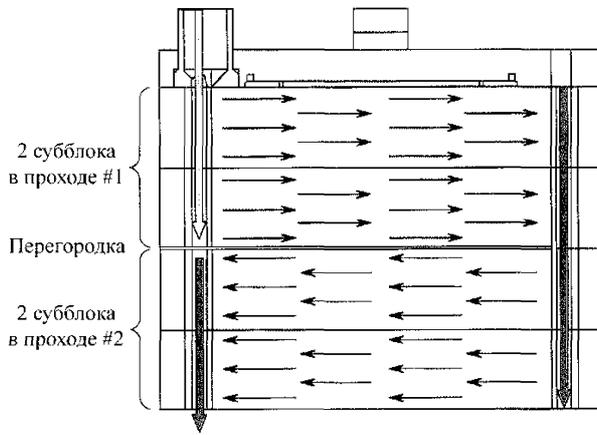


Ячейка наверху пакета  
Рециркуляция на впуске в ячейку

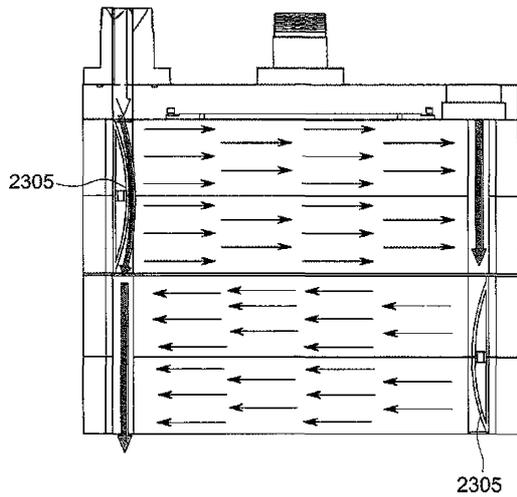
Ячейка посередине пакета

Ячейка внизу пакета

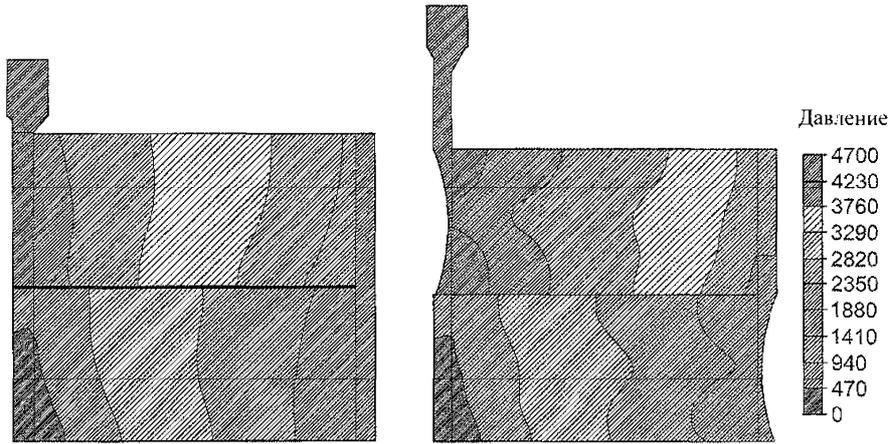
Фиг. 22



Фиг. 23А



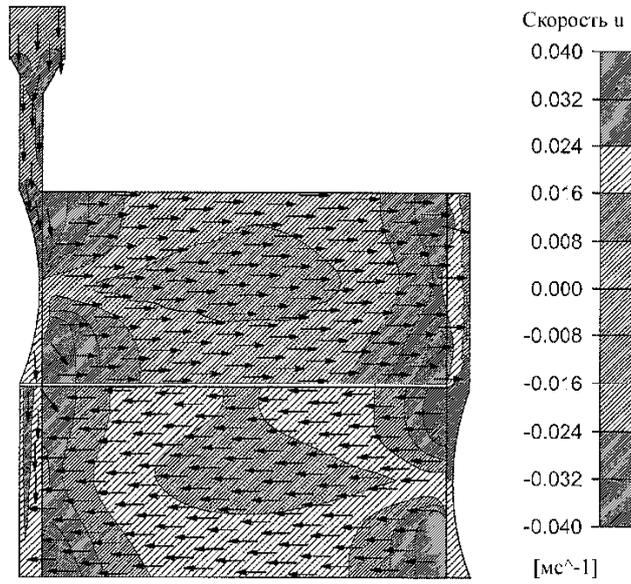
Фиг. 23В



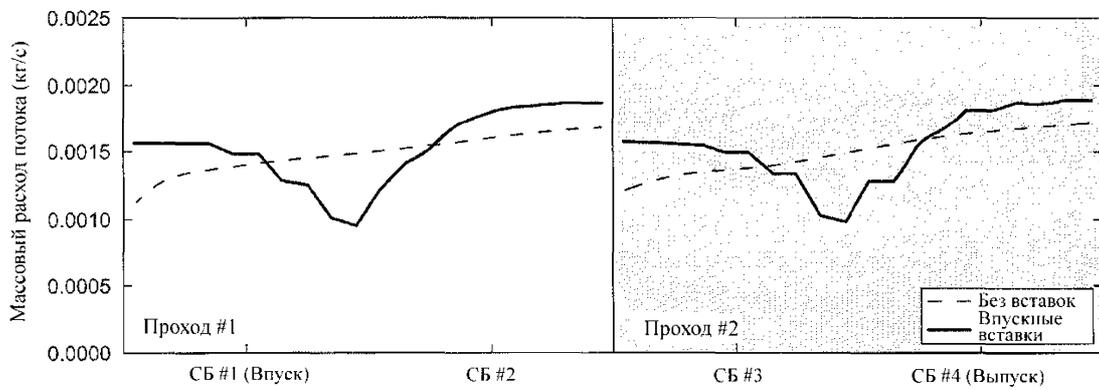
A

B

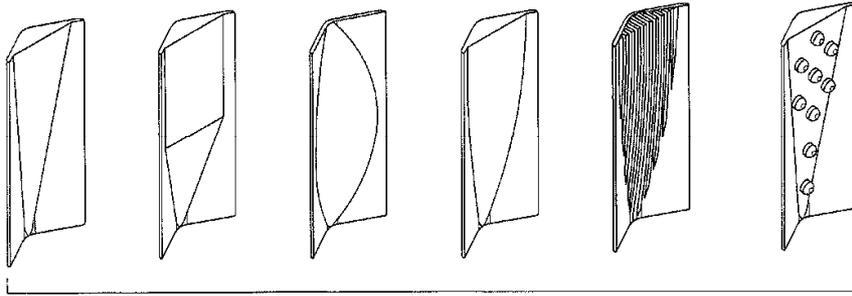
Фиг. 24



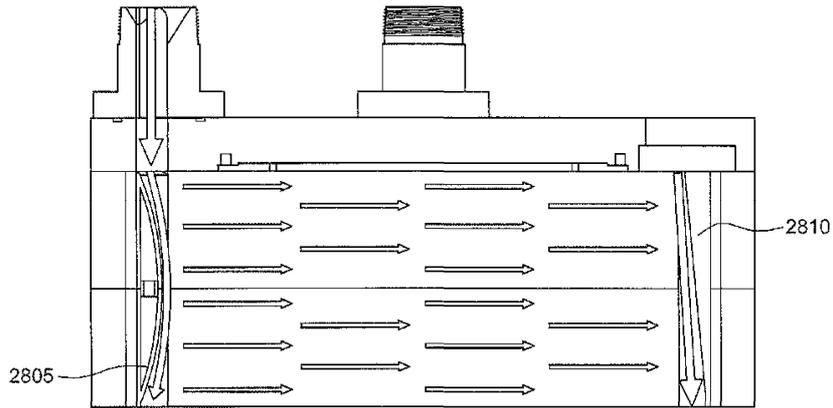
Фиг. 25



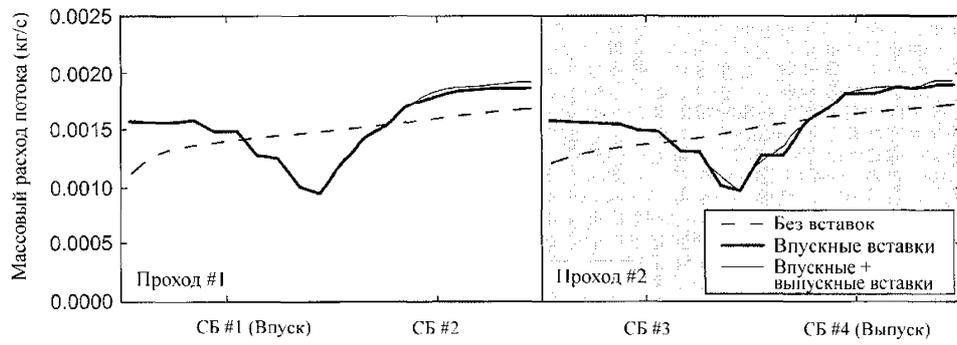
Фиг. 26



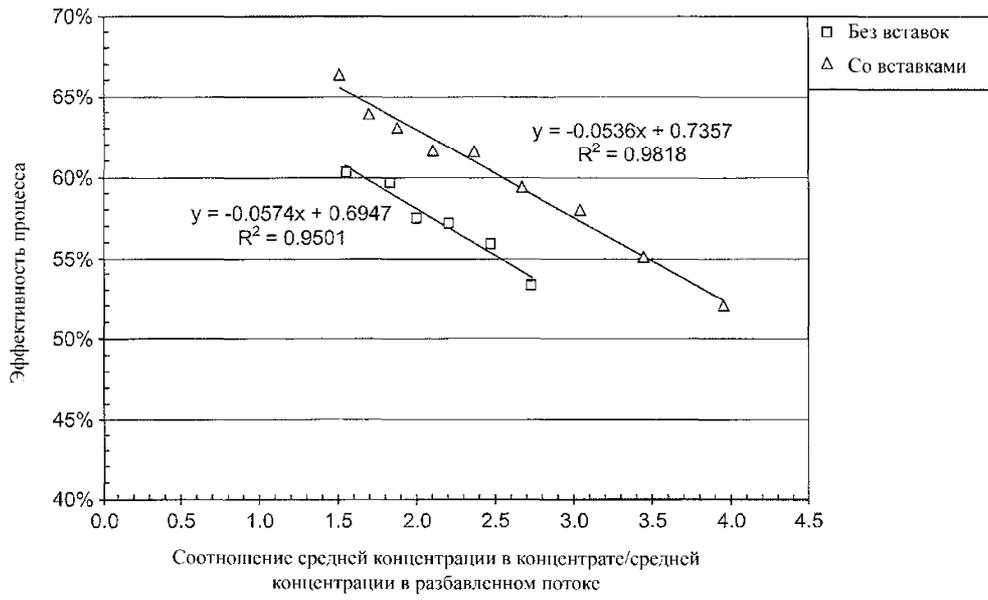
Фиг. 27



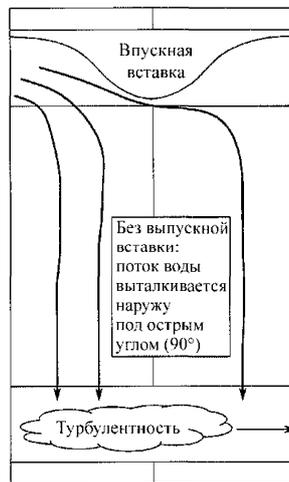
Фиг. 28



Фиг. 29



Фиг. 30



Фиг. 31А



Фиг. 31В

Примеры воздействия вставок на эффективность процесса и потребление энергии  
(раствор хлористого натрия в качестве подаваемого материала для разбавленного потока и концентрата)

## Первый пример

			Базовый вариант без вставок	Со вставками во впускных коллекторах	Со вставками во впускных и выпускных коллекторах
Расход разбавленного потока на выпуск (м <sup>3</sup> /ч)	2.67				
Расход потока концентрата на выпуск (м <sup>3</sup> /ч)	3.07				
Электропроводность разбавленного потока на выпуске (мСм/см)	50.5	Ток (А)	14.48	12.50	11.75
Электропроводность разбавленного потока на выпуске (мСм/см)	30.38	Напряжение (В пост. тока)	163.6	150.8	143.9
Электропроводность концентрата на выпуске (мСм/см)	61.93	Эффективность процесса (%)	60.1%	69.7%	74.1%
Электропроводность концентрата на выпуске (мСм/см)	75.73	Потребление энергии (кВтчас/м <sup>3</sup> )	0.89	0.71	0.63
Восстановление воды (%)	60%	Падение давления разбавленного потока (фунт/кв. дюйм)	15.0	17.8	16.1
Количество проходов в модуле	10	Падение давления концентрата (фунт/кв. дюйм)	22.7	19.1	17.0
Количество пар ячеек на один проход	200				

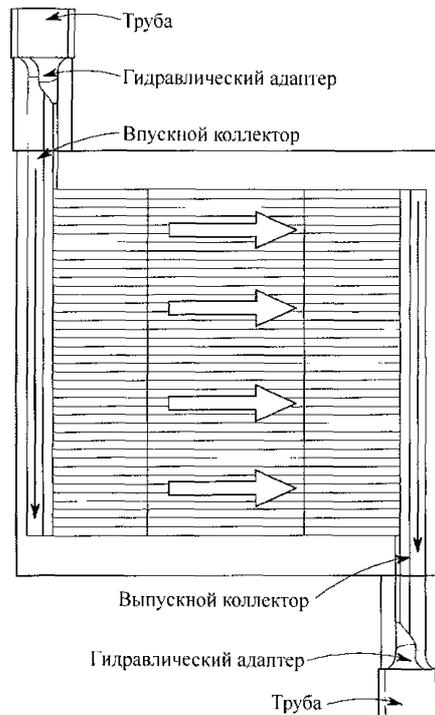
Фиг. 32А

Примеры воздействия вставок на эффективность процесса и потребление энергии  
(раствор хлористого натрия в качестве подаваемого материала для разбавленного потока и концентрата)

## Второй пример

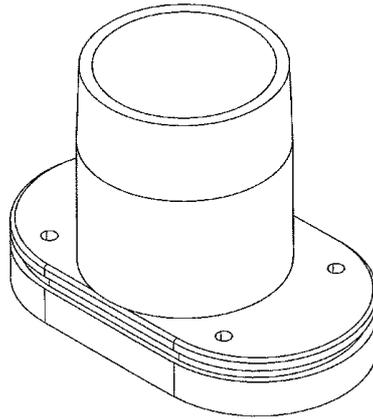
			Базовый вариант без вставок	Со вставками во впускных коллекторах	Со вставками во впускных и выпускных коллекторах
Расход разбавленного потока на выпуск (м <sup>3</sup> /ч)	2.63				
Расход потока концентрата на выпуск (м <sup>3</sup> /ч)	3.19				
Электропроводность разбавленного потока на выпуске (мСм/см)	30.26	Ток (А)	10.75	10.00	9.47
Электропроводность разбавленного потока на выпуске (мСм/см)	15.54	Напряжение (В пост. тока)	206.88	205.28	196.44
Электропроводность концентрата на выпуске (мСм/см)	68.27	Эффективность процесса (%)	49.5%	53.2%	56.2%
Электропроводность концентрата на выпуске (мСм/см)	73.71	Потребление энергии (кВтчас/м <sup>3</sup> )	0.85	0.78	0.71
Восстановление воды (%)	80%	Падение давления разбавленного потока (фунт/кв. дюйм)	13.9	22.1	21.4
Количество проходов в модуле	10	Падение давления концентрата (фунт/кв. дюйм)	13.6	17.7	14.9
Количество пар ячеек на один проход	200				

Фиг. 32В

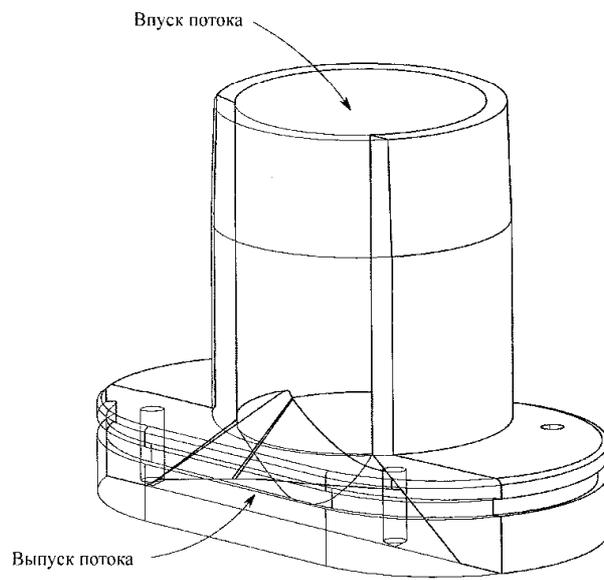


Фиг. 33

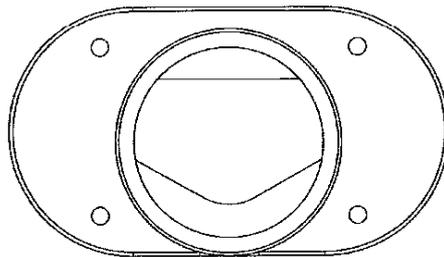
040270



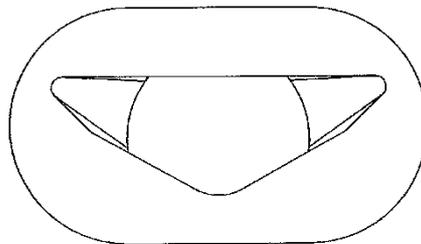
Фиг. 34А



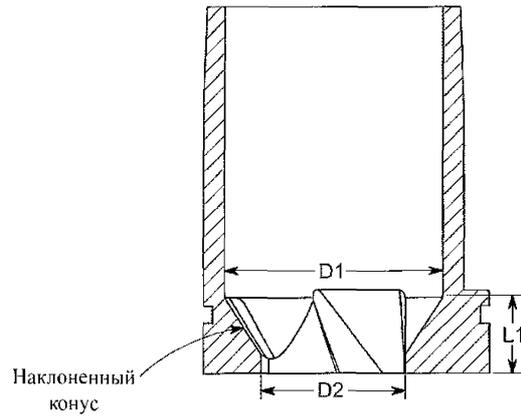
Фиг. 34В



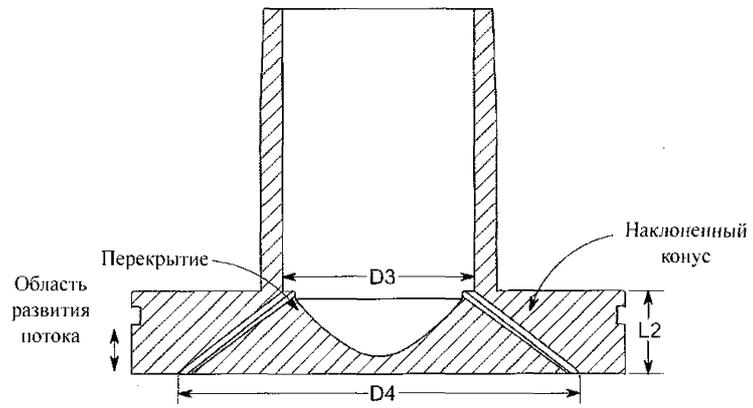
Фиг. 34С



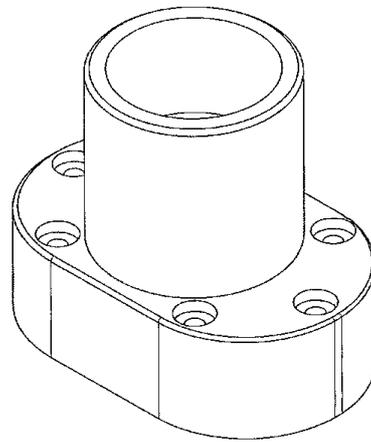
Фиг. 34D



Фиг. 34Е

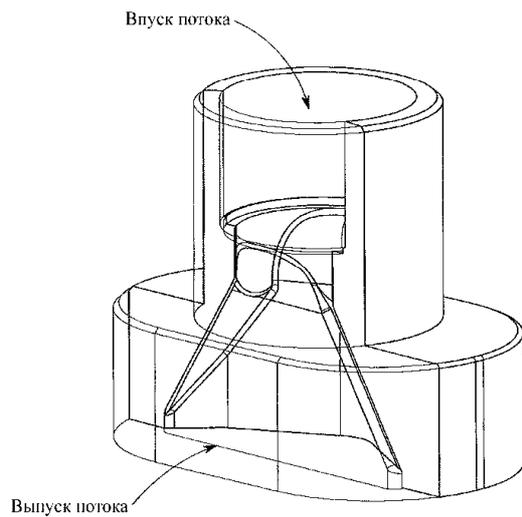


Фиг. 34F

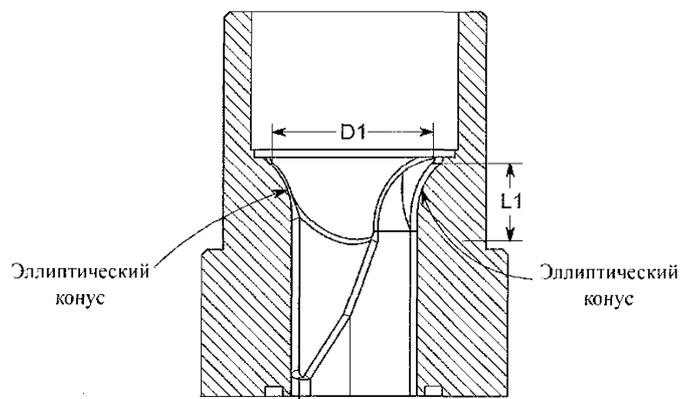


Фиг. 35А

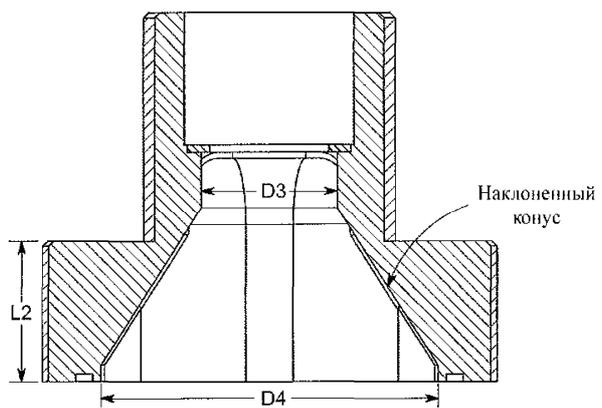
040270



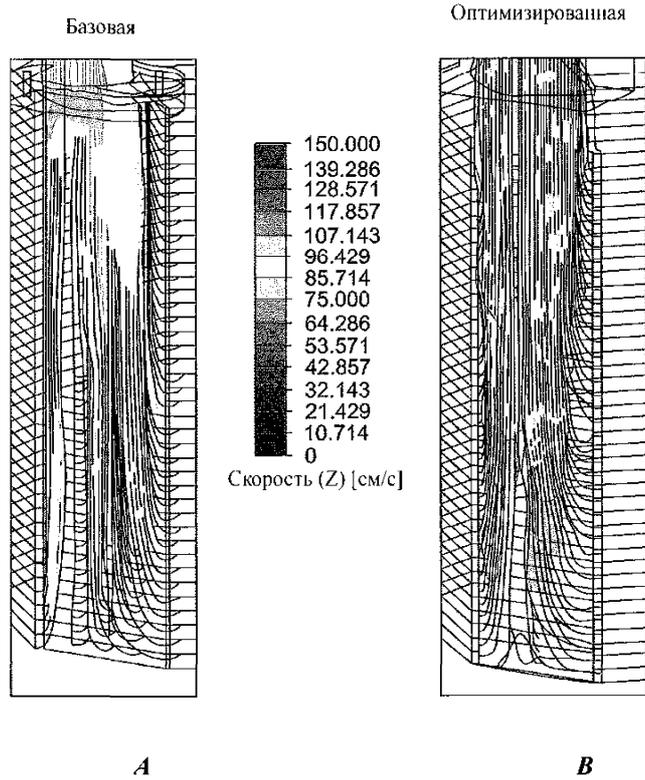
Фиг. 35В



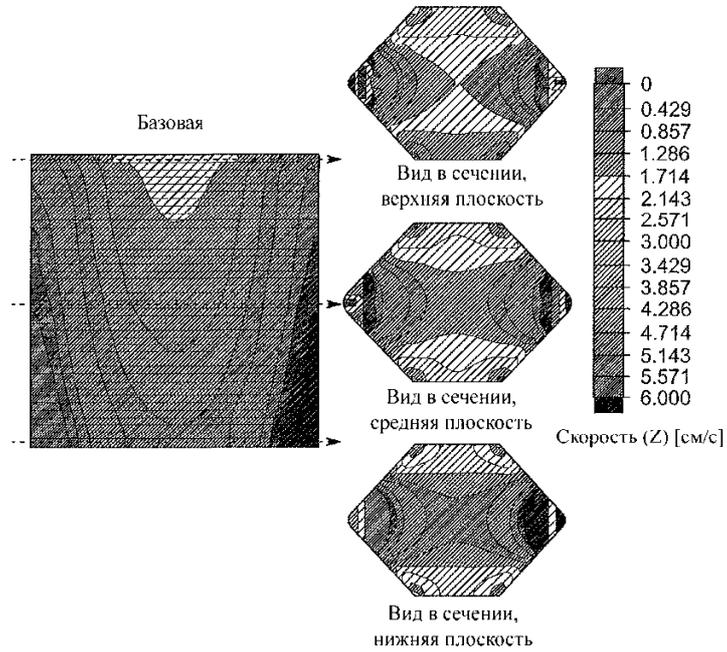
Фиг. 35С



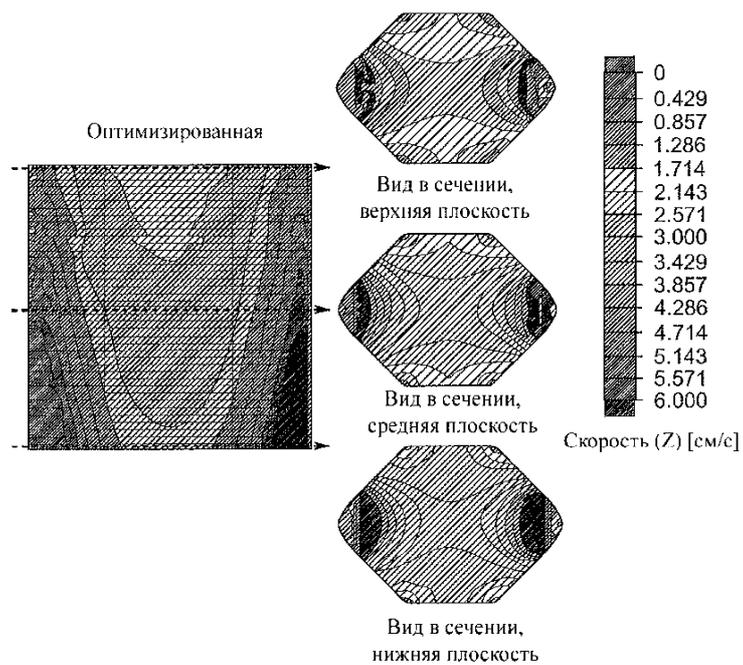
Фиг. 35D



Фиг. 36



Фиг. 37А



Фиг. 37В

