

Разработка нечетко-логического контроллера для системы управления процессом мембранного разделения газов

А.И. Колдаев, А.А. Евдокимов, Д.В. Болдырев, Ю.Н. Кочеров

Северо-Кавказский федеральный университет, г. Невинномысск

Аннотация: Производство азота из воздуха с помощью процессов мембранного разделения газов широко используется во многих отраслях промышленности. Проблема управления процессом газоразделения связана с многоконтурным регулированием с использованием управления несколькими переменными. Для построения модели газоразделителя в работе проведен подробный анализ процесса газоразделения. В данной статье предлагается контроллер, построенный с применением нечеткой логики, используемый для согласования колебаний давления и расхода воздуха газоразделителя. Эффективность предлагаемого контроллера оценивалась в сравнении с традиционными регулятором. Предложенный нечетко-логический регулятор позволяет повысить точность системы управления газоразделением, сократить длительность переходных процессов.

Ключевые слова: нечеткая логика, контроллер, разделение газов, мембранная технология, азот, система управления.

Введение

Разделение воздуха для производства обогащенного азота и кислорода имеет большое значение для химической промышленности. Для практического применения, будь то в лабораториях или на крупных промышленных предприятиях, азот получают тремя основными способами. Все эти способы основаны на разложении атмосферного воздуха: криогенном разложении воздуха, с использованием короткоциклового безтепловой адсорбции и методом мембранной диффузии [1].

Процесс разделения газов на основе мембранной технологии имеет предпочтительное применение по сравнению с другими методами, поскольку он экономичен, компактен, имеет модульную конфигурацию и позволяет обеспечить низкое удельное энергопотребление [2].

Существующие газоразделительные установки представляют собой многоступенчатую многосвязную конструкцию с нелинейными связями между составляющими ее элементами [1, 2]. При проектировании многоконтурного управления с использованием многопараметрического

управления важно правильно определить управляемые переменные и их комбинации. Большинство систем управления газоразделительными установками основаны на традиционной системе пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) управления. Наличие всего трех настроечных параметров в ПИД-регуляторе, настройка которых осуществляется только на этапе проектирования системы, в ряде случаев оказывается недостаточным для получения заданного качества управления, особенно для систем с нестабильными свойствами, большой задержкой и систем, требующих высокого качества отслеживания при одновременной настройке и высокое качество подавления внешних возмущений в условиях, когда имеется неполнота информации об этих возмущениях и свойствах объекта [3].

Эффективным способом преодоления ограничений в управлении сложными объектами является применение нечетких регуляторов, позволяющих формировать воздействия на объект путем изменения переменных состояния объекта управления, например, ошибки и скорости ошибки. Подход к построению систем управления на основе нечеткой логики применим ко многим существующим системам, поскольку во многих случаях улучшение существующих алгоритмов может быть осуществлено с минимальными затратами с использованием существующих аппаратных и программных средств [3–5].

В данной работе для установки разделения газов предлагается использовать нечеткий регулятор вместо ПИД-регулятора. Использование нечеткого регулятора на установке газоразделения позволит повысить точность и скорость процесса газоразделения.

Мембранная технология разделения газов

Мембранные процессы являются одной из основных технологий газоразделения, целью которой является разделение газовых смесей с помощью полупроницаемых мембран [6].

В химической промышленности мембранные методы применяются для отделения гелия и водорода из природных газов, азота, кислорода из воздуха и т. д. [2, 7].

Также мембранные технологии приобретают все большее значение для медицинских целей, особенно в процессе повышения уровня концентрации кислорода (O_2). Обогащение уровня O_2 из потоков азота (N_2) с помощью мембранных процессов более экономично, чем традиционная криогенная перегонка воздуха, главным образом, из-за низкого энергопотребления, что в последующем приводит к минимизации эксплуатационных затрат [7].

Очистка водорода, переработка природного газа, извлечение летучих органических соединений и осушка газа все шире применяются в различных отраслях промышленности благодаря мембранным установкам, однако мембранное разделение газов остается основным рынком сбыта получения азота из воздуха [8].

Мембранный процесс является непрерывным (без стадии регенерации), не включает химикаты, не образует отходов, предлагает возможность интенсификации, является модульным (легко масштабируется) и не включает в себя сложные операции.

Мембранные установки состоят из мембранных модулей разделения воздуха, которые представляют собой резервуары цилиндрической формы. Внутри этих резервуаров параллельно находится множество волокон, состоящих из специальных полимерных материалов [9].

Сжатый воздух подается на вход мембранного модуля, откуда равномерно распределяется между всеми отдельными волокнами, попадая на

их внутреннюю сторону (рис. 1). Стенки волокон представляют собой мембраны с асимметричным расположением пор, через которые молекулы воды, водорода и гелия быстро и легко диффундируют наружу из волокон. Молекулы кислорода, а также углекислого газа CO_2 проникают сквозь стенки со средней скоростью. Преимущественно молекулы азота, а также аргона, содержащиеся в воздухе, остаются на внутренней стороне мембран [10].

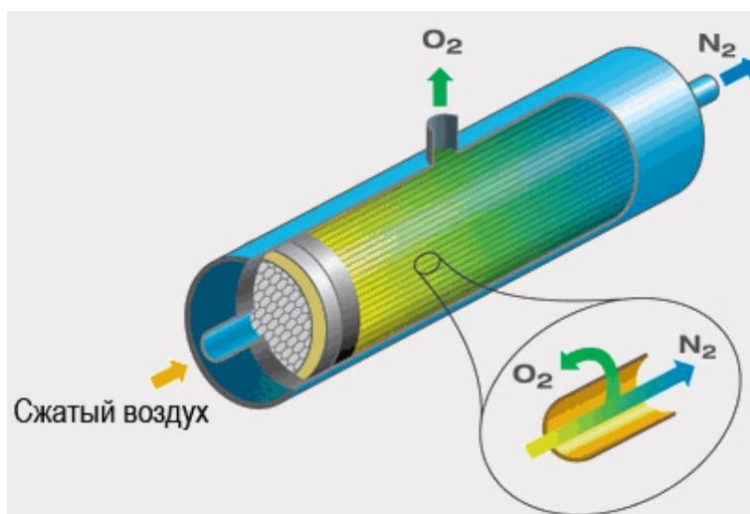


Рис. 1 – Мембранный модуль

В зависимости от требований к чистоте азота (обычно от 90 до 99,9%), применяют одноступенчатую или многоступенчатую схему мембранного процесса [2].

Общие структуры синтеза процессов соответствуют схемам, представленным на рис. 2. Количество ступеней для различных степеней чистоты соответствует количеству и расположению контуров рециркуляции при многостадийных процессах [2].

Как правило, соотношение «чистота/производительность» можно максимально просто отрегулировать с помощью единого регулятора расхода, установленного на выходе из мембран. При этом колебания давления или расхода более вероятны и вполне могут привести к падению чистоты газа. В

этом случае возникает необходимость повышения точности регулирования давления и расхода газа [2, 8].



Рис. 2. – Схемы мембранного газоразделения с различной чистотой азота

Модель газоразделителя

Газодинамика в модели газоразделителя основана на уравнении материального баланса и уравнении идеального газа. Уравнение материального баланса определяет количество молей общего газа, компонента А (азота) и компонента В (кислорода) в газоразделителе. Уравнение идеального газа определяет общее давление и парциальные давления компонентов А и В в газоразделителе.

Схема газоразделителя представлена на рис. 3 [2].

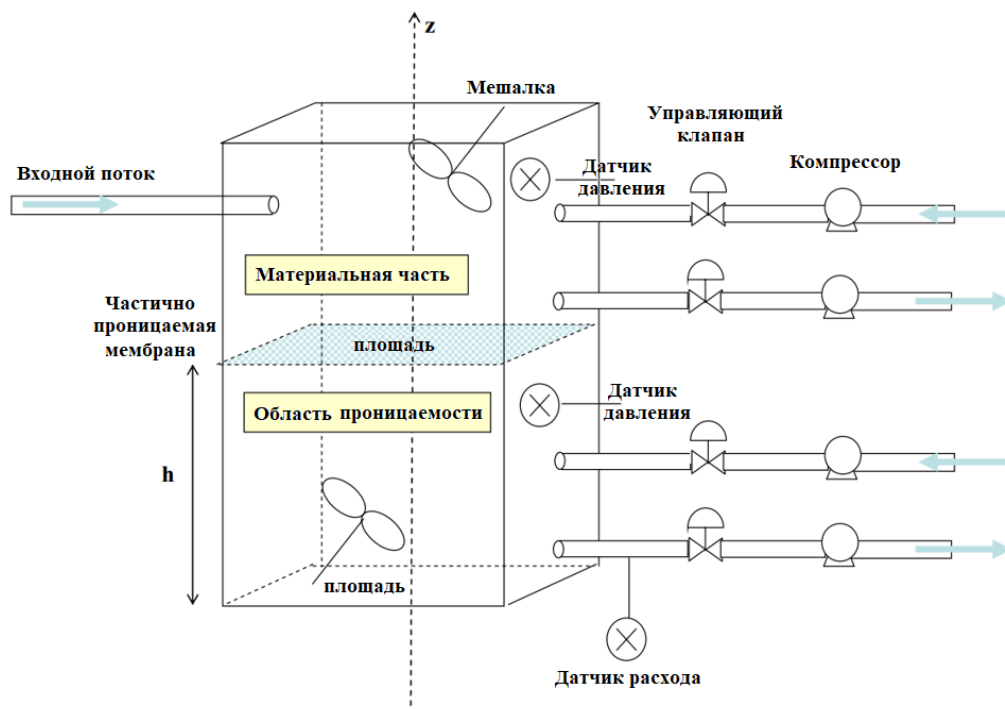


Рис. 3. – Схема газоразделителя

Уравнение материального баланса, давления и мольной доли описывается следующим образом.

Изменение количества молей всех газов в материальной части в единицу времени можно выразить следующим уравнением:

$$\frac{dN_{tW}}{dt} = F - W - N_A \cdot S - N_B \cdot S,$$

где N – количество молей в газе; индекс tW обозначает все газовые составляющие в материальной части; F – количество материала, поступающего в материальную часть в единицу времени; W – количество газа, выделяющегося из части материала в единицу времени; S – площадь мембраны.

Изменение количества молей газового компонента A в материальной части в единицу времени можно выразить, как:

$$\frac{dN_{tW}}{dt} = F \cdot X_{AF} - W \cdot X_{AW} - N_A \cdot S,$$

где X_{AF} — мольная доля компонента A в F ; индекс AW обозначает газовую составляющую A в материальной части.

Учитывая интеграл от времени от 0 до t , можно выразить количество молей в материальной части в момент времени t следующим уравнением:

$$N_{tW}|_{t=t} = \int_0^t (F - W - N_A \cdot S - N_B \cdot S) dt + N_{tW}|_{t=0}.$$

Учитывая интеграл от времени от 0 до t , можно выразить количество молей газового компонента A в материальной части в момент времени t :

$$N_{AW}|_{t=t} = \int_0^t (F \cdot X_{AF} - W \cdot X_{AW} - N_A \cdot S) dt + N_{AW}|_{t=0}.$$

Давление всех газов в материале определяется уравнением:

$$P_{tW} = N_{tW} \cdot R \cdot T / V,$$

где P — давление; R — газовая постоянная; V — объем в материальной части (проницаемой части).

Мольная доля в материальной части определяется уравнением:

$$X_{AW} = \frac{N_{AW}}{N_W}.$$

Изменение количества молей всех газов в проницаемой части в определяется как

$$\frac{dN_{tQ}}{dt} = N_A \cdot S + N_B \cdot S - Q.$$

где Q — количество выделяемого газа в область проницаемости в единицу времени; индекс tQ обозначает все газовые компоненты в области проницаемости.

Учитывая интеграл от времени от 0 до t , можно выразить количество молей в проницаемой части в момент времени t следующим уравнением:

$$N_{tQ}|_{t=t} = \int_0^t (N_A \cdot S + N_B \cdot S - Q) dt + N_{tQ}|_{t=0}.$$

Уравнение материального баланса газовой компоненты A в области проницаемости определяется, как:

$$\frac{dN_{AQ}}{dt} = N_A \cdot S - Q \cdot Y_{AQ},$$

откуда:

$$N_{AQ}|_{t=t} = \int_0^t (N_A \cdot S - Q \cdot Y_{AQ}) dt + N_{AQ}|_{t=0},$$

где Y_{AQ} – мольная доля компонента A в Q .

Таким образом, давление всех газов в материальной части будет определяться, как:

$$P_{iQ} = N_{iQ} \cdot R \cdot T / V,$$

а мольная доля в области проницаемости:

$$X_{AQ} = \frac{N_{AQ}}{N_W}. \quad (12)$$

Система управления на основе нечеткой логики

Структура нечетко-логической части контроллера представлена на рис. 4. Он состоит из блоков фаззификации, нечетких правил (базы правил), нечеткого вывода и дефаззификации [5].

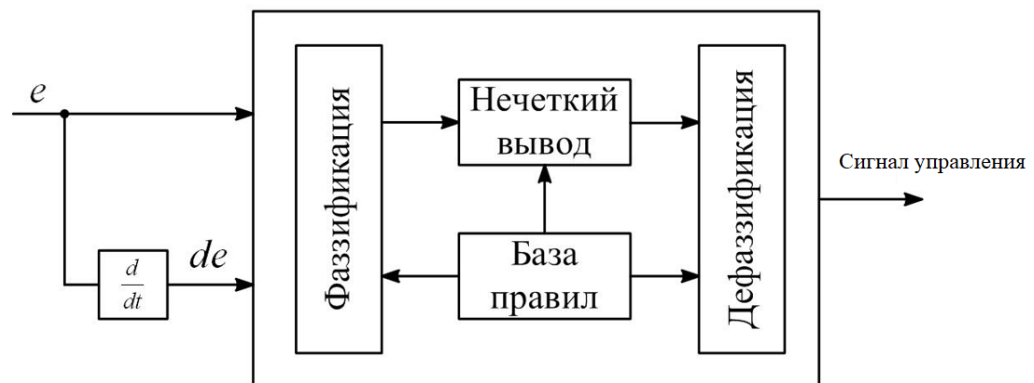


Рис. 4. – Структура нечеткого контроллера

Нечетко-логическая модель использует нечеткие правила, которые представляют собой лингвистические утверждения, включая нечеткие множества, нечеткую логику и нечеткий вывод. Нечеткое правило играет ключевую роль в представлении экспертного контроля и опыта

сопоставления входных переменных нечетких регуляторов с выходными переменными.

На рис. 5 (слева) представлена переходная характеристика объекта $u(t)$, разделенная на области А – I. Формирование лингвистических правил можно продемонстрировать с помощью фазовой плоскости (рис. 5, справа), горизонтальная ось которой представляет значения производной ошибки управления de/dt , а вертикальная ось — значения ошибки управления e .

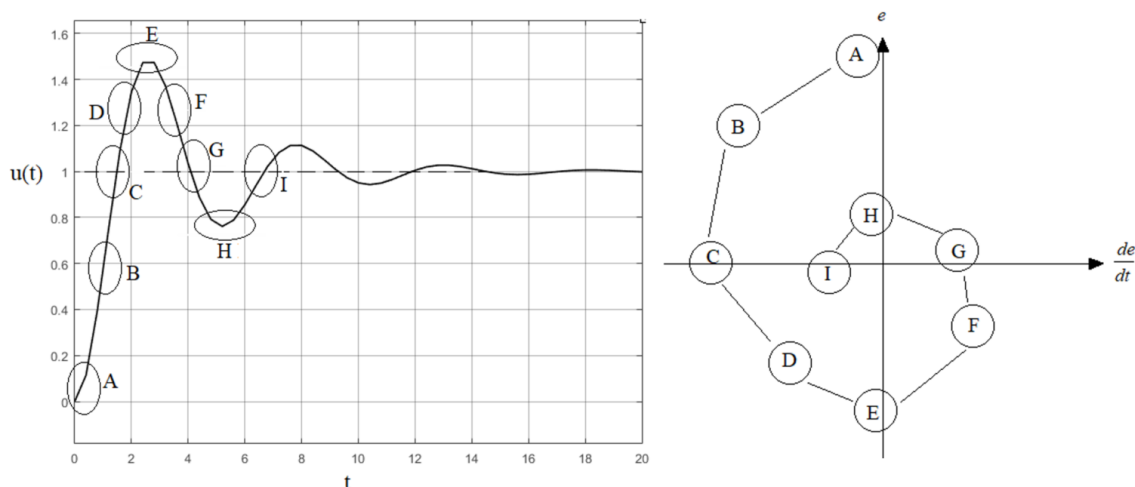


Рис. 5. – Переходная характеристика объекта управления (слева) и фазовая плоскость (справа)

Движение начинается с области А. Область А характеризуется большим значением ошибки и практически нулевым значением производной по ошибке. Поэтому в лингвистических правилах это будет выражаться, как «положительный большой» (ПБ) и «нуль» (Н) соответственно. При переходе из области А в область Б значение ошибки изменятся с «положительный большой» (ПБ) на «положительный малый» (ПМ), а значение производной по ошибке с «нуль» (Н) на «отрицательный малый» (ОМ).

Рассмотрим период, в течение которого выходные значения увеличиваются от областей С к D, где значение ошибки изменяется с «Нуля» (Н) на «отрицательный малый» (ОМ), а производная по ошибке с

«отрицательный большой» (ОБ) на «отрицательный малый» (ОМ) соответственно. Учитывая переходы во всех областях, можно сформировать матрицу нечетких высказываний, представленную в таблице № 1.

Используя пять функций принадлежности, нечеткие входные и выходные переменные нормализуются между +1 и -1. Чтобы получить нечеткое заключение с точным значением, используется метод центраида. Для нечеткого вывода с использованием пяти функций принадлежности требуется 25 правил.

Увеличение числа функций принадлежности до семи приводит к увеличению количества правил до 49. Однако это увеличивает затраты вычислительных ресурсов, но не приводит к существенному повышению эффективности управления.

Таблица № 1

Матрица нечетких высказываний

e de	ОБ	ОМ	Н	ПМ	ПБ
ОБ	ОБ	ОБ	ОБ	ОМ	Н
ОМ	ОБ	ОБ	ОМ	Н	ПМ
Н	ОБ	ОБ	Н	ПМ	ПБ
ПМ	ОМ	Н	ПМ	ПБ	ПБ
ПБ	Н	ПМ	ПБ	ПБ	ПБ

В таблице 1 приняты следующие обозначения: ОБ – отрицательный большой; ОМ – отрицательный малый; Н равен нулю; ПМ - положительный малый; ПБ – положительный большой.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследование системы управления процессом газоразделения было осуществлено на основе модели газового разделителя с использованием программных средств Matlab/Simulink. Модель газоразделителя представляет собой трехступенчатую структуру, как показано на рис. 2.

Эффективность предлагаемого нечетко-логического контроллера оценивалась в сравнении с традиционными ПИД-регулятором. Результаты моделирования представлены на рис. 6 и 7.

На рис. 6 показано, что с отработкой заданного значения лучше всего справляется нечетко-логический контролер на 3-й ступени газоразделения, за которым следуют 2-я и 1-я ступени газоразделения соответственно, что подтверждает поведение модели.

Из рис. 7 (справа) видно, что процесс разделения газов с нечетким управлением требует меньше времени, чем с использованием ПИД-регулирования. Это обеспечивает меньшие энергозатраты в процессе разделения газов. Из рис. 7 (слева) видно, что точность управления при нечетком управлении выше, чем при ПИД-регулировании.

Таким образом, предлагаемая система управления газоразделителем с нечетко-логическим контроллером позволяет получить заданный уровень концентрации азота с меньшими затратами, чем при использовании ПИД-регулирования.

Заключение

На сегодняшний день перспективным методом является получение обогащенного азотом воздуха с помощью мембранного разделения газов. В данной работе решается задача построения системы управления процессом получения азота из воздуха в газоразделителе с использованием нечетко-логического контроллера.

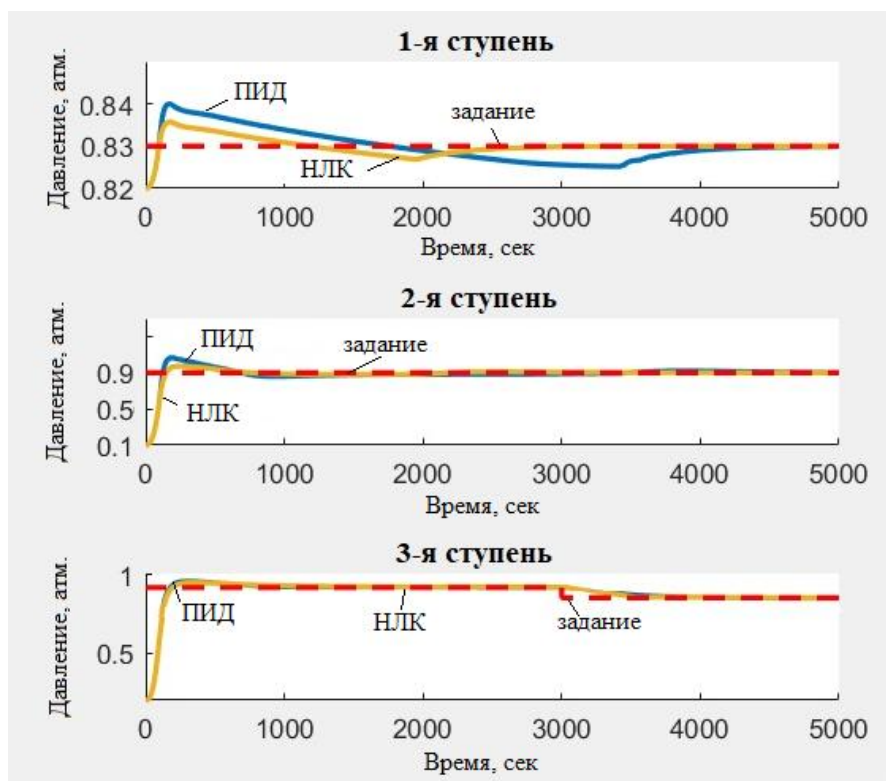


Рис.6. – Результаты сравнения систем управления процессом газоразделения с нечетко-логическим контроллером (НЛК) и ПИД-регулятором

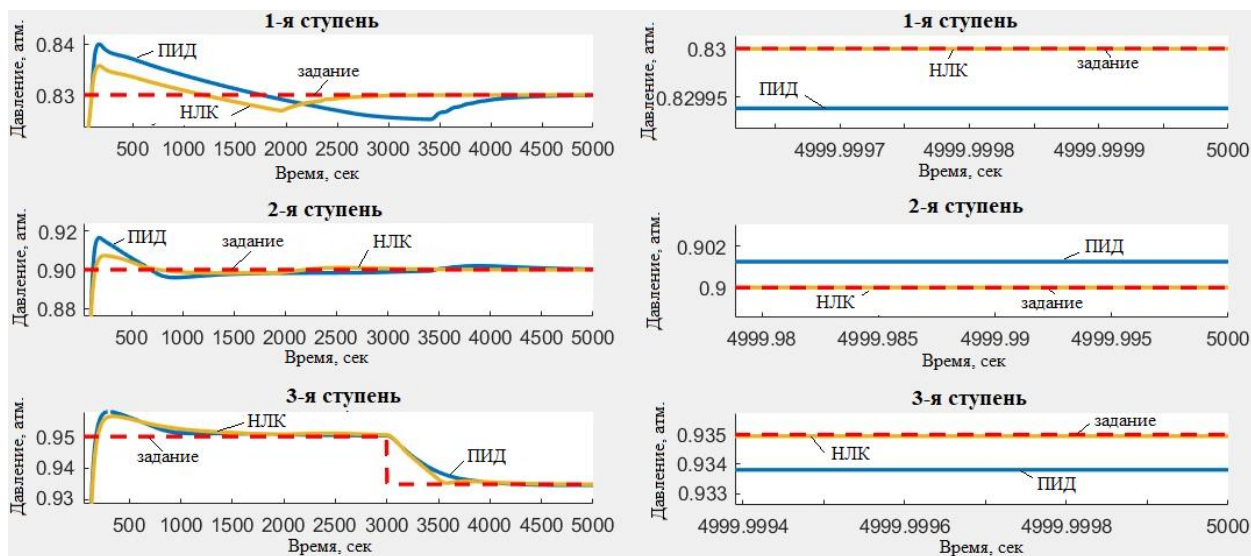


Рис. 7. – Результаты сравнения систем управления процессом газоразделения: слева – увеличение по оси давления, справа – увеличение по оси времени

Имитационная модель была построена на основе модели газоразделителя с использованием программных средств Matlab/Simulink. В системе управления объектом проведено сравнение эффективности работы ПИД-регулятора и предлагаемого нечетко-логического контроллера. Модель нечетко-логического управления в этом примере в целом имеет лучшие характеристики управления по сравнению с ПИД-регулированием и позволяет получить заданный уровень чистоты азота при меньшем удельном расходе энергии.

Литература

1. Murali R.S., Sankarshana T. and Sridhar S. Air Separation by Polymer-based Membrane Technology // Separation & Purification Reviews, 2013. Vol. 42, pp. 130–186. DOI: 10.1080/15422119.2012.686000.
2. Bozorg M., Addis B., Piccialli V., Ramírez-Santos Á.A., Castel C., Pinnau I. and Favre E. Polymeric membrane materials for nitrogen production from air: A process synthesis study // Chemical Engineering Science, 2019. Vol. 207, pp. 1196–1213. DOI: 10.1016/j.ces.2019.07.029.
3. Любишев А.А., Сафаров И.М., Филиппов Е.Л. Конструкция ПИД-регулятора на основе прямого синтеза для нестабильных процессов // Инженерный вестник Дона, 2021, № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7071.
4. Медведева Л.И., Семенова И.А. Анализ структуры и состава системы управления технологическими параметрами в процессе рекуперации бензина // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2032.
5. Lubentsova E.V., Lubentsov V.F., Koldayev A.I, Evdokimov A.A. and Samoylenko D.V. Fuzzy Temperature Controller of the Exothermic Fermentation Processes // International Journal of Applied Engineering Research, 2015. Vol. 10, pp. 42753–42757.



6. Lin H., Zhou M., Ly J., Vu J., Wijmans J.G., Merkel T.C., Jin J., Haldeman A., Wagener E.H. and Rue D. Membrane-Based Oxygen-Enriched Combustion // *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013. Vol. 52, pp. 10820–10834. DOI: 10.1021/ie401464z.

7. Sanders D.F., Smith Z.P., Guo R., Robeson L.M., McGrath J.E., Paul D.R. and Freeman B.D. Energy-efficient polymeric gas separation membranes for a sustainable future: A review // *Polymer*, 2013. Vol. 54, pp. 4729–4761. DOI: 10.1016/j.polymer.2013.05.075

8. Baker R.W. and Low B.T. Gas Separation Membrane Materials: A Perspective // *Macromolecules*, 2014. Vol. 47, pp. 6999–7013. DOI: 10.1021/ma501488s.

9. Schrier J. Carbon Dioxide Separation with a Two-Dimensional Polymer Membrane // *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2012. Vol. 4, pp. 3745–3752. DOI: 10.1021/am300867d.

10. Zhu X., Sun S., He Y., Cong Y. and Yang W. New concept on air separation // *Journal of Membrane Science*, 2008. Vol. 323, pp. 221–224. DOI: 10.1016/j.memsci.2008.06.052.

References

1. Murali R.S., Sankarshana T. and Sridhar S. Separation & Purification Reviews, 2013. Vol. 42, pp. 130–186. DOI: 10.1080/15422119.2012.686000.

2. Bozorg M., Addis B., Piccialli V., Ramírez-Santos Á.A., Castel C., Pinnau I. and Favre E. *Chemical Engineering Science*, 2019. Vol. 207, pp. 1196–1213. DOI: 10.1016/j.ces.2019.07.029.

3. Lyubishev A.A., Safarov I.M., Filippov E.L. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2021, № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2021/7071.

4. Medvedeva L.I., Semenova I.A. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2032.



5. Lubentsova E.V., Lubentsov V.F., Koldayev A.I., Evdokimov A.A., Samoylenko D.V. International Journal of Applied Engineering Research, 2015. Vol. 10, pp. 42753–42757.
6. Lin H., Zhou M., Ly J., Vu J., Wijmans J.G., Merkel T.C., Jin J., Haldeman A., Wagener E.H. and Rue D. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013. Vol. 52, pp. 10820–10834. DOI: 10.1021/ie401464z.
7. Sanders D.F., Smith Z.P., Guo R., Robeson L.M., McGrath J.E., Paul D.R. and Freeman B.D. Polymer, 2013. Vol. 54, pp. 4729–4761. DOI: 10.1016/j.polymer.2013.05.075
8. Baker R.W. and Low B.T. Macromolecules, 2014. Vol. 47, pp. 6999–7013. DOI:10.1021/ma501488s.
9. Schrier J. Carbon ACS Applied Materials & Interfaces, 2012. Vol. 4, pp. 3745–3752. DOI: 10.1021/am300867d.
10. Zhu X., Sun S., He Y., Cong Y. and Yang W. Journal of Membrane Science, 2008. Vol. 323, pp. 221–224. DOI: 10.1016/j.memsci.2008.06.052.