ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МОНОЭТАНОЛАМИНА В НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УЛАВЛИВАНИЯ CO_2 ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ НАСАДОЧНОЙ КОЛОННЕ

Ауесбаев Алишер Уснатдинович
Институт общей и неорганической химии АН Республики Узбекистан, PhD, Докторант
E-mail: alisherauesbaev@gmail.com
Косназаров Куатберген Кудайбергенович
Каракалпакский государственный университет имени Бердаха, PhD, старший преподаватель
E-mail: kosnazarov89@mail.ru
Адизов Бобиржон Замирович
Институт общей и неорганической химии АН Республики Узбекистан, DSc, заведующий лабораторией
E-mail: bobirjon_adizov@mail.ru

Annotatsiya. Ushbu maqolada turli konsentratsiyadagi (30–90% massaviy) monoetanolamin (MEA) suvli eritmalari va aylanuvchi nasadkali kolonna (RPB) yordamida karbonat angidrid (CO_2) ni yutish jarayonining tajriba natijalari keltirilgan. O‘tkazilgan tajribalar MEA konsentratsiyasining ortishi CO_2 ni tutib qolish samaradorligini oshirishini, massa almashinish birligi balandligini (HTU) kamaytirishini va umumiy massa almashinish koeffitsienti (KGa) ni oshirishini ko‘rsatdi. Shu bilan birga, yuqori konsentratsiyalarda eritma qovushqoqligining ortishi va korroziya xavfining kuchayishi kabi cheklovlar kuzatildi. Olingan natijalar optimal MEA konsentratsiyasini tanlash CO_2 ni RPB texnologiyasi yordamida ushlab qolish jarayonining samaradorligi va ishonchliligini belgilovchi asosiy omil ekanini tasdiqlaydi.

Kalit so‘zlar: karbonat angidrid; CO_2 ni ushlab qolish; monoetanolamin (MEA); aylanuvchi nasadkali kolonna (RPB); massa almashinish koeffitsienti; massa almashinish birligi balandligi (HTU); jarayonni intensivlashtirish.

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования абсорбции диоксида углерода (CO_2) с использованием вращающейся насадочной колонны (RPB) и водных растворов моноэтаноламина (MEA) различной концентрации (30–90% по массе). Проведённые эксперименты показали, что повышение концентрации MEA способствует увеличению степени улавливания CO_2, снижению высоты массопереносной единицы (HTU) и росту общего коэффициента массообмена (KGa). При этом выявлены ограничения, связанные с повышением вязкости раствора и ростом коррозионной активности при высоких концентрациях

ISSN 3030-3907

амина. Полученные данные подтверждают, что выбор оптимальной концентрации MEA является ключевым фактором, определяющим эффективность и надёжность процесса улавливания CO_2 с использованием RPB-технологии.

Ключевые слова: диоксид углерода; улавливание CO_2; моноэтаноламин (MEA); вращающаяся насадочная колонна (RPB); коэффициент массообмена; высота массопереносной единицы (HTU); процессная интенсификация

Abstract. This paper presents the results of an experimental study on the absorption of carbon dioxide (CO_2) using a rotating packed bed (RPB) and aqueous solutions of monoethanolamine (MEA) with various concentrations (30–90 wt.%). The experiments demonstrated that increasing the concentration of MEA enhances the CO_2 capture efficiency, reduces the height of a transfer unit (HTU), and increases the overall mass transfer coefficient (KGa). However, limitations were identified, such as higher solution viscosity and increased corrosion tendency at elevated amine concentrations. The findings confirm that selecting an optimal MEA concentration is a key factor determining the efficiency and reliability of CO_2 capture using RPB technology.

Keywords: carbon dioxide; CO_2 capture; monoethanolamine (MEA); rotating packed bed (RPB); mass transfer coefficient; height of a transfer unit (HTU); process intensification.

Введение

В последние годы необходимость повышения эффективности массо- и теплообменного оборудования побудила инженеров и учёных искать новые методы и подходы для достижения этой цели. Среди вызовов — проектирование инновационного оборудования и внедрение новых методов. Экономические соображения также повлияли на это движение, что привело к разработке более надёжных, безопасных и эффективных технологий с использованием компактных компонентов. В результате внедрения таких подходов, как миниатюризация и децентрализация производств, компоненты стали размещаться на площадках непосредственно на объектах, а не на крупных заводах. Процессная интенсификация (PI) впервые была выделена Рэмшоу [1]. Это новаторская концепция, направленная на значительное уменьшение размеров отдельных модулей установки — в 10 раз и более, что ведёт к снижению затрат, повышению эффективности и обеспечению внутренней безопасности. Суть PI заключается в улучшении характеристик тепло- и массообмена, что способствует лучшему контакту между средами. Преимущество быстрой скорости смешивания может обеспечить повышенные скорости тепло- и массообмена. Следовательно, системы, ограниченные в

ISSN 3030-3907

смешивании, времени реакции и тепло- и массообмене, могут значительно выиграть от внедрения PI [2]. Вращающийся насадочный аппарат (rotating packed bed, RPB), который заменяет силу тяжести центробежной силой в сотни раз превышающей земное притяжение, играет важную роль в области процессной интенсификации. В условиях работы вращающегося насадочного аппарата тонкие пленки и мелкие капли, создаваемые интенсивным центробежным ускорением (2000–10000 м/с²), обеспечивают улучшение газо-жидкостного массообмена. Кроме того, RPB может перерабатывать более высокие расходные потоки газа и/или жидкости благодаря низкой склонности к заливанию (flooding) по сравнению с традиционными насадочными колоннами. Таким образом, эффективность газо-жидкостного массообмена может быть увеличена в 10–100 раз, а размер оборудования может быть существенно уменьшен, что снижает капитальные и эксплуатационные затраты. Вращающиеся насадочные аппараты с противотоком находят применение в процессах абсорбции, десорбции, дистилляции, адсорбции и при получении наночастиц [3–16]. В наших предыдущих работах проводились эксперименты и моделирование для летучих органических соединений и углекислого газа. Результаты были представлены в виде зависимости эффективности абсорбции и коэффициента массообмена [17, 18]. В данной работе был проведён комплексный эксперимент, исследующий влияние различных параметров на процесс абсорбции. Целью данного исследования является описание новой технологии и её методологии работы для улавливания CO_2. В связи с этим была разработана конструкция вращающегося насадочного аппарата, и процесс абсорбции диоксида углерода исследовался с использованием растворов моноэтаноламина (MEA) различной массовой концентрации. Результаты представлены в виде зависимости Высоты Массообменной Единицы (HTU) от скорости вращения ротора, расхода газа и расхода жидкости при использовании различных типов насадок.

2. Методы и материалы

Для выполнения исследований в лаборатории «Нефтехмии» Института общей и неорганической химии Академии наук Республики Узбекистан была собрана экспериментальная установка, общая схема которой представлена на рисунке 1. Комплекс включал абсорбер с вращающейся насадочной колонной (RPB), резервуары для свежего и насыщенного растворителя, баллон с углекислым газом, насос для подачи обеднённого раствора, компрессор для нагнетания воздуха, газовый хроматограф марки GC-7860 для анализа состава газовой смеси, а также ротаметры для измерения расходов газа и жидкости.

ISSN 3030-3907

На рисунке 1 приведена принципиальная схема установки, предназначенной для улавливания CO_2 с использованием RPB-абсорбера. В процессе работы в колонну поступает обеднённый раствор моноэтаноламина (lean MEA), который выполняет роль абсорбента. После взаимодействия с диоксидом углерода раствор насыщается и преобразуется в богатый MEA-раствор (rich MEA).

Очищенный от CO_2 газовый поток выводится через центральную трубу ротора и поступает в газоанализатор (поз. 6), где определяется остаточная концентрация CO_2. В то же время обогащённый раствор собирается в нижнем баке для последующей стадии регенерации. Таким образом, данная экспериментальная установка воспроизводит ключевые элементы промышленной технологии абсорбционного улавливания CO_2 на базе вращающейся насадочной колонны.

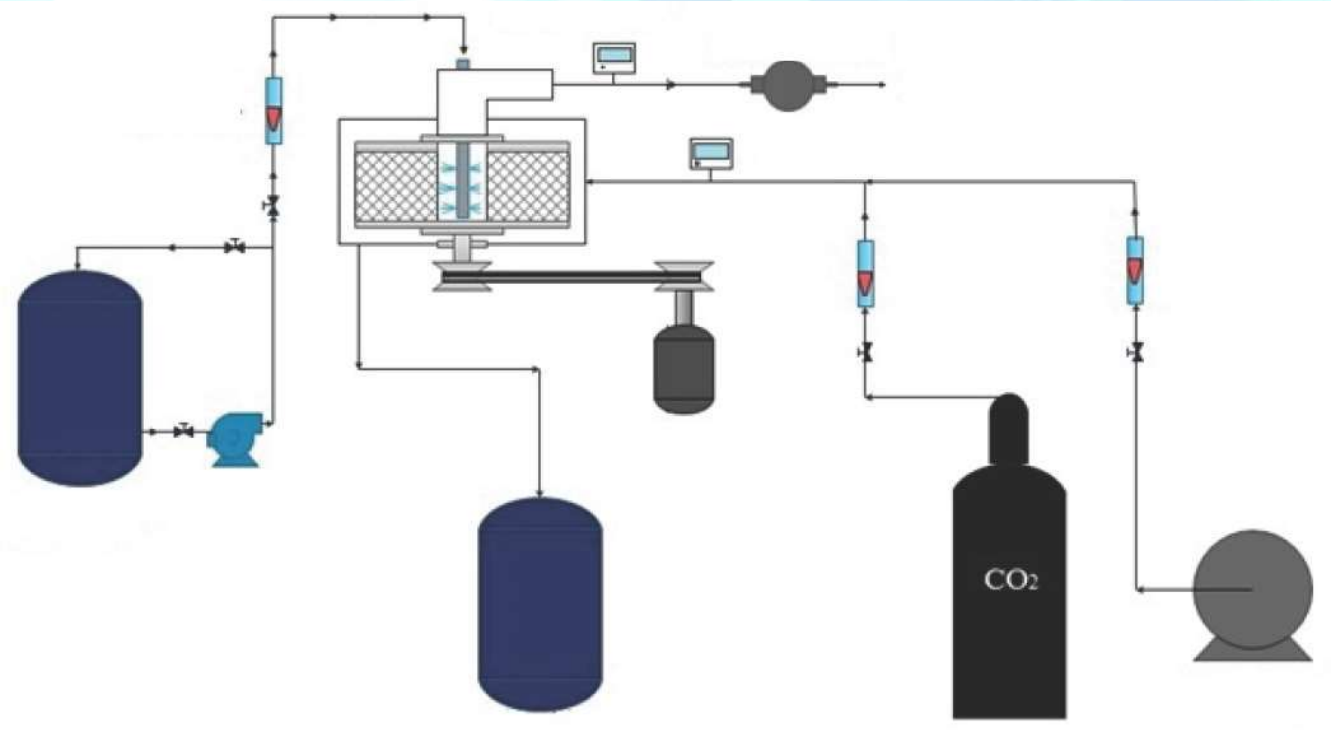


Рис. 1. Экспериментальная установка для улавливания CO2.

Экспериментальная схема установки для абсорбции диоксида углерода во встречном потоке во вращающемся насадочном слое приведена на рисунке 1. Жидкая фаза подавалась через распределитель, расположенный по внутреннему периметру насадки, и равномерно распылялась по её поверхности. В конструкции распределителя, использованного в данной работе, было предусмотрено пять вертикальных секций отверстий, смещённых друг от друга на угол 72°. Каждая секция содержала по пять отверстий диаметром 1 мм. Под действием центробежных сил жидкость

ISSN 3030-3907

продвигалась из центра к периферии слоя, выходила наружу и собиралась в нижней части неподвижного корпуса.

Газовый поток, наоборот, вводился со стороны неподвижного корпуса и двигался навстречу жидкости через слой насадки, после чего выводился из установки через центральную трубу ротора. Таким образом обеспечивался противоточный режим газо-жидкостного взаимодействия.

Геометрические размеры используемой насадки составляли: осевая высота — 3,0 см, внутренний диаметр — 5 см, внешний диаметр — 14 см. В качестве абсорбента применялся водный раствор моноэтаноламина (МЭА), подаваемый в слой с расходом 0,161–0,567 л/мин. Газовый поток, представляющий собой смесь воздуха с содержанием CO_2 15% по объёму, имел расход 13,4 л/мин.

Для достижения стационарного режима после запуска системы требовалось порядка 7–12 минут, что контролировалось по стабильности концентрации CO_2 на выходе. Все эксперименты проводились при комнатной температуре (25 °C) и атмосферном давлении.

2.1. Химические реакции взаимодействия CO_2 с водой и MEA

Основные механизмы реакций между углекислым газом (CO_2) и моноэтаноламином (MEA) были исследованы с применением двух различных подходов: цвиттер-ионного механизма и тримолекулярного механизма.

Образование цвиттер-иона.

На первой стадии молекула MEA взаимодействует с молекулой CO_2 с образованием промежуточного цвиттер-иона:

$$RNH_2 + CO_2 \leftrightarrow RNH_2^+ - COO^-$$

где RNH_2- молекула моноэтаноламина

Образование карбамата.

Цвиттер-ион неустойчив и быстро реагирует со второй молекулой MEA, в результате чего образуется карбамат-ион и протонированный MEA:

$$RNH_2^+ \leftrightarrow RNH_2 + H^+$$

что влияет на кислотно-основное равновесие раствора.

Реакции с водой.

Параллельно часть растворённого CO_2 реагирует с водой, образуя угольную кислоту, которая диссоциирует до бикарбоната и карбоната:

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow HCO_3^- + H^+$$

Эти побочные реакции снижают доступность CO_2 для образования карбаматов, особенно при низких концентрациях MEA.

$$CO_2 + 2RNH_2 \leftrightarrow RNHCOO^- + RNH_3^+$$

ISSN 3030-3907

что согласуется с экспериментальными данными при высоких скоростях реакции.

Уравнения для расчёта массообмена.

Для описания процесса в RPB используется общий объёмный коэффициент массообмена KGaK_GaKGa. Он может быть рассчитан через баланс мольных долей CO_2:

$$K_{G^a} = \frac{G_1}{\pi PZ(r_{out}^2 - r_{in}^2)} \int \frac{1}{(y_{CO_2} - y_{CO_2}^*)} d\left(\frac{y_{CO_2}}{1 - y_{CO_2}}\right)$$

где P — общее давление, Z — осевая высота насадки в RPB, r_{in} и r_{out} обозначают внутренний и внешний радиусы насадки, соответственно. G_1 — расход инертного газа. y_{CO_2} и y_{CO_2*} обозначают мольную долю CO_2 в газовой фазе и равновесную мольную долю CO_2, соответственно. Поскольку взаимодействие CO_2 с водным раствором моноэтаноламина (MEA) характеризуется высокой скоростью химической реакции, можно принять $y_{CO_2*}=0$. Тогда интегрирование уравнения упрощается и приводит к следующему выражению:

$$K_{G^a} = \frac{G_1}{\pi PZ(r_{out}^2 - r_{in}^2)} \times \left[ln \frac{y_{in}(1 - y_{out})}{y_{out}(1 - y_{in})} + \left(\frac{1}{1 - y_{in}} + \frac{1}{1 - y_{out}}\right)\right]$$

где y_{in} и y_{out} — мольные доли CO_2 на входе и выходе в газовой фазе, соответственно. Кроме того, эффективность улавливания CO_2 (η), определяемая как отношение количества утилизированного газа к его начальному содержанию в потоке, рассчитывается по следующему уравнению:

$$\eta = \left[1 - \frac{y_{out}(1 - y_{in})}{y_{in}(1 - y_{out})}\right] \times 100\%$$

3. Результаты и обсуждения

3.1. Влияние концентрации MEA на эффективность улавливания CO_2, коэффициент массообмена K_{Ga} и высоту массопереноса (HTU)

В настоящем исследовании тщательно проанализировано влияние различных концентраций моноэтаноламина (MEA) на эффективность улавливания CO_2 и общий объемный коэффициент массообмена в контролируемых условиях. Были изучены экспериментальные данные, полученные при использовании растворов MEA с массовыми концентрациями 30%, 50%, 70% и 90%, а также рассмотрены их последствия для процессов абсорбции CO_2 и массообмена.

ISSN 3030-3907

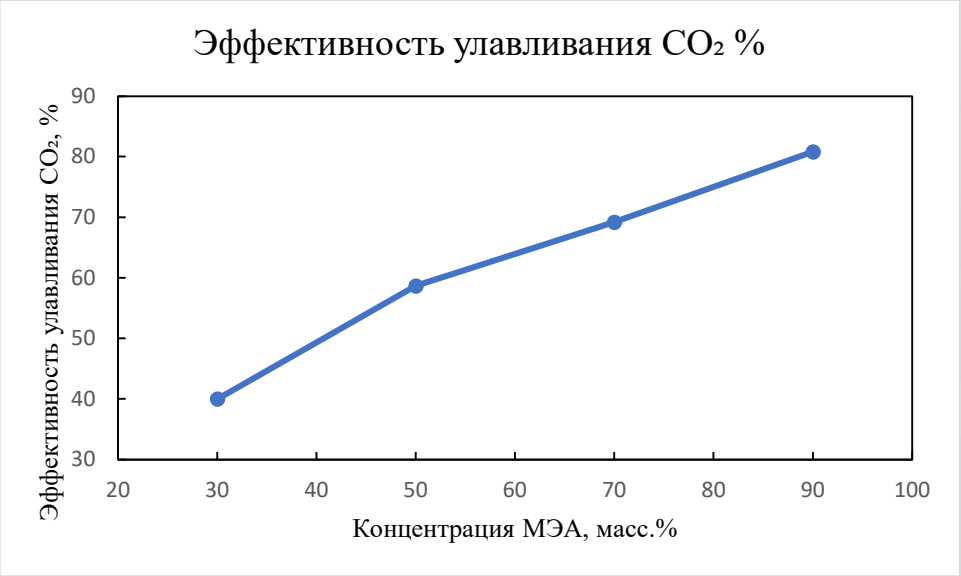


Рисунок 2. Влияние концентрации моноэтаноламина на эффективность улавливания CO_2. Условия эксперимента: расход жидкости — 0,23 л/мин; расход газа — 13,4 л/мин; концентрация CO_2 на входе — 15%; давление — 101 325 Н/м²; температура — 25 °С; скорость вращения — 1500 об/мин.

Как показано на рисунке 2, с увеличением концентрации MEA наблюдается чётко выраженная тенденция роста эффективности улавливания CO_2. При минимальной концентрации MEA (30%) эффективность составляла около 40%, тогда как при максимальной концентрации (90%) она достигала почти 80%. Такое поведение связано с увеличением количества ионов гидроксида на единицу объема по мере роста концентрации MEA. Эти ионы играют ключевую роль в процессе абсорбции, реагируя с CO_2 и повышая общую скорость улавливания.

Полученные результаты согласуются с предыдущими исследованиями Фрегиа и Рошелла, которые показали, что скорость реакции в модели псевдо-первого порядка напрямую зависит от концентрации MEA. При увеличении концентрации растворителя возрастает скорость химической реакции, что, в свою очередь, приводит к более высокому уровню улавливания CO_2. Эти выводы также подтверждаются работами Джассима и соавт., согласно которым более высокие концентрации MEA снижают проникновение CO_2 за счёт улучшенной кинетики абсорбции.

ISSN 3030-3907

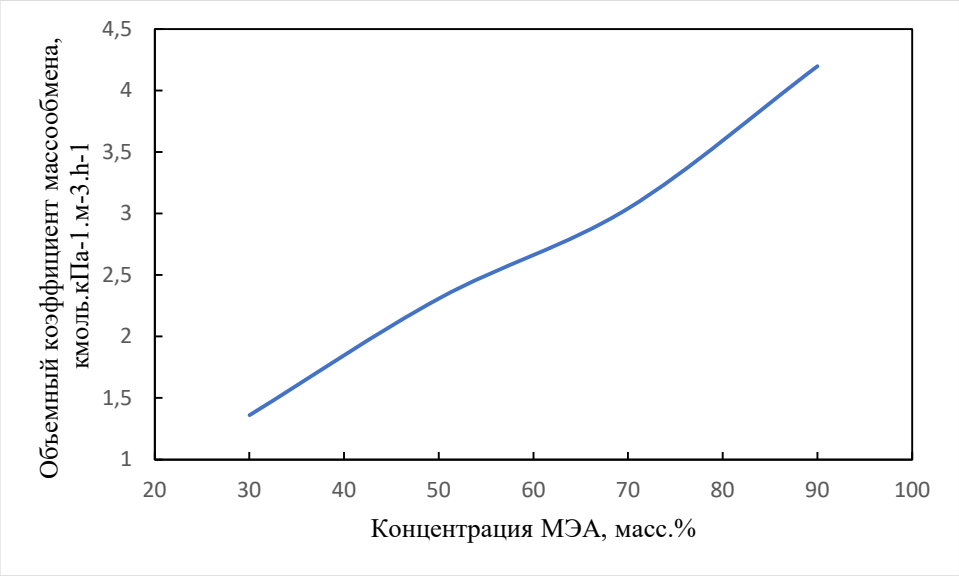


Рисунок 3. Влияние концентрации моноэтаноламина на объемный коэффициент массообмена. Условия эксперимента: расход жидкости — 0,23 л/мин; расход газа — 13,4 л/мин; концентрация CO_2 на входе — 15%; давление — 101 325 Н/м²; температура — 25 °С; скорость вращения — 1500 об/мин.

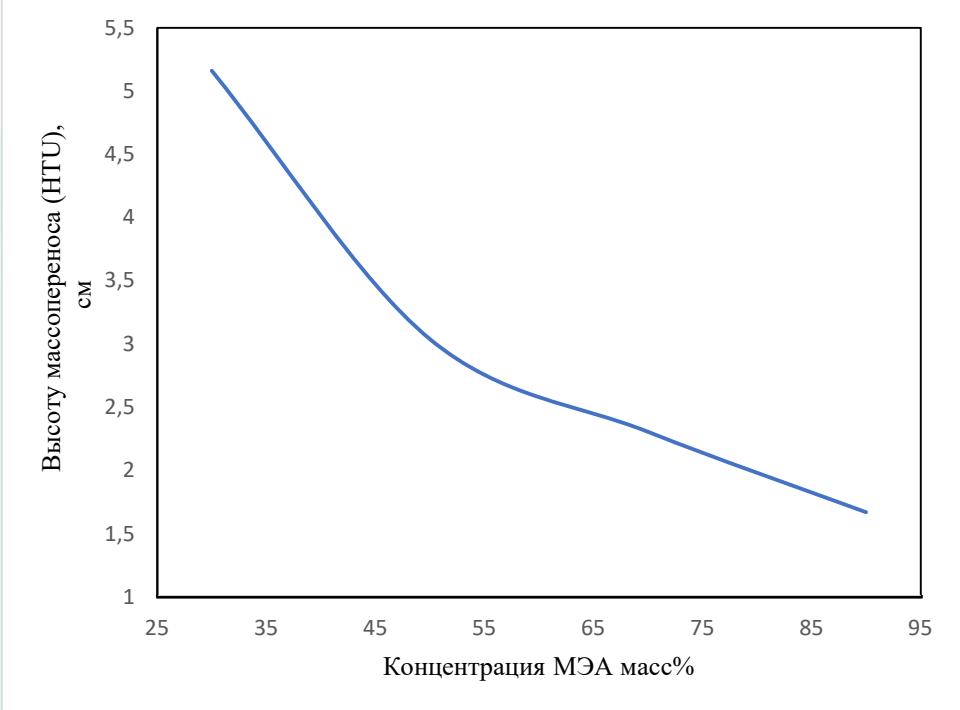


Рисунок 4. Влияние концентрации моноэтаноламина на высоту массопереноса (HTU). Условия эксперимента: расход жидкости — 0,23 л/мин; расход газа — 13,4 л/мин; концентрация CO_2 на входе — 15%; давление — 101 325 Н/м²; температура — 25 °С; скорость вращения — 1500 об/мин.

Второй аспект исследования посвящен влиянию концентрации МЕА на общий объемный коэффициент массообмена. Как видно из рисунки 3 и 4,

ISSN 3030-3907

увеличение концентрации MEA сопровождается ростом коэффициента K_{Ga}, что свидетельствует об улучшении эффективности массообмена. Это объясняется более интенсивным взаимодействием CO_2 с раствором — при высокой концентрации MEA больше гидроксид-ионов доступно для реакции, что увеличивает скорость массообмена и повышает общую эффективность процесса улавливания.

Тем не менее, при увеличении концентрации MEA, наряду с ростом эффективности улавливания и массообмена, возникают и практические ограничения. Более высокая концентрация приводит к увеличению вязкости растворителя, что способствует образованию более толстой жидкой пленки и снижает движущую силу массообмена. Таким образом, существует компромисс между повышенной эффективностью улавливания и потенциальным снижением интенсивности массообмена, который необходимо учитывать при оптимизации процесса для промышленных нужд.

Экспериментальные данные также показывают взаимосвязь между концентрацией MEA и высотой массопереноса (HTU), как видно на рисунке 3 и 4. При снижении концентрации MEA значение HTU увеличивается, что указывает на снижение эффективности массообмена. Напротив, при более высоких концентрациях MEA HTU уменьшается, что подтверждает повышение массообменной эффективности благодаря ускоренной кинетике абсорбции.

Хотя полученные данные свидетельствуют о преимуществах более высоких концентраций MEA для улавливания CO_2, необходимо учитывать и сопутствующие практические риски. В частности, повышение концентрации MEA увеличивает вероятность коррозии оборудования, что представляет собой серьёзную проблему в промышленных условиях. Кроме того, рост вязкости может вызывать трудности в эксплуатации, связанные с гидродинамикой и сопротивлением массообмену.

Поэтому крайне важно определить оптимальную концентрацию MEA, обеспечивающую максимальную эффективность улавливания CO_2 при минимизации негативных последствий, таких как повышенная вязкость и коррозия. Для этого необходимы дополнительные исследования, направленные на оценку компромиссов между этими факторами и изучение влияния других параметров процесса, таких как температура, давление и расход потоков, на общую эффективность системы улавливания CO_2.

4. Выводы

Проведённые эксперименты показали, что концентрация MEA оказывает решающее влияние на эффективность улавливания CO_2 во

ISSN 3030-3907

вращающейся насадочной колонне. С увеличением концентрации MEA с 30% до 90% эффективность улавливания возрастает почти вдвое, коэффициент массообмена (KGa) существенно увеличивается, а HTU снижается, что указывает на интенсификацию массообменных процессов. В то же время чрезмерное повышение концентрации сопровождается ростом вязкости и коррозионной активности раствора, что создаёт эксплуатационные риски при промышленной реализации. Таким образом, оптимизация концентрации MEA позволяет достичь высокого уровня улавливания CO_2 при сохранении надёжности и экономичности процесса, что подтверждает перспективность использования RPB-технологии в промышленных установках посткомбустионного улавливания углекислого газа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУР

1. Shukla C., Shukla A., Bandyopadhyay S. A review of process-intensified CO_2 capture in rotating packed beds (RPB) // Frontiers in Energy Research. – 2023. – Vol. 11. – Art. 1135188. – DOI: 10.3389/fenrg.2023.1135188.
2. Jung H., Park N., Lee J.H. Evaluating the efficiency and cost-effectiveness of RPB-based CO_2 capture: simultaneous design and operating condition optimization // Applied Energy. – 2024. – Vol. 365. – P. 123251. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.123251.
3. Kantouros B., Kazepidis P., Papadopoulos A.I., et al. Rotating Packed Beds for Post-Combustion CO_2 Capture: Holistic Process Modeling and Plant Design // Chemical Engineering Science. – 2025. – Art. 122466. – DOI: 10.1016/j.ces.2025.122466.
4. Danbatta M.B., Al-Azri N.A., Qyyum M.A., Al-Rawahi N. Carbon capture solvents for the applicability of rotating packed bed: advancements, challenges and recommendations // Carbon Capture Science & Technology. – 2025. – Vol. 15. – Art. 100426. – DOI: 10.1016/j.ccst.2025.100426.
6. Hendry J.R., et al. Pilot-Scale Carbon Capture in a Heat-Pipe-Intercooled Rotating Packed Bed // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2025. – DOI: 10.1021/acs.iecr.4c01614.
7. Joel A.S., Lu M.-C., Shukla B., et al. Experimental study on the effect of process parameters on CO_2 capture using a rotating packed bed // Energy, Sustainability and Environment (ESE3). – 2024. – DOI: 10.1002/ese3.1736.
8. Jassim M.S., Rochelle G., Eimer D., Ramshaw C. Carbon Dioxide Absorption and Desorption in Aqueous Monoethanolamine Solutions in a Rotating Packed Bed // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2007. – Vol. 46, No. 9. – P. 2823–2833. – DOI: 10.1021/ie061402e.

ISSN 3030-3907

9. Lin C.-C., Chen Y.-W. Performance of a cross-flow rotating packed bed in removing CO_2 from gaseous streams by chemical absorption // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2011. – Vol. 5, No. 3. – P. 668–675. – DOI: 10.1016/j.ijggc.2010.11.006.
10. Kang J.-L., Lee K.-S., Song H.-J. Modeling studies on absorption of CO_2 by monoethanolamine solution in a rotating packed bed // International Journal of Greenhouse Gas Control. – 2014. – Vol. 26. – P. 1–14. – DOI: 10.1016/j.ijggc.2014.04.006.
11. National Carbon Capture Center. ROTA-CAP: An Intensified Carbon Capture System Using Rotating Packed Beds (Final Report). – 2024.
12. Hernández-Narciso C.R., et al. Thermophysical Behavior of Carbonated Aqueous Solutions Containing Monoethanolamine and HEIA: Impact of MEA Degradation // Journal of Chemical & Engineering Data. – 2024. – Vol. 69, No. 9. – P. 4088–4104. – DOI: 10.1021/acs.jced.4c00077.
13. Zhang J., Li X., et al. Corrosion performance of carbon/stainless steel in amine-based CO_2 capture systems // Greenhouse Gases: Science and Technology. – 2023. – Vol. 13, No. 6. – Art. e2250. – DOI: 10.1002/ghg.2250.
14. Du J., Li G., et al. Review on post-combustion CO_2 capture by amine solvents: mechanisms and performance of blended systems // Chemical Engineering Journal. – 2024. – Vol. 483. – P. 149391. – DOI: 10.1016/j.cej.2024.149391.
15. Akinmoladun A., et al. Advances and future perspectives in post-combustion CO_2 capture // Carbon Capture Science & Technology. – 2025. – Vol. 15. – Art. 100430. – DOI: 10.1016/j.ccst.2025.100430.
16. Zanco S.E., et al. Post-combustion CO_2 Capture: A Comparative Techno-Economic Analysis of Mature Separation Processes // ACS Engineering Au. – 2021. – Vol. 1, No. 1. – P. 7–19. – DOI: 10.1021/acsengineeringau.1c00002.
17. Papadopoulos A.I., Seferlis P., et al. Phase-Change Solvents and Processes for Postcombustion CO_2 Capture // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2019. – Vol. 58, No. 31. – P. 13916–13932. – DOI: 10.1021/acs.iecr.8b06279.
18. Keer H., Zhang Y., et al. Interpretable prediction of viscosity and CO_2 absorption rate of amines via machine learning // Chemical Engineering Science. – 2025. – Vol. 284. – P. 120535. – DOI: 10.1016/j.ces.2025.120535.
19. Xenitopoulos T., Papadopoulos A.I., Seferlis P. Data-driven modeling of CO_2 capture in rotating packed beds (enzyme-enhanced absorption) using LightGBM // Fuel. – 2025. – Vol. 380. – Art. 131969. – DOI: 10.1016/j.fuel.2025.131969.

ISSN 3030-3907