

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **041534**

(13) **B1**

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

(45) Дата публикации и выдачи патента
2022.11.03

(51) Int. Cl. **B01D 65/10** (2006.01)
B01D 53/22 (2006.01)

(21) Номер заявки
202190287

(22) Дата подачи заявки
2019.07.29

(54) **КОНТРОЛЬ РАБОЧЕГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ МЕМБРАННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ
ГАЗОВ**

(31) **62/711,187**

(32) **2018.07.27**

(33) **US**

(43) **2021.05.25**

(86) **PCT/US2019/043886**

(87) **WO 2020/023955 2020.01.30**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**ШЛЮМБЕРГЕР ТЕКНОЛОДЖИ Б.В.
(NL)**

(72) Изобретатель:
**Пан Шу, Медведев Олег О., Селайа
Гальван Хосе Р., Махлей III
Джордж Е., Морисато Ацуси, Дитрих
Джейсон М. (US)**

(74) Представитель:
Медведев В.Н. (RU)

(56) DAVID, OANA CRISTINA et al., 'Mixed gas separation study for the hydrogen recovery from H₂/CO/N₂/CO₂ post combustion mixtures using a Matrimid membrane', Journal of Membrane Science, 2011, vol. 378, pages 359-368. See abstract; and pages 360, 361

US-A1-20110035195

WO-A1-2015161968

RIBEIRO JR., CLAUDIO P. et al., 'Pure-and mixed-gas carbon dioxide/ethane permeability and diffusivity in a cross-linked poly (ethylene oxide) copolymer', Journal of Membrane Science, 2011, vol. 377, pages 110-123. See the whole document

CHEN, JUNJIE et al., 'Computational fluid dynamics modeling of the millisecond methane steam reforming in microchannel reactors for hydrogen production', RSC Advances, 16 July 2018, vol. 8, pages 25183-25200. See the whole document

(57) Байесовское рекурсивное оценивание используется для анализа параметров производительности системы мембранного разделения на основании исторических рабочих данных мембранной системы. Байесовское оценивание учитывает исторические данные за предыдущие временные интервалы, чтобы спрогнозировать будущую производительность мембранного разделения, чтобы избежать неожиданных простоев и непредвиденного технического обслуживания. Набор переменных состояния, используемых для моделирования производительности, используется с моделью ухудшения характеристик для прогнозирования изменений производительности и технического обслуживания на основании измеренных свойств потоков пермеата, непермеата и сырья.

B1

041534

**041534
B1**

Перекрестная ссылка на родственные заявки

Настоящая заявка испрашивает приоритет по предварительной заявке на патент США № 62/711187, поданной 27 июля 2018 г., содержание которой полностью включено в настоящий документ посредством ссылки.

Уровень техники

Системы мембранного разделения газов содержат мембраны, производительность которых меняется со временем службы мембраны. Производительность мембраны меняется из-за физических изменений в мембране, в том числе пластической деформации, физических изменений и механических напряжений, приложенных к мембране.

Контроль производительности мембраны в системах мембранного разделения газов включает анализ текущей производительности мембраны для оценки будущей производительности и эксплуатационных расходов, а также для предотвращения ожидаемого простоя системы из-за отказа мембранного разделителя газов. Существует необходимость в точных способах определения состояния мембраны, чтобы избежать незапланированных остановок работы из-за отказа мембраны.

Краткое описание чертежей

Аспекты настоящего изобретения станут понятными при прочтении нижеследующего подробного описания со ссылкой на прилагаемые фигуры. Следует отметить, что в соответствии со стандартной практикой в данной отрасли различные элементы показаны не в масштабе. Фактически, для ясности описания размеры различных элементов могут быть произвольно увеличены или уменьшены.

На фиг. 1 показано схематическое изображение системы мембранного разделения газов в соответствии с некоторыми вариантами осуществления,

на фиг. 2 - схематическое изображение системы контроля мембраны в соответствии с некоторыми вариантами осуществления,

на фиг. 3 - схематическое изображение кривой производительности мембраны в системе мембранного разделения газов в соответствии с некоторыми вариантами осуществления.

Описание предпочтительных вариантов осуществления изобретения

В следующем раскрытии изложено множество различных вариантов осуществления или примеров для реализации различных признаков предложенного предмета изобретения. Конкретные примеры компонентов, значений, операций, материалов, компоновок и т.д. описаны ниже для упрощения настоящего раскрытия и не носят ограничительного характера. Предполагаются другие компоненты, значения, операции, материалы, компоновки и т.д. Кроме того, в настоящем раскрытии в различных примерах могут повторяться ссылочные числовые и/или буквенные позиции. Это повторение приводится в целях упрощения и ясности и не обуславливает взаимосвязь между различными вариантами осуществления и/или обсуждаемыми конфигурациями.

Мембранная технология широко используется в различных отраслях промышленности для достижения эффективного, энергосберегающего разделения компонентов в потоке сырья, подаваемом на мембрану. Мембранная технология была адаптирована для разделения газов в области добычи нефти и углеводородов. Производительность систем мембранного разделения подвержена внезапному отказу при превышении мембранами оставшегося срока службы. Технология мембранного разделения прошла длительное развитие из-за характеристик старения мембран после воздействия повышенных температур, давления или других факторов, вызывающих напряжение.

Внезапное повреждение мембран обычно связано с непредвиденными событиями в действующих системах мембранного разделения, хотя длительное изменение мембраны также способствует непредвиденным отказам. Длительное ухудшение характеристик мембран связано с качеством изготовления отдельных мембран и условиями эксплуатации оборудования, в котором используются системы мембранного разделения. Качество мембран, используемых в системах мембранного разделения, может сильно варьироваться в зависимости от характеристик процессов изготовления мембран, которые трудно контролировать. Таким образом, точное прогнозирование срока службы мембраны в системе разделения является значимой задачей. В настоящем раскрытии предлагается способ анализа производительности мембраны в контексте системы мониторинга состояния мембраны, чтобы способствовать своевременному техническому обслуживанию и вмешательству в системы мембранного разделения для предотвращения непредвиденных отказов и связанных с ними затрат на производственный процесс, который зависит от указанных систем мембранного разделения.

В настоящем раскрытии описывается система мониторинга состояния мембраны и контроля мембраны, которая собирает и объединяет рабочие данные в реальном времени из систем мембранного разделения на установках разделения. Собранные объединенные данные используются для обновления моделей, связанных с производительностью мембраны в текущем интервале, а также производительностью мембраны в будущем. Модели используются для оценки состояния мембраны, которое, в свою очередь, используется для контроля процесса мембранного разделения. Модели могут использоваться на всей установке по подготовке газа для повышения эффективности работы. Модели также могут быть использованы для улучшения конструкций установок разделения газов и запасов прочности при проектировании установок в соответствии с рабочими характеристиками установки.

На фиг. 1 показано схематическое изображение системы 100 мембранного разделения. Поток поступающего материала или поток сырья проходит через впускную линию 102 в мембранный агрегат 104. В некоторых случаях поток поступающего материала представляет собой газообразный поток. В некоторых случаях поток поступающего материала представляет собой жидкий поток. В некоторых случаях поток материала представляет собой поток материала в сверхкритическом состоянии. Мембранный агрегат 104 содержит по меньшей мере одну мембрану для выполнения процесса разделения компонентов потока поступающего материала и содержит по меньшей мере одну мембрану, средство крепления мембраны и множество датчиков, расположенных внутри мембранного агрегата для регистрации состояния мембраны, потока поступающего материала или потока материала после прохождения мембраны (потоки пермеата и непермеата). Поток поступающего материала, входящий в мембранный агрегат 104, разделяется на поток пермеата, который проходит через выпускную линию 106, и поток непермеата, который проходит через выпускную линию 108. Поток пермеата, который проходит через выпускную линию 106, представляет собой поток материала, который прошел или проник через мембрану в мембранном агрегате 104. Поток непермеата представляет собой материал, который после входа в мембранный агрегат 104 был выведен из мембранного агрегата 104 без прохождения через мембрану. Давление поступающего материала способствует формированию потока пермеата в выпускной линии 106 посредством приложения физической силы к мембране, поддерживая подачу смешанного входящего материала в контакте с мембраной и способствуя осуществлению, например, процесса химического связывания, процесса физической адгезии, капиллярного процесса или другого физического или химического процесса, связанного с разделением материалов на отдельные потоки с использованием мембраны.

В некоторых вариантах осуществления поток сырья или поток поступающего материала представляет собой смесь газообразных компонентов. В некоторых вариантах реализации поток сырья находится при повышенном давлении и/или повышенной температуре, чтобы способствовать разделению компонентов газовой смеси мембраной в системе мембранного разделения. В некоторых вариантах осуществления газообразные компоненты включают один или более компонентов из диоксида углерода, метана, этана, пропана, бутана, изобутана или других насыщенных углеводородов, например, поток природного газа на устье скважины. В некоторых вариантах осуществления газообразные компоненты включают ненасыщенные углеводороды, такие как этен, пропен, один или более изомеров бутена, один или более изомеров пентена и т.д. В некоторых вариантах осуществления один или более газообразных компонентов включают смеси неорганических молекул, таких как аммиак, сероводород, синильная кислота, монооксид углерода, диоксид углерода, сероводород и т.д. В настоящем документе описываются системы разделения газов, использующие мембранную технологию, однако предполагается, что объем настоящего раскрытия, относящийся к системе для мониторинга рабочего состояния установок мембранного разделения, охватывает другие применения помимо разделения газов, включая системы разделения жидкостей, очистку воды и/или применения для добычи полезных ископаемых и ресурсов, в которых используется технология мембранного разделения.

На фиг. 2 показано схематическое изображение системы 200 мониторинга рабочего состояния мембраны согласно некоторым вариантам осуществления. Система 200 мониторинга рабочего состояния мембраны содержит установки 202 и 212 мембранного разделения. Каждая установка мембранного разделения содержит множество систем 204, 206, 208 и 214, 216 и 218 мембранного разделения. Системы мембранного разделения, раскрытые в настоящем документе, принимают входящий поток или сырье, как описано со ссылкой на фиг. 1, в агрегате мембранного разделения, аналогичном агрегату 104 мембранного разделения, который производит 2 выходных продукта: течение пермеата или поток пермеата и течение непермеата или поток непермеата. Поток пермеата из агрегата мембранного разделения содержит одну или более фракций входящего потока или сырья, которые селективно проходят через мембрану в агрегате 104 мембранного разделения в выпускную линию для пермеата, такую как выпускная линия 106. Оставшаяся часть входящего потока или сырья направляется к потоку непермеата, проходящему в выпускную линию для непермеата, такую как выпускная линия 108.

Информация, передаваемая между установками 202 и 212 мембранного разделения и вычислительным ресурсом 220, включает результаты измерения рабочих характеристик установок разделения в реальном времени, состояние рабочих параметров установки и т.д. В некоторых случаях вычислительный ресурс 220 представляет собой сервер или кластер серверов, расположенный в одной установке, который анализирует и координирует производительность агрегатов мембранного разделения в одной установке. В некоторых случаях вычислительный ресурс 220 представляет собой сервер или кластер серверов или другой вычислительный ресурс, который отделен от установки мембранного разделения и принимает данные от и координирует рабочие параметры одной или более установок мембранного разделения, соединенных с возможностью связи с вычислительным ресурсом. Вычислительный ресурс содержит запоминающие устройства, процессоры, оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), сетевое оборудование и т.д. для выполнения вычислений, связанных с мониторингом, записью и изменением рабочих параметров установок мембранного разделения и отдельных агрегатов мембранного разделения, расположенных в них. В некоторых случаях вычислительный ресурс 220 является ресурсом облачного хранилища с коммерчески доступным вычислительным аппаратным обеспечением, хранящим и реализующим

инструкции, хранящиеся на его запоминающих устройствах, или переданные в ресурс облачного хранилища с помощью вычислительного ресурса в установке мембранного разделения. Ниже приведено дальнейшее описание вычислительного ресурса.

Каждая система мембранного разделения или агрегат мембранного разделения в установке мембранного разделения предоставляет данные, касающиеся переменных расхода Q , температуры T , давления P и составов C_i (номер индекса i обозначает различные компоненты в потоке, выходящем из мембранного разделителя) в каждом потоке, чтобы обеспечить неразрушающий мониторинг состояния мембраны. Эти переменные можно разделить на две категории. Первая категория представляет собой переменные сырья и контрольные переменные \bar{X} . Эти параметры определяются перед мембранным разделением газов и обычно включают расход, температуру, давление в линии (например, давление на входе), парциальное давление газообразных компонентов в линии, химический состав входящего потока или потока сырья и т.д. Эти параметры также включают другие рабочие параметры, не определенные процессом, такие как график технического обслуживания или замены мембраны, профиль операторов или технических специалистов, наблюдение за операциями, а также историю прошлых состояний, историю конкретного мембранного агрегата и т.д. Вторая категория представляет собой выходные переменные \bar{Y} .

Эти параметры представляют результаты мембранного разделения газов, такие как давление в выпускных линиях (например, давление в линии пермеата и давление в линии непермеата), расходы фракций пермеата и непермеата через выпускные линии, химический состав фракций пермеата и непермеата в выпускных линиях и т.д.

Моделирование производительности отдельной мембраны включает сбор, хранение, передачу и анализ данных, касающихся характеристических параметров \bar{M} мембраны, включающих площади $S_{\text{мембраны}}$, нормализованные по давлению скорости потока каждого компонента P_i и т.д. Указанные данные передаются между установками мембранного разделения и вычислительным ресурсом 220, чтобы способствовать точному моделированию и контролю отдельных мембран в агрегатах мембранного разделения. При моделировании производительности отдельной мембраны и заданных \bar{X} и \bar{M} можно получить \bar{Y} посредством модели F мембранного разделения, приведенной ниже в уравнении 1

$$\bar{Y} = F(\bar{X}, \bar{M}) \text{ (Уравнение 1)}$$

И наоборот, можно получить характеристики \bar{M} мембраны из \bar{X} и \bar{Y} с помощью соотношения, описанного в уравнении 2

$$\bar{M} = F^{-1}(\bar{X}, \bar{Y}) \text{ (Уравнение 2)}$$

Уравнение 2 представляет собой математическую основу для мониторинга состояния мембраны посредством измерения потоков сырья, пермеата и непермеата.

Изменение производительности мембранного агрегата представлено изменением \bar{M} , в частности, скоростей потока P_i каждого компонента со временем.

Моделирование и прогноз этих изменений приведет к оценке будущего состояния мембраны, давая возможность контролировать мембранный процесс на основе прогнозируемого будущего состояния. Объединенные данные, включая данные об отдельных мембранах, модели и оценки EOL и RUL, передаются в вычислительный ресурс 220 для объединенных имитационных моделей мембраны, использующих байесовское рекурсивное оценивание.

Байесовское рекурсивное оценивание в имитационных моделях постоянно обновляется, когда предполагается процесс Маркова. В процессе Маркова новые данные включаются в модели после прибытия, и обновления моделей не зависят от повторной обработки исторических данных о рабочей производительности, что снижает общую вычислительную нагрузку на вычислительный ресурс 220 во время работы и моделирование характеристик производительности установки. Периодические или нерегулярные команды передаются от вычислительного ресурса 220 к дополнительным вычислительным ресурсам и/или системам контроля отдельных установок мембранного разделения (или отдельных систем мембранного разделения) для регулирования текущих или продолжающихся операций установки. Модели операций установки, производительности мембраны и прогнозируемых скоростей изменения мембраны передаются между вычислительным ресурсом 220 и системами контроля или ресурсами действующих установок 202, 212 мембранного разделения. Кроме того, модели операций установки, производительности мембраны и прогнозируемых скоростей изменения мембраны передаются между вычислительным ресурсом 220 и системами контроля или вычислительными ресурсами на новых, автономных или не смоделированных ранее установках разделения, чтобы спрогнозировать режимы работы установки и производительность и/или выход продукта, для снижения эксплуатационных расходов и прогнозирования уставок технического обслуживания и производительности установки.

Обзор байесовского рекурсивного подхода к обработке данных системы мембранного разделения газов описан ниже. С байесовским подходом используются два соотношения: уравнения состояния и наблюдения. Уравнение состояния представлено ниже в уравнении 3

$$X(t + \Delta t) = f(X(t), v) \text{ (Уравнение 3)}$$

В уравнении 3 $X(t)$ - вектор случайных переменных состояния в момент времени t .

Функция f - это функция перехода состояния, описывающая, как $X(t)$ изменяется с t , а v - идентично независимо распределенные шумы процесса, аналогичные параметрам имитационных моделей мембраны.

В некоторых вариантах осуществления способа переменные состояния имеют физический смысл. В некоторых случаях переменные состояния не имеют физического смысла. Переменные состояния с физическим смыслом могут включать растворимость и диффузионную способность молекулы газа в мембране, хотя другие физические параметры также находятся в пределах объема настоящего раскрытия. Уравнение (3) дает вероятностное распределение P для $X(t + \Delta t)$ на основании $X(t)$, а именно

$$P(X(t + \Delta t)|X(t))$$

Уравнение измерений представлено уравнением 4 ниже

$$Z(t) = H(X(t), w) \text{ (Уравнение 4)}$$

где $Z(t)$ - вектор измерений случайных переменных, представляющих наблюдения, соответствующие вектору состояния в момент времени t .

Функция наблюдения H связывает вектор состояния с вектором измерения. В неограничивающем примере для типичной мембранной системы $Z(t)$ включает, по меньшей мере, расход, химические составы и температуры сырья, потока пермеата и потока непермеата, а w представляет собой идентично независимо распределенный шум измерения, связанный с измерениями расхода, химических составов и температур. Уравнение 4 дает вероятностное распределение $Z(t)$, зависящее от $X(t)$, а именно

$$P(X(Z(t)|X(t)))$$

При выполнении процедур байесовской рекурсии в отношении потока данных, относящегося к рабочему состоянию мембран и установки мембранного разделения, рекурсия упрощается за счет использования дискретных временных интервалов для данных. Измерения назначаются временным интервалам измерения, а прогнозы назначаются будущим временным интервалам, когда имеет место рекурсия. Для набора временных интервалов 1, 2, 3, ..., k , X_k и Z_k - значения состояния и измерения, связанные с интервалом k . Следующие операции связаны со способом обновления моделей производительности и составления прогнозов на основании обновленных моделей.

На фиг. 3 показана блок-схема способа 300 обновления моделей производительности и составления прогнозов на основании обновленных моделей согласно одному варианту осуществления. В первой операции 302 начальное вероятностное состояние $P(X_0) = P(X_0|Z_0)$ определяют на основании предшествующей информации или данных о состоянии, например, одной или более систем мембранного разделения в установке мембранного разделения. Данные и/или предшествующая информация включает в некоторых вариантах осуществления данные в реальном времени, передаваемые в потоковом режиме из системы мембранного разделения и записываемые вычислительным ресурсом, таким как вычислительный ресурс 220, или системой контроля, хранящейся в установке мембранного разделения. В некоторых вариантах осуществления данные и/или предшествующая информация взяты из той же системы, которая анализируется и для которой составляются прогнозы. В некоторых вариантах осуществления данные и/или предшествующая информация получены из аналогичной рабочей системы и применяются для моделирования новой, не работавшей системы до начала эксплуатации. В некоторых случаях данные представляют собой характеристические данные мембраны от производителя мембраны.

В операции 304 поток данных в реальном времени собирают из системы мембранного разделения. В операции 306 X_k определяют согласно данным, собранным во временном интервале между k и начальным временным интервалом 0. X_k определяют согласно предшествующим данным, собранным в операции 304, и вероятностному распределению

$$P(X_k|Z_{k-1}) = \int P(X_k|X_{k-1})P(X_{k-1}|Z_{0:k-1})dX_{k-1} \text{ Уравнение (5)}$$

На основании значения вероятностного распределения в момент времени k прогнозируемое значение Z_k также получается из $P(Z_k|X_k)$, как в уравнении (4). Операции 304 и 306 выполняют с использованием информации из предыдущих этапов $P(X_{k-1}|Z_{0:k-1})$ в качестве предшествующей информации, где $Z_{0:k-1}$ представляет информацию об измерениях, выполненных от $t=0$ до $t=k-1$.

В операции 308 производительность мембраны определяют на основании прогноза, определенного в операции 308, и обновленные рабочие модели и/или контрольные уставки передают из вычислительного ресурса в установки мембранного разделения.

В операции 310 дополнительные данные в реальном времени собирают из систем мембранного разделения на различных установках мембранного разделения. В операции 312 на основании дополнительных данных в реальном времени, собранных в операции 310, модель производительности мембранной системы обновляют согласно вариантам осуществления, раскрытым в настоящем документе.

В одном варианте осуществления X_k обновляется следующим образом, причем

$$P(X_k|Z_{0:k}) = P(X_k|Z_k, X_{0:k-1}) \text{ Уравнение (6)}$$

$$P(X_k|Z_{0:k}) = \frac{P(Z_k|X_k, Z_{0:k-1})P(X_k|Z_{0:k-1})}{P(Z_k|Z_{0:k-1})} \text{ Уравнение (7)}$$

$$P(X_k|Z_{0:k}) = \frac{P(Z_k|X_k, Z_{0:k-1})P(X_k|Z_{0:k-1})}{\int P(Z_k|X_k)P(X_k|Z_{0:k-1})} \text{ Уравнение (8)}$$

В операции 314 определяют, следует ли продолжать моделирование и разработку системы. Когда принято решение продолжить, время увеличивается до нового интервала k+1 в операции 318, и способ продолжается операцией 306. Когда принято решение остановить операции, работа переходит к операции 320, где данные сохраняют и определяют новое инициализированное состояние, как описано выше в операции 302.

Выше изложены признаки нескольких вариантов осуществления, чтобы специалисты в данной области техники могли лучше понять аспекты настоящего изобретения. Специалистам в данной области техники будет понятно, что настоящее изобретение можно просто использовать в качестве основы для разработки или модификации других процессов и конструкций для осуществления тех же целей и/или достижения тех же преимуществ вариантов осуществления, описанных в настоящем документе. Специалистам в данной области техники также будет понятно, что такие эквивалентные конструкции не отходят от сущности и объема правовой охраны настоящего изобретения, и что они могут выполнить различные изменения, замены и исправления в них без отступления от сущности и объема правовой охраны настоящего изобретения.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ контроля рабочего состояния систем мембранного разделения газов, включающий в себя этапы, на которых осуществляют

подачу газовой смеси в мембранный разделитель, содержащий мембрану;

разделение газовой смеси на первый газ и второй газ с использованием мембранного разделителя;

измерение расхода газовой смеси, первого газа и второго газа;

идентифицирование химических составов газовой смеси, первого газа и второго газа;

измерение, по меньшей мере, давлений газовой смеси и первого газа;

определение термодинамического состояния газовой смеси, первого газа и второго газа исходя из измеренных давлений;

определение растворимости и диффузионной способности молекулы газа в мембране на основании расходов и составов, а также термодинамического состояния с использованием физической модели;

прогнозирование будущих растворимости и диффузионной способности молекулы газа в газовой смеси в мембране с использованием модели временного ряда и

регулировку расхода или термодинамического состояния газовой смеси на основании спрогнозированных будущих растворимости и диффузионной способности молекулы газа в газовой смеси в мембране.

2. Способ по п.1, дополнительно включающий в себя сравнение растворимости и диффузионной способности молекулы газа в мембране с ранее спрогнозированными растворимостью и диффузионной способностью молекулы газа в мембране и обновление модели временного ряда на основании сравнения.

3. Способ по п.1, дополнительно включающий в себя сравнение спрогнозированных будущих растворимости и диффузионной способности молекулы газа в мембране с характеристическими параметрами мембраны.

4. Способ по п.1, отличающийся тем, что модель временного ряда основана на данных от множества мембранных разделителей.

5. Способ по п.1, дополнительно включающий в себя обновление модели временного ряда посредством обновления вероятностного распределения с использованием байесовского рекурсивного метода.

6. Способ контроля рабочего состояния систем мембранного разделения газов, включающий в себя этапы, на которых осуществляют

подачу газовой смеси в мембранный разделитель, содержащий мембрану;

разделение газовой смеси на первый газ и второй газ с использованием мембранного разделителя;

измерение расхода газовой смеси, первого газа и второго газа;

идентифицирование химических составов газовой смеси, первого газа и второго газа;

измерение, по меньшей мере, давлений газовой смеси и первого газа;

определение термодинамического состояния газовой смеси, первого газа и второго газа исходя из измеренных давлений;

определение растворимости и диффузионной способности молекулы газа в мембране на основании расходов и составов, а также термодинамического состояния с использованием физической модели;

прогнозирование будущих растворимости и диффузионной способности молекулы газа в мембране с использованием модели временного ряда;

определение вероятностного распределения спрогнозированных будущих растворимости и диффу-

зионной способности молекулы газа;

регулировку расхода или термодинамического состояния газовой смеси на основании спрогнозированных будущих растворимости и диффузионной способности молекулы газа и

обновление модели временного ряда на основании вероятностного распределения спрогнозированных будущих растворимости и диффузионной способности молекулы газа.

7. Способ по п.6, дополнительно включающий в себя сравнение растворимости и диффузионной способности молекулы газа в мембране с ранее спрогнозированной растворимостью и диффузионной способностью молекулы газа в мембране, причем обновление модели временного ряда также основано на сравнении.

8. Способ по п.6, отличающийся тем, что модель временного ряда основана на данных от множества мембранных разделителей.

9. Способ по п.6, дополнительно включающий в себя сравнение спрогнозированных будущих растворимости и диффузионной способности молекулы газа в мембране с характеристическими параметрами мембраны.

10. Способ контроля рабочего состояния систем мембранного разделения газа, включающий в себя этапы, на которых осуществляют

подачу газовой смеси в мембранный разделитель, содержащий мембрану;

разделение газовой смеси на первый газ и второй газ с использованием мембранного разделителя;

измерение расхода газовой смеси, первого газа и второго газа;

идентифицирование химических составов газовой смеси, первого газа и второго газа;

измерение, по меньшей мере, давлений газовой смеси и первого газа;

определение термодинамического состояния газовой смеси и первого газа исходя из измеренных давлений;

определение растворимости и диффузионной способности молекулы газа в мембране на основании расходов и составов, а также термодинамического состояния с использованием физической модели;

прогнозирование будущих растворимости и диффузионной способности молекулы газа в мембране с использованием модели временного ряда;

сравнение спрогнозированных будущих растворимости и диффузионной способности молекулы газа в мембране с характеристическим параметром мембраны;

регулировку мембранного процесса на основании спрогнозированных будущих растворимости и диффузионной способности молекулы газа и сравнения спрогнозированных будущих растворимости и диффузионной способности молекулы газа мембраны с характеристическим параметром мембраны;

определение вероятностного распределения спрогнозированных будущих растворимости и диффузионной способности молекулы газа;

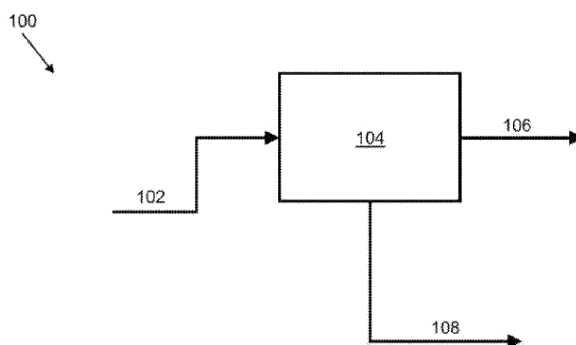
регулировку расхода или термодинамического состояния газовой смеси на основании спрогнозированных будущих растворимости и диффузионной способности молекулы газа и

обновление модели временного ряда на основании вероятностного распределения спрогнозированных будущих растворимости и диффузионной способности молекулы газа.

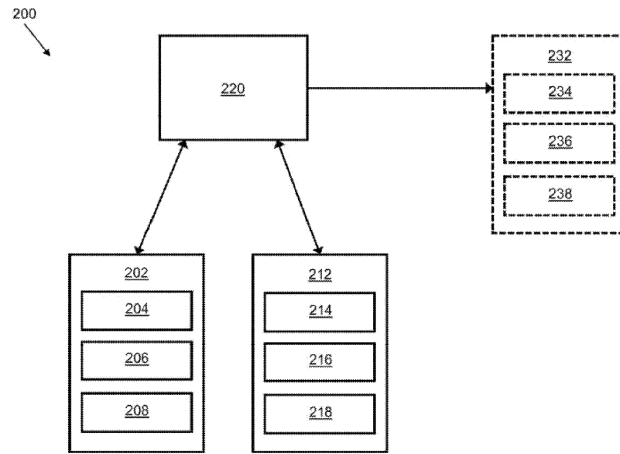
11. Способ по п.10, дополнительно включающий в себя сравнение растворимости и диффузионной способности молекулы газа в мембране с ранее спрогнозированной растворимостью и диффузионной способностью молекулы газа в мембране, причем обновление модели временного ряда также основано на сравнении.

12. Способ по п.10, отличающийся тем, что модель временного ряда основана на данных от множества мембранных разделителей.

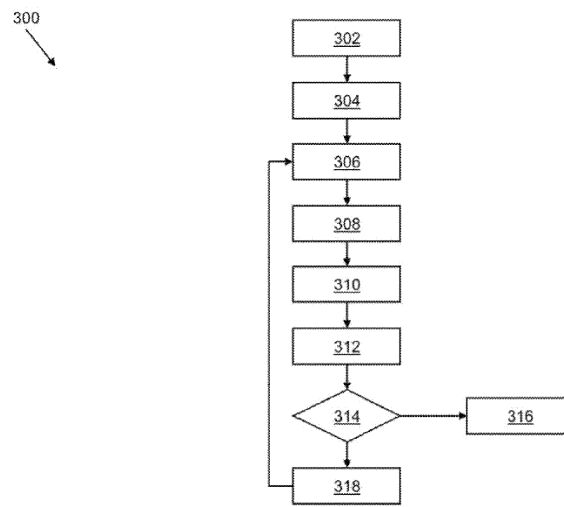
13. Способ по п.10, дополнительно включающий в себя остановку работы мембранного разделителя на основании спрогнозированных будущих растворимости и диффузионной способности молекулы газа в мембране.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3