

ПЕРСПЕКТИВЫ МЕМБРАННОЙ ДЕОКСИГЕНАЦИИ АЛКАНОЛАМИНОВЫХ АБСОРБЕНТОВ CO₂ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ИХ ДЕГРАДАЦИИ (МИНИОБЗОР)

© 2022 г. С. Д. Баженов^{1,*}

¹ *Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, г. Москва, 119991 Россия*

**E-mail: sbazhenov@ips.ac.ru*

Поступила в редакцию 16 марта 2022 г.

После доработки 4 мая 2022 г.

Принята к публикации 7 июня 2022 г.

Абсорбция водными растворами алканолламинов является наиболее зрелой технологией выделения диоксида углерода (CO₂) из природного газа, отходящих газов сектора энергетики и других смесей. Возможное присутствие кислорода в очищаемой газовой смеси или натекание воздуха в систему абсорбционной очистки приводит к окислительной деструкции амина и дезактивации абсорбционной жидкости с образованием обширной гаммы коррозионно-активных продуктов деструкции. В работе освещены современные представления о влиянии растворенного кислорода на деградацию аминовых абсорбентов. Описаны основные методы предотвращения и борьбы с окислительной деструкцией алканолламинов. В качестве альтернативной контрмеры предложено прямое удаление кислорода (деоксигенация) из абсорбционных жидкостей в компактных и модульных мембранных контакторах газ-жидкость. Представлены ретроспектива и обзор современных работ в области мембранной деоксигенации водных сред. Описаны передовые работы в области удаления кислорода из аминовых абсорбентов CO₂, применяемых для очистки дымовых газов.

Ключевые слова: мембранный контактор, композиционная мембрана, деоксигенация, кислород, деградация, алканолламин, диоксид углерода

DOI: 10.31857/S0028242122040086, **EDN:** PCGCK

В промышленности очистка природного газа и технологических газов от кислых примесей (в первую очередь, диоксида углерода и соединений серы) – важная составляющая процессов газопереработки. Наряду с этим, в мире получают развитие тенденции по экономическому стимулированию снижения антропогенных выбросов CO₂ с целью уменьшения его влияния на климат посредством политики введения углеродного налога и трансграничных углеродных пошлин [1]. Это делает актуальной задачу выделения диоксида углерода из различных технологических потоков как с экономической, так и экологической точек зрения. Несмотря на активное проведение исследований по разработке новых эффективных методов улавливания диоксида углерода, наиболее технологиче-

ски зрелым промышленным способом в мире является аминная очистка – процесс абсорбции CO₂ с использованием водных растворов различных алканолламинов [2–4]. В то же время, проведение регенерации абсорбентов (десорбции CO₂) при повышенных температурах (100–120°C) сопряжено с постепенной химической деструкцией аминов, которая инициируется растворенным в абсорбционной жидкости кислородом [5]. Кислород может содержаться в очищаемой газовой смеси: например, отходящие газы в металлургии, нефтехимических процессах или на электростанциях могут содержать до 15 об. % O₂ [6]. Кислород может проникать в амин при его негерметичном хранении (наличие контакта с воздухом) или при подсосе воздуха в систему аминовой очистки [2].

Окислительная деградация алканоламиновых абсорбентов

Присутствие растворенного кислорода в аминовых абсорбентах приводит к прямой интенсификации коррозии оборудования [7–11], а также непосредственному окислению аминов (окислительная деградация аминовых абсорбентов), в результате чего их потери могут достигать от 0.2 до 3.65 кг на тонну выделенного CO_2 [12]. Механизм окисления включает множество реакций, которые начинаются, по-видимому, с атаки молекул аминов или карбаматов аминов свободными кислородными радикалами [6, 13, 14]. Эти реакции протекают сравнительно медленно, но в условиях регенерации абсорбента (температуры 100–120°C) их скорость заметно возрастает. При этом образуется широкий спектр продуктов деструкции, таких как карбоновые кислоты, аминокислоты, амиды, амины, альдегиды, аммиак и др. [13]. Карбоновые кислоты (муравьиная, уксусная, гликолевая, щавелевая и т. д.) доминируют, поскольку, являясь термоустойчивыми соединениями, образуются на финальном этапе множества химических превращений алканоламинов [13, 15, 16]. Современный обзор результатов 29 пилотных испытаний с различными аминами на 18 пилотных установках выделения CO_2 из дымовых газов по всему миру [6] подтверждает наличие этих соединений во всех рассмотренных случаях. Схема окислительных реакций с образованием карбоновых кислот представлена на рис. 1 на примере моноэтаноламина.

Кроме того, деградация обусловлена взаимодействием аминов и примесей в очищаемой смеси (например, оксидов серы и азота) или в жидкости из-за коррозии оборудования и подпитки некачественной водой [5]. Побочные реакции приводят к образованию термостабильных солей (ТСС) – устойчивых солей протонированного алканоламмония и анионов органических и неорганических кислот [17, 18], которые не разлагаются в процессе десорбции CO_2 [3, 15]. Продукты окисления приводят к изменению физико-химических свойств абсорбента, его вспениванию, эрозии и загрязнению оборудования, некоторые из них необратимо связывают активный амин в нерегенерируемые соединения (в частности, ТСС), которые, накапливаясь в системе, снижают общую производительность системы [5, 16, 18]. Являясь сильными коррозионными аген-

тами [5, 18], данные соединения приводят к росту содержания продуктов коррозии оборудования в растворе (ионов железа, хрома, никеля и др.), которые, в свою очередь, катализируют дальнейшее окисление аминов [19, 20], что, по сути, является автокаталитической деструкцией абсорбента.

Предотвращение и методы борьбы с последствиями окислительной деструкции алканоламинов

Возможным решением предотвращения окислительной деструкции служит введение в растворы аминов ингибиторов окисления – сульфита или бисульфита натрия или калия [21, 22], гидразина и гидроксилламина [23, 24], которые позволяют снизить содержание кислорода в абсорбенте до уровней нескольких ppm, но, однако, являются токсичными для человека и опасными для окружающей среды, а также могут приводить к вспениванию растворов. Недавно в работе [25] предложены новые безопасные для человека ингибиторы коррозии и окисления аминов: карбогидразид, 2-бутанон оксим, α, α' -(1-метилэтилендиимино)ди-*o*-крезол – в качестве ингибиторов окисления, а 1,3-диаминопропан-*N,N,N',N'*-тетрауксусная кислота, пирогаллол и трицин – в качестве комплексообразователей. В работе [26] для этой цели использованы тартраты моноэтаноламина и меркаптоэтиламмония, а в работах [27, 28] – 2,5-димеркапто-1,3,4-тиодиазол, диэтилентриаминпентауксусная кислота и гидроксипентилдифосфониевая кислота, которые позволяют снизить окисление моноэтаноламина более чем на 90%. В промышленности для предотвращения коррозии, вызванной в том числе продуктами окисления амина, широко применяется метаванадат натрия [2], который, однако, наоборот, катализирует окислительную деградацию аминов [29, 30].

Существующим методам выделения продуктов окислительной деструкции и ТСС посвящен ряд обзорных работ [5, 16–18]. Основными способами борьбы с негативным влиянием продуктов деструкции и ТСС являются частичная замена («продувка») абсорбента, его подщелачивание, а также вакуумная дистилляция абсорбента [31, 32]. В случае вакуумной дистилляции вода и чистый алканоламин отводятся в паровой фазе в десор-

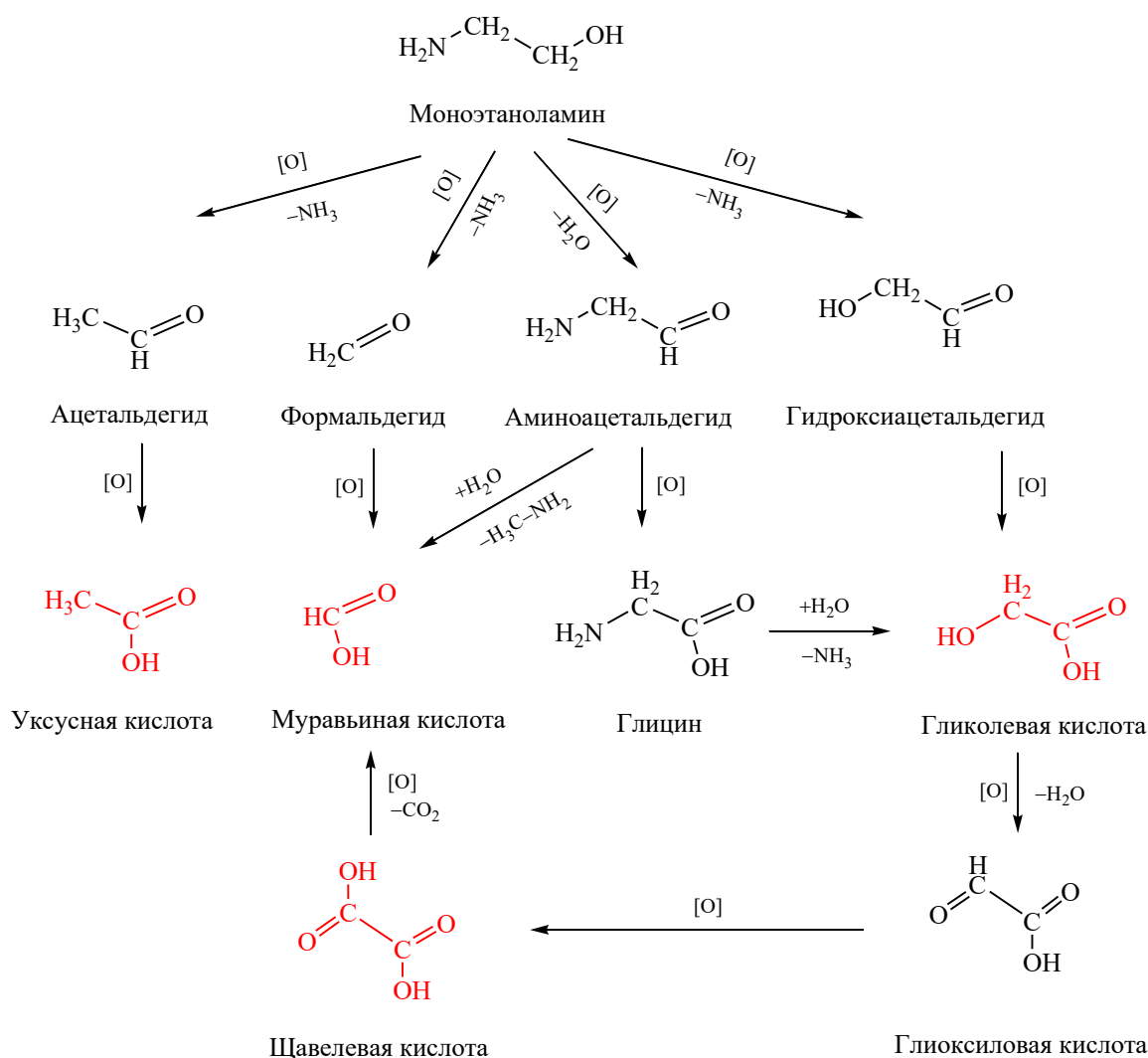


Рис. 1. Схема окислительной деградации моноэтаноламина с образованием карбоновых кислот (данные адаптированы из [13, 16]).

бер под так называемую «глухую» тарелку, а ТСС и другие продукты деструкции амина остаются в кубовом остатке. Этот способ максимально энергозатратен, а кубовый остаток токсичен и требует специальных мер утилизации [33–35]. Альтернативой служат сорбционные методы очистки, из которых промышленно развит метод выделения анионов ТСС на ионообменных смолах [36, 37]. Эти методы требуют большого количества реагентов (кислот и щелочей) на регенерацию смол, что приводит к образованию значительной массы разбавленных стоков [16]. Сейчас в этом направлении

предлагаются новые поколения сорбентов на базе биоразлагаемых природных материалов – хитозана и альгината натрия [38–41], а также емкостная деионизация – электросорбционный процесс с пористыми электродами для «накапливания» ТСС [42, 43]. Менее энерго- и реагентозатратные мембранные процессы представляют третье направление. Например, нанофильтрация перспективна для предварительного концентрирования ТСС [44, 45], а электродиализ является промышленным способом выделения ТСС из растворов вторичных и третичных алканоломинов газопереработки

[5, 46], из сточных вод аминовых установок [47, 48]. Показано, что электродиализ применим для выделения ТСС из абсорбентов очистки дымовых газов на основе моноэтаноламина (первичный амин) [49–52], однако перенос ТСС из растворов, особенно с низким содержанием ТСС, затруднен из-за присутствия остаточного связанного CO_2 , что приводит к значительным потерям амина. Эти потери можно снизить, используя двухступенчатые схемы электродиализной очистки [53, 54]. Сравнительно недавно предложен новый метод экстракции ТСС гидрофобными органическими экстрагентами [55, 56], которые позволяют очищать абсорбенты с низким содержанием ТСС (1000 ppm) при отсутствии подвода тепла и минимальных энергозатратах. Используются растворы аминов или четвертичных аммониевых солей с длинными боковыми заместителями ($C \geq 8$) в высших спиртах ($C \geq 6$), которые не смешиваются с растворами аминов. В работе [55] показано, что гидроксид трикаприлметиламмония в 1-октаноле связывает ТСС по кислотно-основному механизму. Эффективность экстрагента может быть повышена использованием разветвленного 2-этил-1-гексанола в качестве растворителя [56].

Мембранная деоксигенация водных сред: ретроспектива и особенности реализации

Мембранные технологии являются энергоэффективными альтернативами традиционным методам разделения [57], и могут быть использованы для решения технологических проблем аминного выделения CO_2 . В частности, для предотвращения негативного влияния кислорода перспективно его прямое удаление из аминовых растворов методом деоксигенации (удаление молекулярного растворенного кислорода) в мембранных контакторах газ-жидкость. Мембранный контактор – аппарат для осуществления процесса разделения или химического превращения, в котором мембрана выступает в качестве границы раздела двух фаз. В случае системы с массопереносом из газа в жидкость, жидкая фаза содержит селективный хемосорбент [58]. В частности, использование в контакторах мембран в виде полых волокон позволяет реализовать высокую (до $5\,000\text{ м}^2/\text{м}^3$) удельную площадь мембраны в аппарате [59]. Это приводит к увеличению площади массопереноса на единицу объема

аппарата на 400–1500% [60] по сравнению с традиционным разделительным оборудованием, вследствие чего мембранные контакторы-дегазаторы до 10 раз более компактны [61]. Дополнительными преимуществами являются: отсутствие взаимного диспергирования фаз и связанных с этим проблем смешения и необходимости их дальнейшего разделения; независимость регулирования потоков фаз; простота монтажа/эксплуатации и низкие эксплуатационные затраты; модульный дизайн, который позволяет линейно увеличивать или уменьшать производительность разделительных установок в зависимости от технологических потребностей [61, 62].

Достоинства мембранных контакторов были наглядно продемонстрированы в процессах мембранной дегазации жидкостей, в первую очередь при удалении растворенного кислорода из воды. Решение этой задачи требуется в фармацевтической, пищевой, биотехнологической [63], полупроводниковой [64], энергетической [65] областях промышленности. Например, в энергетическом секторе удаление растворенного кислорода из воды до требуемого уровня в 5 ppm позволяет значительно снизить коррозию котлов и трубопроводов теплоэлектростанций. В микроэлектронной промышленности этот предел на порядок ниже и может достигать 0.1 ppb в случае получения ультрачистой воды для промывки кремниевых плат микрочипов [64].

Необходимость удаления кислорода из воды стало одним из определяющих векторов развития технологии мембранных контакторов. Так, еще в 1986 г. в работе [66] Yang и Cussler представили противоточные и перекрестно-точные конструкции половолоконных модулей-контакторов, впервые провели эксперименты по деоксигенации воды и получили корреляционные уравнения массопереноса, которые оказались сравнимы с ранее полученными зависимостями для задач тепло-и массопереноса. Основным выводом их работы заключался в том, что ключевым параметром половолоконных модулей-контакторов должен считаться не коэффициент массопереноса, который сравним с величинами, реализуемыми в традиционном разделительном оборудовании, а площадь массопереноса на единицу объема аппарата, которая значительно больше. В работе [67] эти же авторы использовали модули с полипропиленовыми полыми волокнами (мембраны

Celgard X20, Questar, Charlotte, NC; внутренний диаметр 200 мкм; толщина стенки 25 мкм; пористость 30%; средний размер пор 30 нм; число волокон в модуле – 2700–10 000) с целью извлечения растворенного кислорода из воды для поддержания жизнеобеспечения организмов в условиях замкнутого пространства (технология «искусственных жабр»). Исследователям удалось показать принципиальную возможность мембранного снабжения кислородом мелких животных на примере хомяков, крыс и одной собаки [67]. Под руководством E.L. Cussler было показано, что оптимальный, с точки зрения стоимости на единицу массы перенесенного кислорода, размер волокон простых полволоконных модулей составляет 100–200 мкм [68]. При меньших размерах волокна затраты на перекачку воды через модуль становятся слишком велики, в то время как при больших размерах становятся неоправданно высоки затраты на мембрану [68]. Наконец, впервые возможность применения мембран для получения ультрачистой обескислороженной воды была показана в работах Tai et al. [69] и Yagi et al. [70]. В первой работе авторам удалось снизить содержание кислорода в воде до 8 ppb с применением модулей на основе описанных выше полволоконных пропиленовых полволоконных мембран, в то время как во второй мембранные модули были использованы в сочетании с сорбцией или азотным барботажем с целью получения воды с остаточным содержанием кислорода 10 ppb для производства субмикронных ультрабольших интегральных схем.

Движущая сила трансмембранного переноса кислорода технически реализуется тремя способами: 1) вакуумирование газовой части контактора [64, 65, 71–76]; 2) сдвук инертным газом [71, 77–79]; 3) комбинирование указанных двух способов [71, 78]. В первом случае наилучшая степень деоксигенации достигается при приложении вакуума с обеих сторон мембранного модуля. Во втором случае инертный газ (чаще всего, азот) подают в модуль в режиме противотока. Этот метод достаточно эффективен, однако для глубокой очистки необходим азот высокой чистоты, при этом большое количество воды испаряется, что сказывается на энергетике процесса, кроме того, происходит насыщение очищаемой воды азотом. Третий подход позволяет регулировать остаточную концентрацию продувочного газа в воде. В качестве альтернативы вместо

вакуумирования или сдувки возможно использование растворов антиоксидантов (например, сульфита натрия, аскорбиновой кислоты и др.). Однако такой вариант реализации процесса в литературе не встречается.

Для удаления кислорода из воды в подавляющем большинстве используют контакторы марки Liqui-Cel® (3M) на основе дешевых гидрофобных пористых полипропиленовых полволоконных мембран с геометрическими параметрами 0.3/0.2–0.24 мм и средним размером пор 30 нм [71, 73, 76, 78, 80]. Тем не менее, применение нашли гидрофобные пористые полые волокна из полиэтилена [72], поливинилиденфторида [81] и полисульфона [77]. Перспективны непористые гидрофобные мембраны из полидиметилсилоксана [64, 74] и композиционные мембраны с тонким селективным слоем из полидиметилсилоксана на подложках из поливинилиденфторида [82] и сополимера перфтордиметилдиоксида и тетрафторэтилена на подложках из полипропилена [80]. Современные достижения в области формования полволоконных мембран позволяют получать для этой задачи трехканальные пористые полые волокна из поливинилиденфторида [83, 84] и спиралевидные пористые полволоконные мембраны из полипропилена [85] с размерами пор 2–200 нм. Масштабирование процесса позволяет удалить растворенный кислород из потоков оборотной воды теплоэлектроцентралей мощностью до 5 м³/ч с одновременным снижением ее коррозионной активности, что продемонстрировано в пилотных испытаниях дегазаторов с пористыми полволоконными мембранами из поли-4-метил-пентена-1 (площадь мембран 40 м²) [65] и полипропилена (площадь мембран 42 м²) [75]. Даже в полупромышленных условиях удается снизить содержание кислорода в воде на три порядка [71], в то время как стоимость воды, дегазированной мембранным способом в два раза ниже стоимости воды, дегазированной нагреванием [78]. Наконец, эффективность деоксигенации в контакторах может быть значительно увеличена при использовании каталитических полых волокон. Так, в ИНХС РАН предложены контакторы на основе промышленных полволоконных полипропиленовых мембран с нанесенными на поверхность наночастицами палладия, катализирующими реакцию взаимодействия растворенного в воде кислорода и водорода, пода-

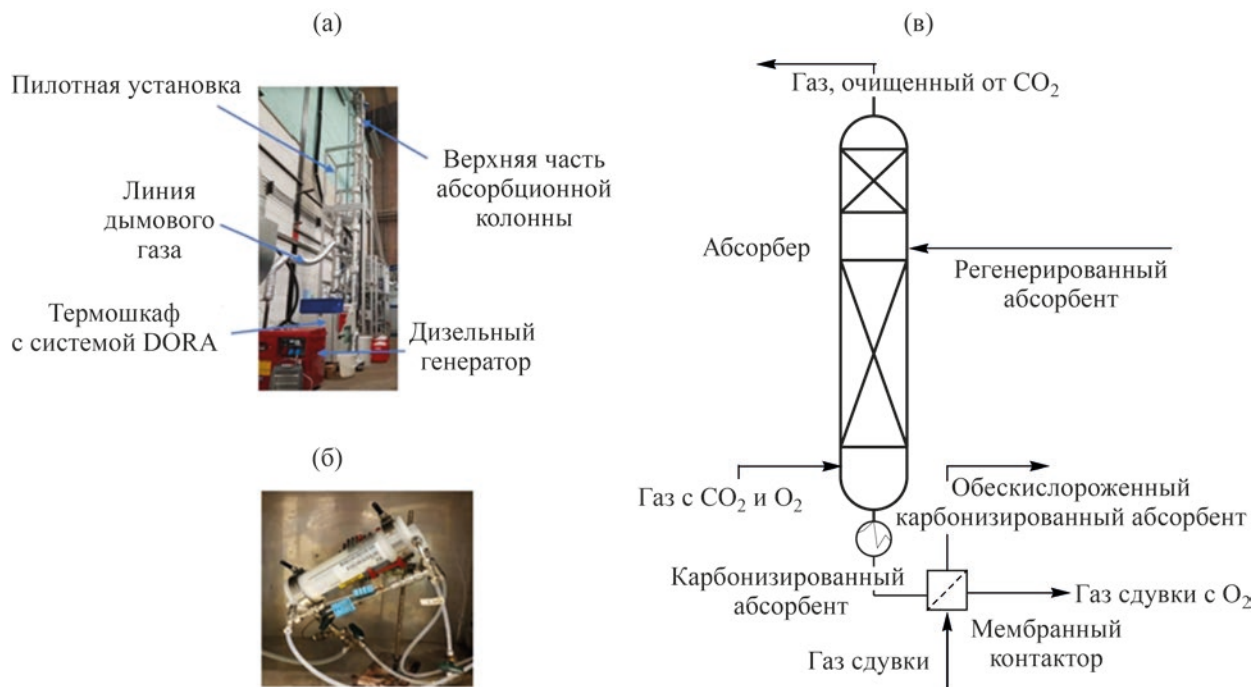


Рис. 2. Мобильная пилотная установка TNO для улавливания CO₂ из модельных дымовых газов: (а) – общий вид пилотной установки извлечения CO₂ из дымовых газов; (б) – общий вид мембранного контактора-деоксигенатора DORA; (в) – схематическое изображение включения деоксигенатора DORA в линии карбонизированного абсорбента (адаптировано из [90]).

ваемого с внутренней стороны мембран [86, 87]. Это значительно улучшает кинетику деоксигенации даже в случае исходно низких концентраций кислорода в воде.

Мембранная деоксигенация для удаления кислорода из абсорбентов CO₂

С учетом вышесказанного очевидна актуальность реализации мембранной деоксигенации аминовых абсорбентов. Однако на данный момент широкомасштабные исследования в данном направлении начаты лишь Нидерландской организацией прикладных исследований в сфере естественных наук (Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek, TNO) [88, 89] – одним из мировых лидеров в области аминной очистки дымовых газов. Во-первых, исследователями показано [88], что стандартные коммерчески доступные электрохимические и оптические датчики O₂ могут быть использованы для прямых измерений содержания растворенного кислорода в водных растворах алканолamines, причем варьи-

рование типа алканолamina и его концентрации слабо влияют на растворимость O₂. Также создана простая модель для прогнозирования растворимости O₂ в карбонизированных растворах этаноламина и указана возможность присутствия эффекта высаливания, влияющего на эту величину [88]. Во-вторых, в работах [89, 90] авторами продемонстрированы результаты тестирования мембранно-контакторного процесса DORA (Direct Oxygen Removal Apparatus, устройство для удаления растворенного кислорода) – технологии, разработанной TNO для борьбы с окислительной деградацией абсорбентов, применяемых для выделения CO₂ из дымовых газов. Технология DORA была апробирована в сочетании с мобильной пилотной установкой TNO для улавливания CO₂ из модельных дымовых газов производительностью 5 нм³/ч, изображение которой представлено на рис. 2. В качестве деоксигенатора использовали половолоконный мембранно-контакторный модуль Liqui-Cel™ SP Series (2.5 × 8 extra-flow model) с общей площадью мембран 1.4 м². Применение мембранного контактора для деоксигенации абсорбента привело к сниже-

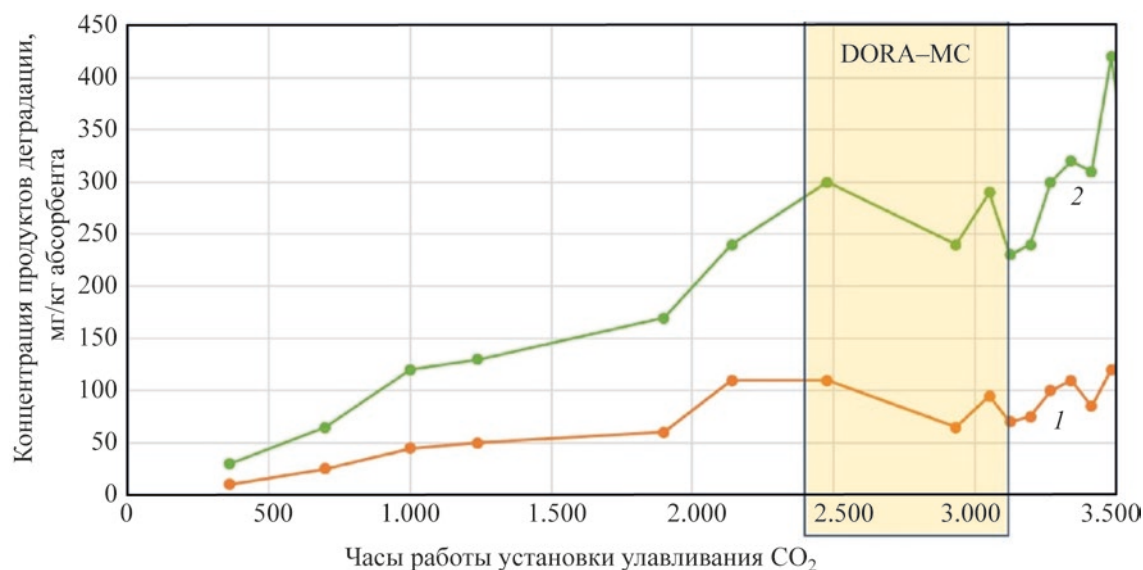


Рис. 3. Изменение содержание ацетата и оксалата в абсорбенте пилотной установки: 1 – уксусная кислота, мг/кг, 2 – щавелевая кислота, мг/кг. Этап включения и функционирования деоксигенатора DORA выделен желтым прямоугольником (адаптировано из [90]).

нию выбросов аммиака из абсорбера примерно на 70%, что свидетельствует о снижении деградации. Возможности технологии были продемонстрированы в промышленных условиях при очистке дымовых газов дизельного генератора водным 30 мас. % раствором моноэтаноламина. Результаты показали, что деоксигенация в мембранном контакторе способствует замедлению деградации абсорбента. На рис. 3 представлено изменение содержания ацетата и оксалата в абсорбенте с течением времени и показано, что запуск и функционирование мембранного деоксигенатора позволяет значительно снизить скорость их образования и поддерживать их концентрацию на постоянном уровне в течение ~700 ч (область, ограниченная желтым прямоугольником). Отключение деоксигенатора приводит к резкой интенсификации деградации абсорбента, что отражается в росте скорости образования ацетата и оксалата.

Как указывают разработчики, процесс может быть реализован не только в традиционном варианте со сдувкой/вакуумированием, но и с применением жидких антиоксидантов с другой стороны мембраны (вариант контактора жидкость–жидкость) [91]. Следует отметить, что технология DORA апробирована с применением стандартных мем-

бранных контакторов Liqui-Cel® на основе пористых полипропиленовых полых (пористость 25%, внешний/внутренний диаметр волокон 0.2/0.3 мм, размер пор 20–30 нм [92]). По результатам было отмечено, что воздействие деградированного абсорбента приводит к смачиванию пор мембран и протеканию абсорбента в газовую фазу, что ухудшает процесс массопереноса кислорода [90].

Использование пористых мембран в случае деоксигенации алканоламиновых абсорбентов, по-видимому, нерационально, поскольку неоднократно показано изменение морфологии пористой структуры мембран [93–96] в результате проникновения молекул амина в полимерную матрицу и частичного набухания полипропилена [97], вследствие чего мембраны смачиваются абсорбентом, резко ухудшая процесс массопереноса [98–100]. Эти мембраны неустойчивы к влиянию продуктов окислительной деструкции аминов [101]: было показано, что присутствие щавелевой, уксусной и муравьиной кислот в деградированном абсорбенте значительно снижает скорость массопереноса CO₂ в водные растворы моноэтаноламина, что, по-видимому, связано с их адсорбцией на поверхности полипропиленовых мембран и снижением их гидрофобности. Это приводит к увеличению степени

смачивания пор мембраны на 22–31% после 69 ч использования мембранного контактора [101]. Более того, существуют сведения, что даже пористые мембраны из максимально химически инертного гидрофобного материала – политетрафторэтилена – также подвержены смачиванию и протеканию абсорбентов CO_2 [102, 103]. Вследствие этого исследователями из TNO для задачи деоксигенации абсорбентов CO_2 предложены композиционные мембраны с тонкими селективными слоями из аморфных перфторированных полимеров с высокой долей свободного объема типа Teflon AF2400 [90, 91].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Деградация алканолминовых абсорбентов является сдерживающим фактором дальнейшего развития процесса аминной очистки технологических и сбросных газов от CO_2 . Одной из важнейших причин является присутствие растворенного кислорода в абсорбционной жидкости, окисляющего амин. Удаление кислорода из абсорбентов в мембранных контакторах газ–жидкость является многообещающим подходом, о чем свидетельствует обширный опыт их применения в области получения обескислороженной ультрачистой воды. Существующие немногочисленные работы по мембранной деоксигенации абсорбентов CO_2 реализованы на пористых полволоконных мембранных контакторах и документируют постепенное смачивание пор мембран абсорбентом и ухудшение массопереноса кислорода. Очевидно, что более рационально применение композиционных мембран с тонкими непористыми высокопроницаемыми слоями, предотвращающими проникновение и смачивание пористой структуры мембран абсорбентом. Селективные слои таких мембран должны в идеале иметь максимальную проницаемость по кислороду и минимальную проницаемость по парам воды и амина. При этом как селективные слои, так и используемые мембраны-подложки должны иметь высокую химическую и морфологическую устойчивость в среде деградированных абсорбционных жидкостей. Такие мембраны должны быть дополнительно химически и морфологически устойчивы в среде водных растворов ингибиторов окисления (например, водных растворах сульфита натрия или аммония) в случае использования их растворов для

создания движущей силы процесса в мембранном контакторе жидкость–жидкость. На данный момент в открытой литературе сведения по таким мембранам практически отсутствуют, их предстоит разработать.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена на базе ИНХС РАН при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 21-79-10400.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Баженов Степан Дмитриевич, с.н.с., к.х.н.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8192-3824>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carbon Border Adjustment Mechanism, (n.d.). https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_21_3661 (accessed March 15, 2022).
2. Kohl A.L., Nielsen R.B. // Gas purification 5th ed, Houst. Gulf Publ. Co. 1997.
3. Feron P.H.M. Absorption-based post-combustion capture of carbon dioxide. Elsevier, 2016. 792 p. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-03382-5>
4. Alent'ev A.Y., Volkov A.V., Vorotyntsev I.V., Maksimov A.L., Yaroslavtsev A.B. Membrane technologies for decarbonization // Membr. Membr. Technol. 2021. V. 35. № 3. P. 255–273. <https://doi.org/10.1134/S251775162105002>
5. Bazhenov S.D., Novitskii E.G., Vasilevskii V.P., Grushevenko E.A., Bienko A.A., Volkov A.V. Heat-stable salts and methods for their removal from alkanolamine carbon dioxide absorbents (review) // Russ. J. Appl. Chem. 2019. V. 92. № 8. P. 1045–1063. <https://doi.org/10.1134/S107042721908001>
6. Buvik V., Høisæter K.K., Vevelstad S.J., Knuutila H.K. A review of degradation and emissions in post-combustion CO_2 capture pilot plants // Int. J. Greenh. Gas Control. 2021. V. 106. P. 103246. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.10324>
7. Duan D., Choi Y.S., Nešić S., Vitse F., Bedell S.A., Worley C. Effect of oxygen and heat stable salts on the corrosion of carbon steel in MDEA-based CO_2 capture process // Corrosion. 2010. V. 66. № 12. P. 125004–125010. <https://doi.org/10.5006/1.352483>

8. *Soosaiprakasam I.R., Veawab A.* Corrosion and polarization behavior of carbon steel in MEA-based CO₂ capture process // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2008. V. 2. № 4. P.553–562. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.02.009>
9. *Kladkaew N., Idem R., Tontiwachwuthikul P., Saiwan C.* Studies on corrosion and corrosion inhibitors for amine based solvents for CO₂ absorption from power plant flue gases containing CO₂, O₂ and SO₂ // *Energy Procedia.* 2011. V. 4. P. 1761–1768. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.051>
10. *Zheng L., Landon J., Matin N.S., Thomas G.A., Liu K.* Corrosion mitigation via a pH stabilization method in monoethanolamine-based solutions for post-combustion CO₂ capture // *Corros. Sci.* 2016. V. 108. P. 281–292. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.02.013>
11. *Xiang Y., Xie W., Ni S., He X.* Comparative study of A106 steel corrosion in fresh and dirty MEA solutions during the CO₂ capture process: Effect of NO₃⁻ // *Corros. Sci.* 2020. V. 167. P. 108521. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108521>
12. *Moser P., Wiechers G., Schmidt S., Garcia Moretz-Sohn Monteiro J., Charalambous C., Garcia S., Sanchez Fernandez E.* Results of the 18-month test with MEA at the post-combustion capture pilot plant at Niederaussem – new impetus to solvent management, emissions and dynamic behaviour // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2020. V. 95. P. 102945. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102945>
13. *Gouedard C., Picq D., Launay F., Carrette P.L.* Amine degradation in CO₂ capture. Review // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2012. V. 10. P. 144–270. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.06.015>
14. *Bedell S.A.* // Oxidative degradation mechanisms for amines in flue gas capture, in: *Energy Procedia.* 2009. V. 1. № 1. P. 771–778. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.102>
15. *Supap T., Saiwan C., Idem R., Tontiwachwuthikul P.P.T.* Part 2: Solvent management: Solvent stability and amine degradation in CO₂ capture processes // *Carbon Manag.* 2011. V. 2. № 5. P. 551–566. <https://doi.org/10.4155/cmt.11.55>
16. *Dumée L., Scholes C., Stevens G., Kentish S.* Purification of aqueous amine solvents used in post combustion CO₂ capture: A review // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2012. V. 10. P. 443–455. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.07.005>
17. *Elmoudir W., Supap T., Saiwan C., Idem R., Tontiwachwuthikul P.* Review Series. Part 6: Solvent recycling and reclaiming issues. // *Carbon Manag.* 2012. V. 3. № 5. P. 485–509. <https://doi.org/10.4155/cmt.12.55>
18. *Wang T., Hovland J., Jens K.J.* Amine reclaiming technologies in post-combustion carbon dioxide capture // *J. Environ. Sci. (China).* 2015. V. 27. P. 276–289. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.06.037>
19. *Sexton A.J., Rochelle G.T.* Catalysts and inhibitors for oxidative degradation of monoethanolamine // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2009. V. 3. № 6. P. 704–711. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2009.08.007>
20. *Goff G.S., Rochelle G.T.* Oxidation inhibitors for copper and iron catalyzed degradation of monoethanolamine in CO₂ capture processes // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2006. V. 45. № 8. P. 2513–2521. <https://doi.org/10.1021/ie0490031>
21. *Emori W., Jiang S.L., Duan D.L., Ekerenam O.O., Zheng Y.G., Okafor P.C., Qiao Y.X.* Corrosion behavior of carbon steel in amine-based CO₂ capture system: effect of sodium sulfate and sodium sulfite contaminants // *Mater. Corros.* 2017. V. 68. № 6. P. 674–682. <https://doi.org/10.1002/maco.201609245>
22. *Morken A.K., Pedersen S., Nesse S.O., Flø N.E., Johnsen K., Feste J.K., de Cazenove T., Faramarzi L., Vernstad K.* // CO₂ capture with monoethanolamine: Solvent management and environmental impacts during long term operation at the Technology Centre Mongstad (TCM) // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2019. V. 82. P. 175–183. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.12.018>
23. *Saeed I.M., Alaba P., Mazari S.A., Basirun W.J., Lee V.S., Sabzoi N.* Opportunities and challenges in the development of monoethanolamine and its blends for post-combustion CO₂ capture // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2018. V. 79. P. 212–233. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.11.002>
24. *Rooney P.C., DuPart M.S., Bacon T.R.* Oxygen's role in alkanolamine degradation // *Hydrocarb. Process.* 1998. V. 77. № 7. P. 109–113
25. *Fytianos G., Vevelstad S.J., Knuutila H.K.* Degradation and corrosion inhibitors for MEA-based CO₂ capture plant // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2016. V. 50. P. 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.05.003>
26. *Zhao Z., Dong H., Huang Y., Cao L., Gao J., Zhang X., Zhang S.* Ionic degradation inhibitors and kinetic models for CO₂ capture with aqueous monoethanolamine // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2015. № 39. P. 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.05.001>
27. *Voice A.K., Rochelle G.T.* Inhibitors of monoethanolamine oxidation in CO₂ capture processes // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2014. V. 53. № 42. P. 16222–16228. <https://doi.org/10.1021/ie500996z>
28. *Léonard G., Voice A., Toye D., Heyen G.* Influence of dissolved metals and oxidative degradation inhibitors on the oxidative and thermal degradation of monoethanolamine in postcombustion CO₂ capture // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2014. V. 53. № 47. P. 18121–18129. <https://doi.org/10.1021/ie5036572>

29. *Uyanga I.J., Idem R.O.* Studies of SO_2^- and O_2^- induced degradation of aqueous MEA during CO_2 capture from power plant flue gas streams // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2007. V. 46. № 8. P. 2558–2566. <https://doi.org/10.1021/ie0614024>
30. *Bello A., Idem R.O.* Comprehensive study of the kinetics of the oxidative degradation of CO_2 loaded and concentrated aqueous monoethanolamine (MEA) with and without sodium metavanadate during CO_2 absorption from flue gases // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2006. V. 54. № 8. P. 2569–2579. <https://doi.org/10.1021/ie050562x>
31. *Ju H., El Moudir W., Aboudheir A., Mahinpey N.* Development of a facile reclaiming process for degraded alkanolamine and glycol solvents used for CO_2 capture systems // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2018. V. 74. P. 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.05.004>
32. *Tavan Y., Moradi M., Rostami A., Azizpour H.* Theoretical and industrial aspects of amine reclaiming unit to separate heat stable salts // *Sep. Purif. Technol.* 2020. V. 237. P. 116314. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116314>
33. *Badr S., Frutiger J., Hungerbuehler K., Papadokostantakis S.* A framework for the environmental, health and safety hazard assessment for amine-based post combustion CO_2 capture // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2017. V. 56. P. 202–220. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2016.11.013>
34. *Sexton A., Dombrowski K., Nielsen P., Rochelle G., Fisher K., Youngerman J., Chen E., Singh P., Davison J.* Evaluation of reclaiming sludge disposal from post-combustion CO_2 capture // *Energy Procedia.* Elsevier Ltd. 2014. V. 63. P. 926–939. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.102>
35. *Ghayur A., Verheyen T.V., Meuleman E.* Biological and chemical treatment technologies for waste amines from CO_2 capture plants // *J. Environ. Manage.* 2019. V. 241. P. 514–524. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.033>
36. *Bayati B., Mirshekari M., Veisy A., Gando-Ferreira L.M.* Removal of HSS from industrial amine solution by anionic resin (case study: Ilam gas refinery) // *Chem. Pap.* 2019. V. 73. № 2. P. 491–500. <https://doi.org/10.1007/s11696-018-0598-0>
37. *Pal P., Banat F., AlShoaibi A.* Adsorptive removal of heat stable salt anions from industrial lean amine solvent using anion exchange resins from gas sweetening unit // *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2013. V. 15. P. 14–21. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2013.08.001>
38. *Achazhiyath Edathil A., Pal P., Kannan P., Banat F.* Total organic acid adsorption using alginate/clay hybrid composite for industrial lean amine reclamation using fixed-bed: Parametric study coupled with foaming // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2020. V. 94. P. 102907. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102907>
39. *Pal P., Edathil A.A., Banat F.* Calcium alginate gel and hard beads for the removal of total organic acid anions and heavy metal ions from industrial lean methyldiethanolamine solvent // *Polym. Bull.* 2019. V. 76. № 1. 103–118. <https://doi.org/10.1007/s00289-018-2376-0>
40. *Pal P., Shittu I., Othman I., Sengupta A., Voleti L.D., Banat F.* Removal of the total organic acid anions from an industrial lean diglycolamine solvent using a calcium alginate carbon adsorbent, and molecular modeling studies // *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 2020. V. 82. P. 103516. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103516>
41. *Edathil A.A., Alhseinat E., Banat F.* Removal of heat stable salts from industrial lean methyldiethanolamine using magnetic alginate/iron oxide hydrogel composite // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2019. V. 83. P. 17–127. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.02.005>
42. *Durrani M., Abu Haija M., Vengatesan M.R., Zain J., Alhseinat E., Banat F.* Removal of heat stable salts from aqueous MDEA solution via electrosorption using carbon-based electrodes // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2019. V. 85. P. 166–73. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.02.019>
43. *Arora N., Banat F., Alhseinat E.* Capacitive deionization performance of CNTs–Si–Ag based electrodes for the removal of heat stable salts from methyldiethanolamine (MDEA) solution in natural gas sweetening units // *Chem. Eng. J.* 2019. V. 356. P. 400–412. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.054>
44. *Lim J., Scholes C.A., Dumée L.F., Kentish S.E.* Nanofiltration for the concentration of heat stable salts prior to MEA reclamation // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2014. V. 30. P. 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.08.020>
45. *Ghorbani A., Bayati B., Poerio T., Argurio P., Kikhavani T., Namdari M., Ferreira L.M.* Application of NF polymeric membranes for removal of multicomponent Heat-Stable Salts (HSS) ions from Methyl Diethanolamine (MDEA) solutions // *Molecules.* 2020. V. 25. P. 4911. <https://doi.org/10.3390/molecules25214911>
46. *Kikhavani T., Mehdizadeh H., Van der Bruggen B., Bayati B.* Removal of heat-stable salts from lean amine of a gas refinery via electrodialysis // *Chem. Eng. Technol.* 2021. V. 44. № 2. P. 318–328. <https://doi.org/10.1002/ceat.202000375>
47. *Wang Y., Li W., Yan H., Xu T.* Removal of heat stable salts (HSS) from spent alkanolamine wastewater using electrodialysis // *J. Ind. Eng. Chem.* 2018. V. 57. P. 356–362. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.08.043>
48. *Chen F., Chi Y., Zhang M., Yang K., Fu C.* Removal of heat stable salts from N-methyldiethanolamine wastewater using electrodialysis: a pilot-scale study //

- Separation and Purification Technology. 2002. V. 242. P. 116777. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25935>
49. *Lim J., Aguiar A., Scholes C.A., Dumée L.F., Stevens G.W., Kentish S.E.* Monoethanolamine reclamation using electrodialysis // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2014. V. 53. № 49. P. 19313–19321. <https://doi.org/10.1021/ie503506b>
50. *Lim J., Aguiar A., Reynolds A., Pearson P., Kentish S.E., Meuleman E.* Remediation of monoethanolamine after exposure to brown coal flue gases // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2015. V. 42. P. 545–553. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.09.004>
51. *Volkov A., Vasilevsky V., Bazhenov S., Volkov V., Rieder A., Unterberger S., Schallert B.* Reclaiming of monoethanolamine (MEA) used in post-combustion CO₂-capture with electrodialysis // *Energy Procedia.* 2014. V. 51. P. 148–153. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.016>
52. *Bazhenov S., Rieder A., Schallert B., Vasilevsky V., Unterberger S., Grushevenko E., Volkov V., Volkov A.* Reclaiming of degraded MEA solutions by electrodialysis: Results of ED pilot campaign at post-combustion CO₂ capture pilot plant // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2015. V. 42. P. 593–601. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.09.015>
53. *Grushevenko E., Bazhenov S., Vasilevsky V., Novitsky E., Shalygin M., Volkov A.* Effect of carbon dioxide loading on removal of heat stable salts from amine solvent by electrodialysis // *Membranes.* 2019. V. 9. № 11. P. 152. <https://doi.org/10.3390/membranes9110152>
54. *Grushevenko E.A., Bazhenov S.D., Vasilevskii V.P., Novitskii E.G., Volkov A.V.* Two-Step Electrodialysis treatment of monoethanolamine to remove heat stable salts // *Russ. J. Appl. Chem.* 2018. V.91. P. 602–610. <https://doi.org/10.1134/S1070427218040110>
55. *Akkarachalanont P., Saiwan C., Supap T., Idem R., Tontiwachwuthikul P.* New reactive extraction based reclaiming technique for amines used in carbon dioxide capture process from industrial flue gases // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2016. V. 55. № 17. P. 5006–5018. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6b00035>
56. *Karnwiboon K., Krajangpit W., Supap T., Muchan P., Saiwan C., Idem R., Koiwanit J.* Solvent extraction based reclaiming technique for the removal of heat stable salts (HSS) and neutral degradation products from amines used during the capture of carbon dioxide (CO₂) from industrial flue gases // *Sep. Purif. Technol.* 2019. V. 228. P. 115744. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115744>
57. *Apel P.Y., Bobreshova O.V., Volkov A.V., Volkov V.V., Nikonenko V.V., Stenina I.A., Filippov A.N., Yampolskii Y.P., Yaroslavtsev A.B.* Prospects of membrane science development // *Membr. Membr. Technol.* 2019. V. 12. № 1. P. 45–63. <https://doi.org/10.1134/S2517751619020021>
58. Russian Membrane Society // Мембраны и Мембранные Технологии в России и СНГ. <http://memtech.ru/index.php/ru/glavnaya/terms/k> (accessed March 13, 2022)
59. *Baker R.W.* Membrane Technology and Applications. New York: John Wiley & Sons, Ltd. 2012. 574 p. <https://doi.org/10.1002/9781118359686>
60. *Kim S., Scholes C.A., Heath D.E., Kentish S.E.* Gas-liquid membrane contactors for carbon dioxide separation: A review // *Chem. Eng. J.* 2021. V. 411. P. 128468. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128468>
61. *Zhao S., Feron P.H.M., Deng L., Favre E., Chabanon E., Yan S., Hou J., Chen V., Qi H.* Status and progress of membrane contactors in post-combustion carbon capture: A state-of-the-art review of new developments // *J. Memb. Sci.* 2016. V. 511. P. 180–206. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.03.051>
62. *Chuah C.Y., Kim K., Lee J., Koh D.Y., Bae T.H.* CO₂ absorption using membrane contactors: recent progress and future perspective // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2020. V. 59. № 15. P. 6773–6794. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b05439>
63. *Kishi M., Nagatsuka K., Toda T.* Effect of membrane hydrophobicity and thickness on energy-efficient dissolved oxygen removal from algal culture // *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2020. V. 8. Article 978. P. 1–10. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00978>
64. *Tan X., Capar G., Li K.* Analysis of dissolved oxygen removal in hollow fibre membrane modules: Effect of water vapour // *J. Memb. Sci.* 2005. V. 251. № 1–2. P. 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2004.11.005>
65. *Lee J., Baek S.M., Boo C., Son A., Jung H., Park S.S., Hong S.W.* Water deoxygenation using a hollow fiber membrane contactor to prevent pipe corrosion for sustainable management of district heating systems: A pilot-scale study // *J. Clean. Prod.* 2020. V. 277. P. 124049. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124049>
66. *Yang M.C., Cussler E.L.* Designing hollow-fiber contactors // *AIChE J.* 1986. V. 32. P. 910–1916. <https://doi.org/10.1002/AIC.690321117>
67. *Yang M.C., Cussler E.L.* Artificial gills // *J. Memb. Sci.* 1989. V. 42. P. 273–284. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(00\)82381-9](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(00)82381-9)
68. *Wickramasinghe S.R., Semmens M.J., Cussler E.L.* Better hollow fiber contactors // *J. Memb. Sci.* 1991. V. 62. P. 371–388. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(91\)80048-B](https://doi.org/10.1016/0376-7388(91)80048-B)
69. *Tai M.S.L., Chua I., Li K., Ng W.J., Teo W.K.* Removal of dissolved oxygen in ultrapure water production using microporous membrane modules // *J. Memb. Sci.* 1994. V. 87. P. 99–105. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(93\)E0086-S](https://doi.org/10.1016/0376-7388(93)E0086-S)

70. *Yagi Y., Imaoka T., Kasama Y., Ohmi T.* Advanced ultrapure water systems with low dissolved oxygen for native oxide free wafer processing // *IEEE Trans. Semicond. Manuf.* 1992. V. 5. P. 121–127. <https://doi.org/10.1109/66.136273>
71. *Sengupta A., Peterson P.A., Miller B.D., Schneider J., Fulk C.W.* Large-scale application of membrane contactors for gas transfer from or to ultrapure water // *Sep. Purif. Technol.* 1998. V. 14. № 1–3. P.189–200. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(98\)00074-4](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(98)00074-4)
72. *Leiknes T.O., Semmens M.J.* Vacuum degassing using microporous hollow fiber membranes // *Sep. Purif. Technol.* 2001. V. 22. P. 287–294. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(00\)00151-9](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(00)00151-9)
73. *Peng Z.G., Lee S.H., Zhou T., Shieh J.J., Chung T.S.* A study on pilot-scale degassing by polypropylene (PP) hollow fiber membrane contactors // *Desalination.* 2008. V. 234. № 1–3. P. 316–322. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.09.100>
74. *Ito A., Yamagiwa K., Tamura M., Furusawa M.* Removal of dissolved oxygen using non-porous hollow-fiber membranes // *J. Memb. Sci.* 1998. V. 145. № 1. P. 111–117. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(98\)00068-4](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(98)00068-4)
75. *Shao J., Liu H., He Y.* Boiler feed water deoxygenation using hollow fiber membrane contactor // *Desalination.* 2008. V. 234. № 1–3. P. 370–377. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.09.106>
76. *Kattan O., Ebbers K., Koolaard A., Vos H., Bargeman G.* Membrane contactors: An alternative for de-aeration of salt solutions // *Sep. Purif. Technol.* 2018. V. 205. P. 231–240. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.05.038>
77. *Vladislavljević G.T.* Use of polysulfone hollow fibers for bubbleless membrane oxygenation/deoxygenation of water // *Sep. Purif. Technol.* 1999. V. 17. № 1. P. 1–10. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(99\)00012-X](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(99)00012-X)
78. *Martić I., Maslarević A., Mladenović S., Lukić U., Budimir S.* Water deoxygenation using hollow fiber membrane module with nitrogen as inert gas // *Desalin. Water Treat.* 2015. V. 54. № 6. P. 1563–1567. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.888677>
79. *Sinha V., Li K.* Alternative methods for dissolved oxygen removal from water: A comparative study // *Desalination.* 2000. V. 127. № 2. P. 155–164. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(99\)00200-3](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00200-3)
80. *Bhaumik D., Majumdar S., Fan Q., Sirkar K.K.* Hollow fiber membrane degassing in ultrapure water and microbiocontamination // *J. Memb. Sci.* 2004. V. 235. № 1–2. P. 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2003.12.022>
81. *Liu L., Ding Z., Chang L., Ma R., Yang Z.* Ultrasonic enhancement of membrane-based deoxygenation and simultaneous influence on polymeric hollow fiber membrane // *Sep. Purif. Technol.* 2007. V. 56. № 2. P. 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.01.023>
82. *Li T., Yu P., Luo Y.* Deoxygenation performance of polydimethylsiloxane mixed-matrix membranes for dissolved oxygen removal from water // *J. Appl. Polym. Sci.* 2015. V. 132. № 4. Article 41350. P. 1–9. <https://doi.org/10.1002/app.41350>
83. *Su J., Wei Y.* Novel tri-bore PVDF hollow fiber membranes for the control of dissolved oxygen in aquaculture water // *J. Water Process Eng.* 2019. V. 30. P. 100584. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.02.019>
84. *Mao L., Wang F., Su J.* Development of robust tri-bore hollow fiber membranes for the control of dissolved oxygen in water // *SF J. Mater. Chem Eng.* 2018. V. 1. P. 1002
85. *Kong Q.R., Zhang Y.Z., Tian H., Fang L.F., Zhou M.Y., Zhu L.P., Zhu B.K.* Mass transfer enhancement of hollow fiber membrane deoxygenation by Dean vortices // *J. Zhejiang Univ. Sci. A.* 2019. V. 20. № 8. P. 601–613. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1900181>
86. *Volkov V.V., Lebedeva V.I., Petrova I.V., Bobyl A.V., Konnikov S.G., Roldughin V.I., van Erkel J., Tereshchenko G.F.* Adlayers of palladium particles and their aggregates on porous polypropylene hollow fiber membranes as hydrogenization contractors/reactors // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2011. V.164. № 1–2. P. 144–155. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.10.008>
87. *van der Vaart R., Lebedeva V.I., Petrova I.V., Plyasova L.M., Rudina N.A., Kochubey D.I., Tereshchenko G.F., Volkov V.V., van Erkel J.* Preparation and characterisation of palladium-loaded polypropylene porous hollow fibre membranes for hydrogenation of dissolved oxygen in water // *J. Memb. Sci.* 2007. V. 299. № 1–2. P. 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.04.026>
88. *Buvik V., Bernhardsen I.M., Figueiredo R.V., Vevelstad S.J., Goetheer E., van Os P., Knuutila H.K.* Measurement and prediction of oxygen solubility in post-combustion CO₂ capture solvents // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2021. V. 104. P. 103205. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2020.103205>
89. *Monteiro J., Figueiredo R.V., Bakker D., Stellwag I., Huizinga A., Abu Zahra M., van Os P., Goetheer E.* De-oxygenation as countermeasure for the reduction of oxidative degradation of CO₂ capture solvents // *SSRN Electron. J.* 2020. P. 21–26. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3366028>
90. *Figueiredo R.V., Srivastava T., Skaar T., Warning N., Gravesteijn P., van Os P., Ansaloni L., Deng L., Knu-*

- utila H., Monteiro J., Goetheer E.* Impact of dissolved oxygen removal on solvent degradation for post-combustion CO₂ capture // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2021. V. 112. P. 103493. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2021.103493>
91. *Huizinga A., Goetheer E., Monteiro J., Khakharia P., Mohana M.* Method and apparatus for deoxygenation of liquids // Patent US № 2021/0008465 A1, 2021.
92. *Bazhenov S.D., Bilyukevich A.V., Volkov A.V.* Gas-liquid hollow fiber membrane contactors for different applications // *Fibers.* 2018. V. 6. № 4. Article 76. P. 1–41. <https://doi.org/10.3390/fib6040076>
93. *Wang R., Li D.F., Zhou C., Liu M., Liang D.T.* Impact of DEA solutions with and without CO₂ loading on porous polypropylene membranes intended for use as contactors // *J. Memb. Sci.* 2004. V. 229. № 1–2. P. 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2003.10.022>
94. *Franco J.A., Kentish S.E., Perera J.M., Stevens G.W.* Poly(tetrafluoroethylene) sputtered polypropylene membranes for carbon dioxide separation in membrane gas absorption // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2011. V. 50. № 7. P. 4011–4020. <https://doi.org/10.1021/ie102019u>
95. *Bottino A., Comite A., Costa C., Di Felice R., Varosio E.* Wetting of polypropylene membranes by aqueous solutions in CO₂ absorbing devices // *Sep. Sci. Technol.* 2015. V. 50. № 12. P. 1860–1869. <https://doi.org/10.1080/01496395.2014.996654>
96. *Xu Y., Malde C., Wang R.* Correlating physicochemical properties of commercial membranes with CO₂ absorption performance in gas-liquid membrane contactor // *J. Membr. Sci. Res.* 2020. V. 6. № 1. P. 30–9. <https://doi.org/10.22079/JMSR.2019.107096.1262>
97. *Lv Y., Yu X., Tu S.T., Yan J., Dahlquist E.* Wetting of polypropylene hollow fiber membrane contactors // *J. Memb. Sci.* 2010. V. 362. № 1–2. P. 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.06.067>
98. *Scholes C.A., Kentish S.E., Stevens G.W., deMontigny D.* Comparison of thin film composite and microporous membrane contactors for CO₂ absorption into monoethanolamine // *Int. J. Greenh. Gas Control.* 2015. V. 42. P. 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.07.032>
99. *Chabanon E., Roizard D., Favre E.* Membrane contactors for postcombustion carbon dioxide capture: A comparative study of wetting resistance on long time scales // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2011. V. 50. № 13. P. 8237–8244. <https://doi.org/10.1021/ie200704h>
100. *Ibrahim M.H., El-Naas M.H., Zhang Z., Van Der Bruggen B.* CO₂ capture using hollow fiber membranes: a review of membrane wetting // *Energy and Fuels.* 2018. V. 32. № 2. P. 963–978. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03493>
101. *Franco J.A., deMontigny D., Kentish S.E., Perera J.M., Stevens G.W.* Effect of amine degradation products on the membrane gas absorption process // *Chem. Eng. Sci.* 2009. V. 64. № 18. P. 4016–4023. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2009.06.012>
102. *Scholes C.A., Qader A., Stevens G.W., Kentish S.E.* Membrane Gas-solvent contactor pilot plant trials of CO₂ absorption from flue gas // *Separation Science and Technology.* 2014. V. 49. № 16. P. 2449–2458. <https://doi.org/10.1080/01496395.2014.937499>
103. *Scholes C.A., Simioni M., Qader A., Stevens G.W., Kentish S.E.* Membrane gas-solvent contactor trials of CO₂ absorption from syngas // *Chem. Eng. J.* 2012. V. 195. P. 188–197. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2012.04.034>