

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **042131**

(13) **B1**

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

**(45)** Дата публикации и выдачи патента  
**2023.01.18**

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

**(21)** Номер заявки  
**202190143**

**(22)** Дата подачи заявки  
**2019.07.29**

---

**(54) СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕСУРСА  
МЕМБРАНЫ ДЛЯ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ**

---

**(31)** 62/711,134

**(32)** 2018.07.27

**(33)** US

**(43)** 2021.05.19

**(86)** PCT/US2019/043899

**(87)** WO 2020/023956 2020.01.30

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

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

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

**(56)** XIA, JIANZHONG et al.: "Physical aging and carbon dioxide plasticization of thin polyimide films in mixed gas permeation", Journal of Membrane Science, 2014, vol. 450, pages 457-468, See pages 458-460, 462, 467.

MULLER, NILS et al.: "Physical ageing and lifetime prediction of polymer membranes for gas separation processes", Journal of Membrane Science, 2016, vol. 516, pages 33-46, See abstract; and pages 35-38.

WO-A1-2016122067  
CN-A-105152317  
US-A1-20110035195

---

**(57)** Мембраны, которые используют в технологиях мембранного разделения, со временем претерпевают изменения вследствие изменений физических характеристик мембраны. Прогнозирование остаточного эксплуатационного ресурса мембраны выполняется с помощью адаптации модели изменения свойств мембраны к полученным в режиме реального времени рабочим характеристикам, зарегистрированным для мембраны, и с помощью сравнения более поздних рабочих характеристик мембраны с моделью изменения свойств. Обновление модели изменения свойств во время функционирования мембраны улучшает оценки остаточного эксплуатационного ресурса мембраны и позволяет получить точные оценки предполагаемого окончания срока эксплуатации мембраны.

---

**B1**

**042131**

**042131**  
**B1**

Настоящая заявка испрашивает приоритет по предварительной заявке на патент США № 62/711134, поданной 27 июля 2018 г., содержание которой полностью включено в настоящий документ посредством ссылки.

### **Уровень техники**

Мембранная технология представляет собой эффективный инструмент разделения газов. Со временем вследствие таких факторов, как физическое старение, пластификация и механическое старение, изменяются эксплуатационные характеристики мембран для разделения газов, которые включают в себя селективность и общую пропускную способность мембраны. Мембраны используют во многих областях техники, таких как добыча нефти, разделение газов, обратный осмос, очистка сточных вод, топливные элементы, а также в медицинских целях.

Мембраны являются расходными компонентами систем очистки и разделения, которые подлежат замене в том случае, когда производительность и/или пропускная способность опускаются ниже заданного порогового значения. Замена мембран через регулярные промежутки времени приводит к чрезмерным эксплуатационным расходам, поскольку в некоторых случаях мембраны заменяют до того, как требуется замена. Существует потребность в способах точного определения оптимального времени для замены мембран.

### **Краткое описание графических материалов**

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 в соответствии с некоторыми вариантами осуществления изобретения.

На фиг. 2 показана блок-схема способа оценки остаточного эксплуатационного ресурса мембраны в соответствии с некоторыми вариантами осуществления изобретения.

На фиг. 3 показана диаграмма характеристики производительности системы мембранного разделения согласно одному варианту осуществления изобретения.

### **Подробное описание**

В следующем раскрытии изложено множество различных вариантов осуществления или примеров для реализации различных признаков предложенного предмета изобретения. Конкретные примеры компонентов, значений, операций и т.д. описаны ниже для упрощения настоящего раскрытия, но эти примеры не носят ограничительного характера. Предполагаются другие значения, операции, компоновки и т.д. 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.

Мембранные технологии доказали свою эффективность в разделении газообразных материалов. Мембраны используют для разделения жидких и газообразных материалов, которые трудно или невозможно разделить иным образом. Мембранные технологии используют в нефтяной промышленности, медицинской промышленности, для фильтрации воды и т.д. В ходе эксплуатации мембраны происходят их старение и изменение производительности. Изменения производительности мембраны связаны с такими факторами, как физическое старение, механическое старение и пластификация мембран. В некоторых случаях изменения ухудшают производительность мембраны. В ходе эксплуатации мембранного разделителя при отсутствии события с критическими разрушительными последствиями решение о замене мембраны обычно принимают на основе сравнения ключевых показателей производительности (KPI; key performance indicator) и соответствующих заданных критериев замены мембраны. Когда производительность мембраны либо превышает, либо опускается ниже заданного значения, мембрану заменяют. Однако скорость изменения характеристик мембраны неодинакова для мембран, которые выполняют один и тот же тип разделения. Индивидуальные различия между мембранами приводят к тому, что значения эксплуатационного ресурса находятся в диапазоне от нескольких месяцев до многих лет, прежде чем на основе заранее заданных критериев замены мембраны будет указано о необходимости такой замены.

В настоящем раскрытии предлагается способ оценки остаточного эксплуатационного ресурса (RUL; remaining useful lifetime) газоразделительного мембранного агрегата для выполнения замены мембраны на основе прогностического или предиктивного подхода, а не оперативным образом, с использованием критериев производительности, превышающих заданный критерий замены. Раскрытый в настоящем документе способ применим к оценке показателей эксплуатационного ресурса многих различных типов мембран, что совсем не ограничивается лишь мембранами, которые используют при разделении газов. Особенностью системы мембранного разделения, в которой возможно использование описанного в настоящем документе способа, является то, что данные в отношении производительности мембраны, полученные в режиме реального времени, могут быть зарегистрированы во время эксплуатации мембраны как для потока сырья, потока пермеата, так и для потока непермеата, при этом потоки являются связанными с системой мембранного разделения. Определение остаточного эксплуатационного ресурса выпол-

няется с использованием физической модели, обученной данными, которые получены в ходе неразрушающего контроля мембраны по месту эксплуатации.

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, выполненных с возможностью определения 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 мембрану в мембранном агрегате 104, 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 за счет 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 осуществления 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 некоторых вариантах осуществления поток сырья или поток поступающего материала включает в себя жидкие компоненты, растворы, азеотропные смеси или другие текучие среды, пригодные для разделения с использованием систем мембранного разделения для извлечения одной фракции потока сырья в поток пермеата, с получением оставшейся части, или потока непермеата, которая имеет пониженную концентрацию компонента, выделенного в поток пермеата. В некоторых вариантах осуществления изобретения потоки сырья текучей среды, которые используют в системах мембранного разделения, включают в себя биологические текучие среды, такие как кровь и/или моча.

Индивидуальное моделирование мембраны включает в себя измерение переменных расхода  $Q$ , температуры  $T$ , давления  $P$  и составов  $C_i$  (номер индекса  $i$  обозначает различные компоненты в потоке, входящем 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 определяют перед мембранным разделением газа и они обычно включают в себя 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 и историю конкретного мембранного агрегата. 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.

Кроме того, мембранные агрегаты характеризуются характеристическими параметрами мембраны,  $\bar{M}$ , включающими значения площади мембраны  $S$  и нормализованные по давлению потоки каждого компонента  $P_i$ , и т.д.

Для моделирования ухудшения производительности конкретной мембраны, при заданных  $\bar{X}$  и  $\bar{M}$  получают  $\bar{Y}$  посредством модели мембранного разделения  $F$ , приведенной ниже в уравнении 1:

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

Функция  $F$  может представлять собой физическую модель мембранной системы, статистическую модель, эвристическую модель или любой тип модели, который предоставляет полезные результаты. 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 за счет 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 RUL. Последовательность действий для оценки RUL мембранного агрегата обобщена с помощью способа 200, представленного на фиг. 2. В ходе операции 202 система управления мембранным разделением или пользователь в режиме реального времени получает данные о сырье и управляющих переменных,  $\bar{X}_a$  также выходных переменных  $\bar{Y}$ , как описано выше. В некоторых вариантах осуществления информация о сырье и управляющей переменной, а также выходной переменной может также включать в себя историю текущего агрегата, события, связанные с техобслуживанием, заменой, изменением рабочих условий и т.д.

В некоторых вариантах осуществления изобретения пользователь в режиме реального времени получает характеристические параметры мембранного разделения,  $M$ , используя соотношение, описанное выше в уравнении 2, на основе показаний датчиков, подключенных к выпускным линиям 106 и 108 системы 100 мембранного разделения, представленной на фиг. 1. В некоторых вариантах осуществления рабочие характеристики мембраны, определенные в выпускных линиях 106 и 108, включают в себя состав газа, температуру газа, расход газа, термодинамическое состояние химического вещества в потоке пермеата или непермеата или соотношения одной или нескольких рабочих характеристик мембраны.

Для распознавания/регистрации различных событий и оценки их влияния на ресурс мембраны, например, снижение температуры может вызвать временное снижение производительности вследствие конденсации, может быть использована отдельная модель обнаружения событий. Эта модель может быть основана на системе правил или на машинном обучении. Модель изменения свойств мембраны обучается на основе исторических данных, соответствующих изменению  $\bar{M}$ , а также может включать в себя историю событий и операций, в том числе данные в отношении техобслуживания и замены. Модель изменения свойств мембраны может быть создана с помощью различных подходов машинного обучения, таких как линейная/нелинейная регрессия, искусственная нейронная сеть (ANN; artificial neural network) и т.д.

Способ 200 включает в себя операцию 204, в которой характеристические параметры мембраны оцениваются с использованием метода, обобщенного с помощью уравнения 2.

Способ 200 включает в себя операцию 206, в которой на основе записанных в режиме реального времени характеристических параметров мембраны, собранных во время операции 202, разрабатывается модель изменения свойств мембраны. В некоторых вариантах осуществления модель изменения свойств мембраны определяют после регистрации характеристических параметров мембраны в начальный временной интервал, и одну или несколько заданных моделей изменения свойств адаптируют к зарегистрированным характеристическим параметрам мембраны для оценки и выбора. В некоторых вариантах осуществления изобретения модель изменения свойств мембраны разрабатывают "с нуля", что обусловлено отсутствием заданных моделей, которые соответствуют данным, собранным в течение начального временного интервала. В некоторых вариантах осуществления выбор модели для мембраны изменяют после операции 218 на основании отклонения контролируемых характеристических параметров мембраны от исходной модели, выбранной в ходе операции 206.

Способ 200 включает в себя операцию 208, при этом набор прогнозных характеристических параметров мембраны  $\bar{M}$  генерируют на основе модели изменения свойств мембраны, разработанной в ходе операции 206. Используя прогнозны  $\bar{M}$  и  $\bar{X}$ , прогнозны выходные переменные мембраны  $\bar{Y}$  можно оценить с помощью уравнения (1), приведенного выше.

Способ 200 включает в себя операцию 210, в которой параметры сырья и параметры системы управления мембраной  $\bar{X}$  оценивают для прогнозных интервалов функционирования мембраны, чтобы компенсировать ожидаемые изменения свойств мембраны в соответствии с моделью, разработанной в ходе операции 206.

Способ 200 включает в себя операцию 212, в которой набор пороговых значений или пороговые значения рабочих характеристик мембраны, определяют на основе рабочих характеристик мембраны, полученных в режиме реального времени в ходе операции 202, а также модели изменения свойств мембраны в ходе операции 206 (или прогнозных характеристических параметров мембраны в ходе операции 208).

Способ 200 включает в себя операцию 214, в которой пороговые значения, или пороговые значения эксплуатационно-технических характеристик мембраны используются для определения ожидаемого времени замены мембраны в соответствии с разницей во времени между интервалом измерения сбора

характеристик мембраны, полученных в режиме реального времени, выполненного в ходе операции 202, и расчетным временем, в течение которого эксплуатационно-технические характеристики мембраны будут соответствовать пороговым значениям, основанным на модели изменения свойств мембраны. С прогнозными  $\bar{Y}$  и  $\bar{X}$  прогнозные ключевые показатели эксплуатационно-технических характеристик оцениваются и сравниваются с критериями замены мембраны (например, пороговыми значениями, полученными в ходе операции 212) для определения времени, когда достигается окончание срока эксплуатации (EOL; end of life) мембраны. Таким образом, RUL получают путем вычитания текущего временного интервала для измерения характеристик, полученных в режиме реального времени, из предполагаемого окончания срока эксплуатации (EOL) мембраны.

Способ 200 включает в себя операцию 216, в которой во втором временном интервале после первого временного интервала, в котором были зарегистрированы полученные в режиме реального времени характеристические параметры мембраны (например, интервала времени, соответствующего операции 202), регистрируют полученные в режиме реального времени дополнительные характеристические параметры мембраны и сравнивают с пороговыми значениями, определенными в ходе операции 212. В том случае, когда зарегистрированные характеристические параметры мембраны, полученные в режиме реального времени в ходе операции 206, попадают в ожидаемый диапазон характеристических параметров мембраны, соответствующих нормальному функционированию мембраны или системы мембранного разделения, способ переходит к операции 218. В том случае, когда зарегистрированные характеристические параметры мембраны, полученные в режиме реального времени в ходе операции 206, превышают пороговое значение или выходят за пределы ожидаемого диапазона характерных параметров мембраны, соответствующих нормальному функционированию мембраны, системы мембранного разделения, способ продолжает работу до операции 220.

В ходе операции 220 систему мембранного разделения отключают, линию подачи сырья, а также потоки пермеата и непермеата перекрывают и заменяют мембрану. В ходе операции 218 определяют временной интервал между регистрацией текущих характеристических параметров мембраны и ожидаемым временем замены мембраны в предыдущем временном интервале. В том случае, когда временной интервал текущих характеристических параметров мембраны превышает ожидаемое ранее время замены мембраны, характеристические параметры мембраны регистрируют и уведомляют пользователя о том, что может потребоваться замена мембраны. После получения входных данных от пользователя выполняется операция 220, в ходе которой происходит замена мембраны. В случае отсутствия входных данных от пользователя выполняется операция 206, при этом модели изменения свойств мембраны обновляют на основе текущих характеристических параметров мембраны для определения последующего остаточного эксплуатационного ресурса, как описано выше. Таким образом, отклонения характеристических параметров мембраны используют для обновления модели изменения свойств мембраны или коэффициентов, связанных с уравнением (2), для повышения точности определения окончания срока эксплуатации, или остаточного эксплуатационного ресурса, в соответствии со способом 200.

На фиг. 3 показана диаграмма 300, представляющая значение рабочей характеристики на первой оси 302, время измерения на 2<sup>й</sup> оси 304 и компонент модели 306 изменения свойств мембраны, соответствующий значениям рабочей характеристики в зависимости от времени. Выполняют первое измерение рабочей характеристики и первое показание 308 регистрируют и сравнивают с моделью 306 ухудшение свойств. В момент времени 318 по оси 304 регистрируют показание 308 и оно имеет значение 308V. В момент времени 310T регистрируют показание 310 и оно имеет значение 310V. На фиг. 3 показание 310 относится к модели 306 и находится в пределах пороговых значений 312 для показаний, соответствующих ожидаемому нормальному функционированию мембраны согласно модели 306. На фиг. 3 модель 306 изменения свойств используют для оценки остаточного эксплуатационного ресурса 314, соответствующего измерению окончания срока эксплуатации во время 316T и/или значению 316V рабочей характеристики, отслеживаемой по оси 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 определения остаточного эксплуатационного ресурса мембраны процесса разделения, включающий  
подачу газовой смеси в мембранный разделитель, содержащий мембрану;

разделение газовой смеси на первый газ и второй газ с использованием мембранного разделителя;  
измерение рабочей характеристики одного или более из следующего: газовая смесь, первый газ и второй газ;

измерение состава газовой смеси, первого газа и второго газа;

определение термодинамического состояния газовой смеси;

определение текущего состояния мембраны на основе рабочих характеристик и составов, а также термодинамического состояния с использованием физической модели;

вычисление прогнозного состояния мембраны с использованием модели изменения свойств мембраны и

регулировка одного из следующего: рабочие характеристики или термодинамическое состояние газовой смеси на основе вычисленного прогнозного состояния.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что рабочая характеристика представляет собой расход одного или более из следующего: газовая смесь, первый газ и второй газ.

3. Способ по п.1, дополнительно включающий в себя регистрацию в течение начального временного интервала измеренной рабочей характеристики одного или более из следующего: газовая смесь, первый газ и второй газ, и выбор в качестве модели изменения свойств мембраны первой модели изменения свойств мембраны, основанной на измеренной рабочей характеристике на начальном временном интервале.

4. Способ по п.1, дополнительно включающий в себя в себя измерение рабочей характеристики одного или более из следующего: газовая смесь, первый газ и второй газ в течение второго временного интервала, и определение того, превышает ли текущее состояние мембраны пороговое значение рабочей характеристики мембраны.

5. Способ по п.3, дополнительно включающий в себя регистрацию в течение второго временного интервала, измеренной рабочей характеристики одного или более из следующего: газовая смесь, первый газ и второй газ; и выбор в качестве модели изменения свойств мембраны второй модели изменения свойств мембраны, основанной на измеренной рабочей характеристике на втором временном интервале.

6. Способ по п.5, отличающийся тем, что по меньшей мере одна из первой и второй моделей изменения свойств мембраны представляет собой модель машинного обучения.

7. Способ по п.1, дополнительно включающий в себя сравнение вычисленного прогнозного состояния мембраны со стандартом и регулировку одного из следующего: рабочие характеристики или термодинамическое состояние газовой смеси на основе сравнения.

8. Способ по п.7, отличающийся тем, что модель изменения свойств мембраны обучается с использованием исторических данных от множества мембран.

9. Способ определения остаточного эксплуатационного ресурса мембраны процесса разделения, включающий

подачу газовой смеси в мембранный разделитель, содержащий мембрану;

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

измерение рабочей характеристики одного или более из следующего: газовая смесь, первый газ и второй газ;

измерение состава газовой смеси, первого газа и второго газа;

определение термодинамического состояния газовой смеси;

определение текущего состояния мембраны на основе рабочих характеристик и составов, а также термодинамического состояния с использованием физической модели;

вычисление прогнозного состояния мембраны с использованием модели изменения свойств мембраны, выбранной на основе измеренной рабочей характеристики;

сравнение вычисленного прогнозного состояния мембраны со стандартом и

регулировку одного из следующего: рабочие характеристики или термодинамическое состояние газовой смеси на основе сравнения.

10. Способ по п.9, отличающийся тем, что первую модель изменения свойств мембраны выбирают в течение первого периода времени, а вторую модель изменения свойств мембраны, отличную от первой модели изменения свойств, выбирают в течение второго периода времени.

11. Способ по п.9, отличающийся тем, что выбранная модель изменения свойств мембраны представляет собой модель машинного обучения.

12. Способ по п.9, отличающийся тем, что модель изменения свойств мембраны обучается с использованием исторических данных от множества мембран.

13. Способ по п.9, дополнительно включающий в себя сравнение текущего состояния мембраны со стандартом и регулировку одного из следующего: рабочие характеристики или термодинамическое состояние газовой смеси на основе сравнения текущего состояния мембраны со стандартом.

14. Способ по п.13, отличающийся тем, что первую модель изменения свойств мембраны выбирают в течение первого периода времени, а вторую модель изменения свойств мембраны, отличную от первой модели изменения свойств, выбирают в течение второго периода времени.

15. Способ определения остаточного эксплуатационного ресурса мембраны процесса разделения,

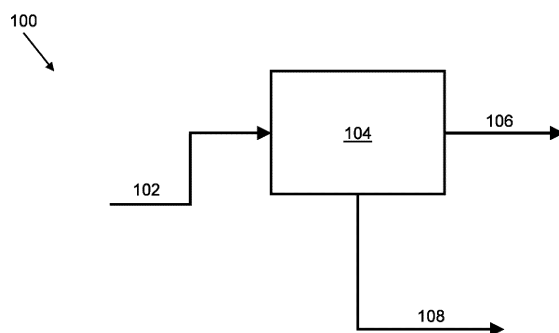
включающий

подачу газовой смеси в мембранный разделитель, содержащий мембрану;  
 разделение газовой смеси на первый газ и второй газ с использованием мембранного разделителя;  
 измерение расхода, температуры, давления и состава одного или более из следующего: газовая смесь, первый газ и второй газ;  
 определение термодинамического состояния газовой смеси;  
 определение текущих рабочих характеристик мембраны на основе расходов, температур, давлений, составов и термодинамического состояния с использованием физической модели;  
 вычисление прогнозной рабочей характеристики мембраны с использованием модели изменения свойств мембраны, выбранной на основе измеренной рабочей характеристики;  
 сравнение вычисленного прогнозного состояния мембраны со стандартом и  
 регулировку одного из следующего: расходов, температур, давлений, составов или термодинамического состояния газовой смеси на основе сравнения.

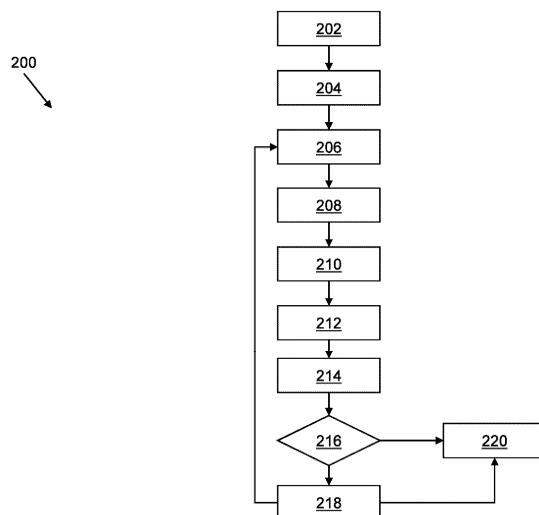
16. Способ по п.15, отличающийся тем, что первую модель изменения свойств мембраны выбирают в течение первого периода времени, а вторую модель изменения свойств мембраны, отличную от первой модели изменения свойств, выбирают в течение второго периода времени.

17. Способ по п.16, отличающийся тем, что выбранная модель изменения свойств мембраны представляет собой модель машинного обучения.

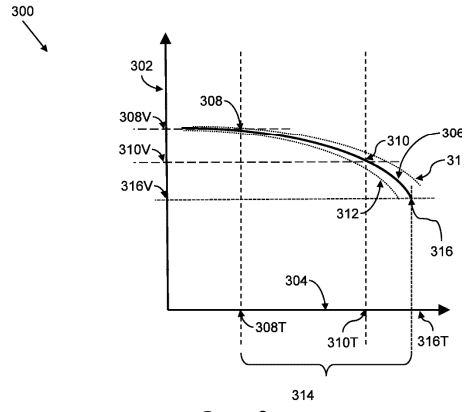
18. Способ по п.17, отличающийся тем, что модель изменения свойств мембраны обучается с использованием исторических данных от множества мембран.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3