https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-3(23)-95

МРНТИ: 61.13.01; 61.13.21; 29.27.51

У.Е. Жантикеев*, Д.Т. Ыбырайымкул, Н.Б. Абильшаиков, М. Алипулы, К.С. Бексейтова
Satbayev University,
050043, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22
*e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com

РЕАКТОРЫ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ В ПРОЦЕССАХ ОЧИСТКИ ВОДЫ: КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ, МЕХАНИЗМЫ ДЕЙСТВИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Аннотация: *В статье представлен нарративный обзор основных типов реакторов холодной нетепловой плазмы, применяемых в процессах очистки воды. Рассмотрены физико-химические основы плазменной обработки воды, включая механизмы образования реактивных форм кислорода и азота (РФКА) и роль межфазного переноса. Проанализированы диэлектрические барьерные разрядные реакторы, коронные и импульсные разрядные системы, реакторы со скользящей дугой, атмосферные плазменные струи, жидкофазные и пузырьковые реакторы, а также гибридные плазменно-каталитические аппараты. Показано, что результат плазменной очистки определяется зоной формирования разряда, площадью межфазного контакта газ–жидкость, гидродинамикой потока, временем пребывания воды в плазмоактивной зоне и удельными энергозатратами. Обсуждается влияние матрицы воды на эффективность обработки. На основе сравнительного анализа трёх таблиц показано, что универсального реактора для всех задач водоочистки не существует: каждый тип аппарата имеет собственную область рационального применения. Гибридные плазменно-каталитические системы представляют наибольший практический интерес для повышения степени минерализации загрязнителей и снижения энергозатрат. Сделан вывод, что приоритетом дальнейших исследований должно стать создание масштабируемых реакторов с контролируемым газожидкостным массообменом и минимальным образованием побочных продуктов.*

Ключевые слова: *холодная плазма, плазменный реактор, химическая технология, процессы и аппараты, очистка воды, диэлектрический барьерный разряд, коронный разряд, газожидкостная обработка.*

1. Введение

Очистка воды от устойчивых органических загрязнителей остаётся одной из наиболее сложных задач современной химической технологии и экологической инженерии. В водных средах всё чаще обнаруживаются соединения, которые плохо удаляются традиционными методами: синтетические красители, фенольные соединения, нефтепродукты, фармацевтические вещества, антибиотики, пестициды, поверхностно-активные вещества и продукты их трансформации. Дополнительную проблему создают микробиологические загрязнители, поскольку для их инактивации требуется снижение общей органической нагрузки и эффективное разрушение клеточных структур или вирусных частиц. В таких условиях классические методы очистки – коагуляция, сорбция, мембранное разделение, биологическая очистка и химическое окисление – не всегда обеспечивают достаточную глубину удаления загрязнителей или требуют дополнительных стадий обработки.

Ограничения традиционных технологий особенно заметны при работе с микрополлютантами, присутствующими в низких концентрациях. Биологические методы малоэффективны для трудноразлагаемых соединений, сорбционные процессы переводят загрязнитель в твёрдую фазу, но не разрушают его, а мембранные технологии порождают вопросы концентрата и загрязнения мембран. Именно поэтому в последние годы усилилось внимание к процессам продвинутого окисления, основанным на генерации высокореакционноспособных частиц в зоне обработки. Холодная нетепловая плазма занимает среди них особое место, поскольку позволяет получать активные формы кислорода и азота без нагрева всего объёма жидкости до высоких температур [1, 2].

Число публикаций по плазменной водоочистке в базах Scopus и Web of Science стабильно растёт начиная с середины 2000-х годов – это фиксируется в нескольких крупных обзорах последнего десятилетия [3, 4]. Тем не менее прямое сравнение результатов остаётся

©У.Е. Жантикеев, Д.Т. Ыбырайымкул, Н.Б. Абильшаиков, М. Алипулы, К.С. Бексейтова, 2026

затруднённым из-за различий в конструкции реакторов, условиях обработки и методах расчёта энергоэффективности. Именно поэтому обзор конструктивных особенностей реакторов и механизмов их действия представляет самостоятельную аналитическую ценность [5, 6].

С позиции химической технологии холодная плазма интересна не только как источник активных окислителей, но и как основа для реакторных систем нового класса. Один и тот же загрязнитель разлагается с разной скоростью в зависимости от типа аппарата: диэлектрический барьерный разряд, коронный разряд, импульсная плазма, плазменная струя, скользящая дуга или пузырьковый реактор дают принципиально разные условия массопереноса и плазмохимии.

Для прикладной водоочистки принципиально важны не только показатели удаления загрязнителя, но и стабильность разряда, равномерность обработки потока, устойчивость электродов, удельные энергозатраты, образование промежуточных продуктов и возможность масштабирования. Эти вопросы остаются недостаточно освещёнными в большинстве экспериментальных работ.

Целью настоящей статьи является обзор и сравнительный анализ основных типов реакторов холодной плазмы, применяемых в процессах очистки воды, с акцентом на их конструктивные особенности, механизмы действия, технологические преимущества и ограничения. Настоящий обзор охватывает публикации за период 2006-2025 гг.

2. Методология обзора

Настоящая работа выполнена в формате нарративного обзорного исследования. Поиск литературы проводился в базах данных Scopus, Web of Science и Google Scholar с использованием следующих ключевых слов и их сочетаний: «cold plasma water treatment», «non-thermal plasma reactor», «dielectric barrier discharge», «corona discharge wastewater», «gliding arc plasma», «plasma jet water», «bubble plasma reactor», «plasma-catalytic hybrid», «reactive oxygen and nitrogen species», «plasma water treatment scale-up». Временной диапазон поиска: 2006–2025 годы.

Критерии включения публикаций: экспериментальные и обзорные работы, посвящённые плазменным реакторам для очистки воды; работы, содержащие описание конструкции реактора, типа разряда и условий газожидкостного контакта; статьи в рецензируемых журналах на английском и русском языках. Критерии исключения: работы, рассматривающие исключительно газофазную плазменную обработку без контакта с жидкостью; статьи, не содержащие описания реакторной системы.

При рассмотрении каждого типа реактора учитывались: целевые загрязнители, объём обрабатываемой воды, время воздействия, мощность или энергия разряда, состав газовой фазы, характер газожидкостного контакта и применяемые критерии эффективности. Использован сравнительно-аналитический подход по трём направлениям: конструктивные особенности реакторов; механизмы образования и переноса реактивных форм кислорода и азота (РФКА); технологические ограничения и перспективы масштабирования.

3. Физико-химические основы плазменной обработки воды

Работа реакторов холодной нетепловой плазмы основана на создании электрического разряда в газовой, жидкой или газожидкостной зоне. В отличие от термической плазмы, высокая энергия передаётся прежде всего электронам, тогда как температура основного объёма газа или жидкости остаётся сравнительно низкой. Благодаря этому активные частицы могут образовываться непосредственно в зоне контакта с водой без сильного нагрева всего объёма раствора [1].

На начальном этапе под действием высокого напряжения в межэлектродном промежутке формируются высокоэнергетические электроны. Они сталкиваются с молекулами воды, кислорода, азота и водяного пара, вызывая их возбуждение, ионизацию и диссоциацию. В результате образуются реактивные формы кислорода и азота, среди которых наиболее важными для водоочистки являются гидроксильные радикалы (•OH), атомарный кислород (O•), озон (O_3), перекись водорода (H_2O_2), супероксидные радикалы ($O_2^{\bullet -}$), оксиды азота, нитриты и нитраты. Эти частицы различаются временем жизни и реакционной способностью: короткоживущие радикалы действуют преимущественно вблизи зоны разряда, тогда как более устойчивые молекулярные окислители (O_3, H_2O_2) могут переноситься в жидкую фазу [7, 8].

Основные реакции образования активных форм:

$$e^- + H_2O \rightarrow {\bullet}OH + H{\bullet} + e^- \quad (1)$$
$$e^- + O_2 \rightarrow 2O{\bullet} + e^- \quad (2)$$
$$O{\bullet} + O_2 + M \rightarrow O_3 + M \quad (3)$$
$${\bullet}OH + {\bullet}OH \rightarrow H_2O_2 \quad (4)$$
$$e^- + N_2 \rightarrow 2N{\bullet} + e^- \quad (5)$$
$$N{\bullet} + O_2 \rightarrow NO + O{\bullet} \quad (6)$$
$$NO + O{\bullet} \rightarrow NO_2 \quad (7)$$

Ключевую роль в плазменно-жидкостных системах играет межфазная поверхность газ–жидкость. Во многих реакторах плазма формируется над поверхностью воды, в тонком газовом промежутке или внутри пузырьков, поэтому именно граница раздела фаз является основной зоной переноса активных частиц (рис. 1). Радикалы •OH воздействуют на загрязнители вблизи поверхности жидкости или в тонкой водной плёнке; долгоживущие формы (O_3, H_2O_2, NO_2^-, NO_3^-) проникают глубже в объём раствора [7].

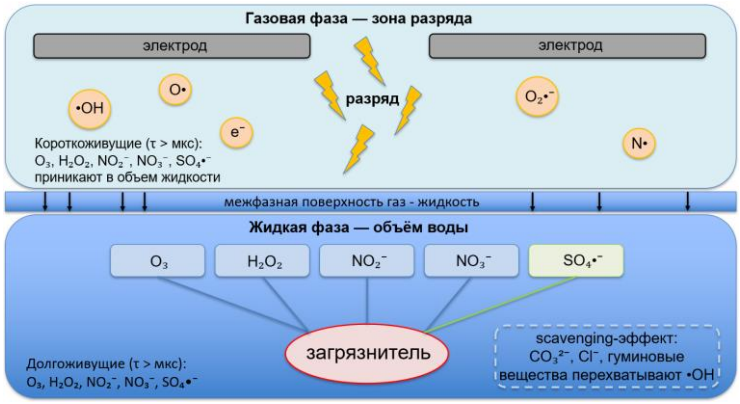


Рисунок 1 – Схема межфазного переноса реактивных форм кислорода и азота (РФКА) на границе газ–жидкость в плазменных реакторах

Существенное значение имеет состав водной матрицы. Карбонаты, гидрокарбонаты, хлориды и гуминовые вещества вызывают так называемый scavenging-эффект: карбонат-ионы реагируют с •OH, снижая его концентрацию, тогда как хлориды при плазменной обработке могут давать хлорированные промежуточные продукты. Это означает, что данные, полученные на дистиллированной воде с модельным красителем, могут существенно расходиться с результатами на реальных сточных водах [9, 10].

С аппаратурной точки зрения геометрия реактора определяет эффективность не меньше, чем тип разряда. Именно поэтому в современных системах используют тонкие слои жидкости, падающие плёнки, распыление, барботаж и пузырьковые режимы – всё это направлено на увеличение межфазной поверхности и улучшение массообмена. Плазменная очистка воды – это комплексный газожидкостный реакторный процесс, в котором плазмохимия, гидродинамика и массоперенос действуют совместно [1].

4. Типы реакторов холодной плазмы и их конструктивные особенности

На рисунке 2 представлены принципиальные схемы шести основных типов реакторов холодной плазмы, применяемых для очистки воды. Сравнение схем показывает принципиальное различие в положении зоны генерации разряда относительно водной фазы. В реакторах типа а, б и е плазма формируется в газовой фазе над водой, в реакторе типа д – непосредственно в объёме жидкости, тогда как конструкции в и г занимают промежуточное положение, обеспечивая интенсивный газожидкостный контакт через плёнку или поверхность воды. Именно это конструктивное различие определяет состав и концентрацию РФКА, достигающих молекул загрязнителя, и является ключевым критерием при выборе типа реактора для конкретной задачи водоочистки. Детальное рассмотрение каждого типа представлено в подразделах 4.1-4.6.

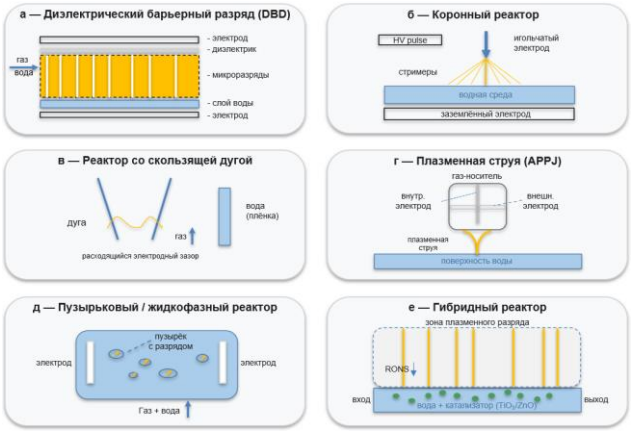


Рисунок 2 – Принципиальные схемы основных типов реакторов холодной плазмы для очистки воды: а – диэлектрический барьерный разряд (DBD); б – коронный реактор; в – реактор со скользящей дугой; г – плазменная струя (APPJ); д – пузырьковый/жидкофазный реактор; е – гибридный плазменно-каталитический реактор

4.1 Диэлектрические барьерные разрядные реакторы (DBD)

Диэлектрический барьерный разряд (рис. 2а) – один из наиболее изученных вариантов генерации холодной нетепловой плазмы для обработки воды. DBD-реакторы работают при атмосферном давлении, не требуют вакуумной системы и обеспечивают достаточно стабильный разряд в газовой или газожидкостной зоне [1, 2]. Принципиальная особенность конструкции – диэлектрический барьер между электродами, который ограничивает ток, предотвращает переход в дуговой режим и способствует формированию множества кратковременных микроплазменных каналов [7, 11].

Типовая схема включает высоковольтный электрод, заземлённый электрод, диэлектрический слой, газовый промежуток и зону контакта с водой. Наиболее распространены четыре конфигурации: DBD над поверхностью воды, реакторы с падающей плёнкой, коаксиальные DBD-системы и аппараты с тонким слоем жидкости [2, 5]. В реакторах с падающей плёнкой жидкость распределяется тонким слоем по поверхности диэлектрика – это увеличивает отношение площади контакта к объёму воды и улучшает перенос O_3, •OH и H_2O_2 в жидкую фазу.

К достоинствам DBD-реакторов относятся: стабильность разряда, совместимость с различными газовыми средами и возможность сочетания с катализаторами и сорбентами [7, 11]. Типичные удельные энергозатраты составляют 1-50 Вт·ч/л [4, 12]. Главное ограничение – плазма формируется в газовой фазе, поэтому при увеличении объёма воды равномерность обработки становится самостоятельной инженерной задачей. Её решение достигается оптимизацией геометрии аппарата, толщины жидкого слоя и режима подачи газа [2, 5].

4.2 Коронные и импульсные разрядные реакторы

Коронные и импульсные реакторы (рис. 2б) создают высокоэнергетические локальные зоны разряда вблизи электродов с малым радиусом кривизны. Наиболее распространены конфигурации «игла-плоскость» и «проволока–цилиндр», где сильное электрическое поле концентрируется у острия электрода. При подаче высоковольтных импульсов в межэлектродном промежутке возникают стримерные каналы, генерирующие радикалы, озон и другие реакционноспособные частицы [3, 7].

Амплитуда напряжения, длительность импульса, частота повторения, полярность и расстояние между электродами – все эти параметры критически влияют на состав RONS и эффективность обработки. Образование долгоживущих частиц (H_2O_2, N O_2^-, NO_3^-) в газофазных импульсно-коронных системах над поверхностью воды в значительной мере определяется условиями переноса через границу газ-жидкость [13].

Ключевое достоинство импульсных коронных реакторов – высокая плотность энергии в зоне разряда при коротком времени воздействия, что обеспечивает интенсивное образование радикалов и высокую скорость окисления. Вместе с тем их практическое применение осложняется чувствительностью к электрическим параметрам, риском эрозии электродов и локальностью активной зоны при обработке больших объёмов воды – для последнего требуется многоточечная электродная система или интенсивная циркуляция [3, 6].

4.3 Реакторы со скользящей дугой (gliding arc)

Реакторы со скользящей дугой (рис. 2в) занимают промежуточное положение между холодной нетепловой плазмой и термически активными плазменными системами. Разряд формируется между двумя расходящимися электродами, вытягивается потоком газа, затем гаснет и снова инициируется в области минимального межэлектродного расстояния. Вода может подаваться в виде тонкой плёнки, аэрозоля или циркулирующей жидкости, контактирующей с плазмоактивированным газом [3, 14].

Высокая реакционная способность плазменного потока и интенсивный газожидкостный контакт делают gliding arc-реакторы целесообразными для обработки газожидкостных потоков, инактивации микроорганизмов и получения плазмоактивированной воды. В данной работе показали, что в скользящей дуге на воздухе образуются значительные концентрации NO в жидкой фазе, что определяет антибактериальный эффект обработки. Ограничения: более высокий локальный нагрев по сравнению с DBD-системами, зависимость стабильности разряда от расхода газа и геометрии электродов, сложность масштабирования на большие объёмы воды [14, 15].

4.4 Плазменные струи и атмосферные jet-реакторы

Плазменные струи формируют разряд внутри газового канала (рис. 2г) и выносят активные частицы потоком рабочего газа (аргон, гелий, воздух, азот или их смеси) к поверхности обрабатываемой жидкости. В отличие от DBD, струя действует локально – активные частицы и фотоны направлены в ограниченную область контакта с водой [16]. Это делает jet-реакторы удобным инструментом для механистических исследований: можно точно варьировать расстояние до жидкости, расход газа, мощность разряда и время экспозиции.

Для атмосферных плазменных струй установлена эффективность как в отношении деградации метиленового синего в водных растворах при атмосферном давлении [17], так и при инактивации бактериальных клеток в водной среде [18]. Принципиальное ограничение при масштабировании – малая площадь воздействия одной струи. Увеличение производительности требует либо многосопловых систем, что существенно усложняет конструкцию реактора и управление разрядом, либо интенсивной циркуляции жидкости. По этой причине jet-реакторы наиболее целесообразны для лабораторных исследований и локальной обработки малых объёмов воды [16, 19].

4.5 Плазма в жидкости и пузырьковые реакторы

Реакторы, в которых плазма формируется в воде, внутри газовых пузырьков или на газожидкостной границе, позволяют приблизить зону генерации РФКА к объёму обрабатываемой жидкости (рис. 2д). Это конструктивно выгодно при работе с растворёнными органическими загрязнителями, для деградации которых радикалы должны не только образоваться, но и достичь молекулы-мишени [1, 2].

В пузырьковых реакторах газ подаётся в жидкость в виде пузырьков, внутри которых инициируется разряд. Чем меньше размер пузырьков и выше их объёмная доля, тем больше площадь межфазного контакта. Для пузырьковых плазменных реакторов установлено, что разряд, формирующийся внутри газового пузырька, развивается по механизму, отличающемуся от поверхностных разрядов, что влияет на состав и перенос РФКА в жидкую фазу [20, 21]. Отдельные исследования также показывают, что микропузырьковые плазменные системы могут обеспечивать более низкие удельные энергозатраты при деградации загрязнителей по сравнению с сопоставимыми DBD-реакторами [22]. Однако диапазон снижения существенно зависит от типа загрязнителя, электропроводности воды и режима газораспределения.

Ограничения жидкофазных и пузырьковых систем: риск электродной эрозии при погружённых электродах, зависимость устойчивости разряда от электропроводности раствора, возможное накопление нитритов и нитратов при работе на воздухе. При переходе к большим объёмам жидкости обеспечение равномерного газораспределения становится отдельной инженерной задачей [21, 23].

4.6 Гибридные плазменно-каталитические реакторы

В гибридных плазменно-каталитических реакторах (рис. 2е) холодная плазма используется совместно с катализаторами, сорбентами или дополнительными окислителями. Плазменный разряд генерирует РФКА, а твёрдая или растворённая добавка усиливает их образование, продлевает действие окислителей либо способствует глубокой минерализации

загрязнителей. Наиболее часто применяются TiO_2, ZnO, активированный уголь, цеолиты, оксиды металлов и персульфат [24, 25].

Положение катализатора в аппарате принципиально влияет на механизм синергии. При размещении в зоне разряда он взаимодействует с короткоживущими радикалами и возбуждёнными частицами; в объёме жидкости основную роль начинают играть долгоживущие окислители (O_3, H_2O_2). Сравнительный анализ TiO_2 и ZnO-содержащих плазменно-каталитических систем показывает, что эффективность катализатора зависит не только от его природы, но и от типа загрязнителя и условий формирования разряда. Это подтверждает отсутствие универсального катализатора, одинаково эффективного для всех задач плазменной водоочистки [26]. Отдельного внимания заслуживает активация персульфата плазмой с образованием $SO_4^{\bullet-}$ с высоким окислительным потенциалом, что открывает путь к деградации стойких соединений, устойчивых к •OH [25].

Практический интерес к гибридным системам обусловлен возможностью повысить степень минерализации загрязнителей и снизить удельные энергозатраты. Ограничения: усложнение конструкции, необходимость регенерации катализатора, деактивация поверхности продуктами реакции при длительной эксплуатации [24].

5. Сравнительный анализ реакторов холодной плазмы

Рассмотренные типы реакторов холодной плазмы отличаются не только способом формирования разряда, но и характером контакта активных частиц с водной фазой. Для химико-технологического анализа важно учитывать, где именно образуется плазма, как РФКА переходят в воду, насколько равномерно обрабатывается объём жидкости и какие энергетические затраты требуются [1, 2]. В таблицах 1-3 представлено обобщение конструктивных особенностей, технологических характеристик и ориентировочных показателей энергоэффективности.

Таблица 1 – Конструктивные особенности основных типов реакторов холодной плазмы для очистки воды

Тип реактора	Зона формирования плазмы	Основные активные частицы	Режим работы
DBD	Газовый промежуток над водой, тонкая жидкая плёнка, коаксиальный зазор	•OH, O_3, H_2O_2, O•, NO_x, NO_2^-, NO_3^-	Непрерывный / периодический
Коронные и импульсные реакторы	Область высокого электрического поля у игольчатых, проволочных или коаксиальных электродов	•OH, O_3, H_2O_2, $O_2^{\bullet-}$, NO_x	Импульсный / периодический
Скользящая дуга	Между расходящимися электродами; разряд вытягивается потоком газа	O_3, •OH, O•, NO_x, H_2O_2	Непрерывный
Плазменные струи (jet)	В газовом канале с выносом плазмы к поверхности воды	•OH, O_3, H_2O_2, $O_2^{\bullet-}$, NO_2^-, NO_3^-	Непрерывный / периодический
Жидкофазные и пузырьковые	В воде, внутри пузырьков газа или на границе газ–жидкость	•OH, H_2O_2, O_3, O•, NO_2^-, NO_3^-	Непрерывный / периодический
Гибридные плазменно-каталитические	Плазменная зона в сочетании с катализатором, сорбентом или окислителем	•OH, $SO_4^{\bullet-}$, O_3, H_2O_2, $O_2^{\bullet-}$	Непрерывный / периодический

Следует отметить, что приведённые в таблице 3 диапазоны степени удаления являются ориентировочными обобщёнными значениями, полученными в различных исследованиях при существенно отличающихся экспериментальных условиях. Они не предназначены для прямого количественного сравнения или ранжирования типов реакторов без учёта природы и исходной концентрации загрязнителя, объёма и состава воды, мощности и режима разряда, времени обработки, рабочего газа и гидродинамических условий. Поэтому таблица отражает характерные диапазоны эффективности, а не результаты, полученные при идентичных условиях.

Таблица 2 – Технологическая оценка реакторов холодной плазмы для очистки воды

Тип реактора	Преимущества	Ограничения	Перспективы масштабирования
DBD	Стабильный разряд, работа при атм. давлении, обработка тонких слоёв воды	Ограниченная глубина воздействия, зависимость от площади контакта газ-жидкость	Коаксиальные и плёночные схемы; проточный режим [5, 11]
Коронные и импульсные	Интенсивное образование активных частиц, высокая скорость окисления	Требуют точного контроля напряжения, возможна эрозия электродов	Многоэлектродные системы с принудительной циркуляцией [3, 7]
Скользящая дуга	Высокая реакционная способность, интенсивный газожидкостный контакт	Более высокие энергозатраты, локальный нагрев, сложность стабилизации дуги	Газожидкостные потоки и распылённые водные системы [14, 15]
Плазменные струи	Мягкий режим обработки, высокая управляемость, локальное воздействие	Небольшая площадь контакта, низкая производительность одной струи	Многосопловые системы или интенсивная циркуляция жидкости [16, 18]
Жидкофазные и пузырьковые	Развитая межфазная поверхность, возможность обработки объёма жидкости	Электродная эрозия, нестабильность разряда, зависимость от электропроводности	Оптимизация размера пузырьков и газораспределения [21, 22]
Гибридные плазменно-каталитические	Повышение минерализации, снижение промежуточных продуктов, уменьшение энергозатрат	Усложнение конструкции, необходимость регенерации катализатора	Наибольший практический интерес для трудноокисляемых микрополлютантов [24, 25]

Таблица 3 – Ориентировочные показатели эффективности реакторов холодной плазмы

Тип реактора	Степень удаления загрязнителя, %	Типичные целевые загрязнители	Ссылки
DBD	70-99	Красители, фармацевтика, фенолы	[5, 12]
Коронные и импульсные	80-99	Красители, антибиотики, фенолы	[3, 13]
Скользящая дуга	60-95	Красители, микроорганизмы, органика	[14, 15]
Плазменные струи	70-99 (малые объёмы)	Красители, бактерии	[17, 18]
Жидкофазные и пузырьковые	75-99	Красители, нефтепродукты, антибиотики	[20, 22, 23]
Гибридные	85-99+	Микрополлютанты, стойкие органические соединения	[24, 25]

Из таблиц 1-3 видно, что универсального реактора холодной плазмы для всех задач водоочистки не существует. DBD-реакторы удобны для стабильной лабораторной и проточной обработки, при этом их удельные энергозатраты существенно зависят от геометрии аппарата и режима обработки. Коронные и импульсные системы обеспечивают интенсивное образование активных частиц, но требуют высокой точности управления. Реакторы со скользящей дугой дают высокую реакционную способность, однако могут сопровождаться более высокими энергозатратами. Пузырьковые и жидкофазные системы обеспечивают развитую межфазную поверхность и подходят для обработки объёма жидкости. Гибридные плазменно-каталитические реакторы рассматриваются как перспективные системы для снижения удельных энергозатрат и повышения глубины окисления, однако величина эффекта зависит от природы загрязнителя, типа катализатора и режима разряда.

6. Технологические ограничения и перспективы масштабирования

Несмотря на высокую эффективность холодной плазмы в лабораторных исследованиях, её переход к прикладным системам очистки воды остаётся сложной инженерной задачей. Главная причина заключается в том, что плазменная обработка является не только химическим, но и аппаратурно-гидродинамическим процессом. При увеличении объёма воды обеспечить одинаковую дозу плазменного воздействия для всего потока значительно труднее. Поэтому результаты, полученные на модельных растворах в малых объёмах, не всегда прямо переносятся на реальные сточные воды или проточные системы [1, 2].

6.1 Неравномерность обработки и межфазный перенос

Во многих реакторах плазма локализована в газовой фазе, над поверхностью воды, внутри пузырьков или вблизи электродов. Если гидродинамика недостаточно продумана, часть потока проходит через аппарат без контакта с плазмоактивной зоной — аналог байпасирования в классических реакторах. При масштабировании это требует детального анализа полей скоростей и времени пребывания жидкости [4].

Гидроксильные радикалы обладают высоким окислительным потенциалом, однако из-за малого времени жизни воздействуют только вблизи межфазной поверхности. Долгоживущие формы (O_3, H_2O_2, нитриты, нитраты) способны распространяться в объёме воды, но их окислительная способность ниже. Увеличение площади контакта газ-жидкость остаётся центральным направлением совершенствования плазменных реакторов [7, 11].

6.2 Электродная эрозия и побочные продукты

Электродная эрозия наиболее серьёзна в жидкофазных и импульсных системах с погружёнными электродами. Продукты износа металлов изменяют состав воды, снижают воспроизводимость результатов и создают требования к материалам. Этот вопрос редко обсуждается в публикациях, сосредоточенных на показателях удаления загрязнителя, хотя имеет принципиальное значение для длительной эксплуатации [2, 7].

При использовании воздуха в качестве рабочего газа в воде накапливаются нитриты и нитраты; при неполной деградации органики образуются промежуточные продукты окисления. Снижение концентрации исходного загрязнителя не всегда отражает глубину его минерализации. Важным аспектом плазменно-жидкостной химии является образование пероксинитрита при взаимодействии H_2O_2 и HNO_2; данное соединение нередко остаётся вне внимания, хотя может играть существенную роль в реакционных процессах, протекающих в обработанной воде [10]. Поэтому объективная оценка процесса требует контроля общего органического углерода, токсичности, pH, электропроводности и концентраций NO_2^-/NO_3^- [6, 11].

6.3 Энергоэффективность и пути развития

Прямое сопоставление энергоэффективности различных плазменных реакторов осложняется тем, что в литературе используются разные показатели и способы нормирования энергозатрат. Наиболее распространены удельные энергозатраты, выраженные в Вт·ч/л или кВт·ч/м³, энергетический выход (например, г/кВт·ч), а также показатели, нормированные на степень снижения концентрации загрязнителя. Эти метрики характеризуют разные стороны процесса и не всегда могут быть корректно пересчитаны друг в друга без исходных данных о мощности, объёме воды, времени обработки и кинетике удаления. Поэтому приведённые в обзоре энергетические значения следует рассматривать как ориентировочные и сопоставлять преимущественно в случаях, когда использованы одинаковые единицы, сходные условия эксперимента и единый способ расчёта.

При переходе к крупным потокам удельные энергозатраты, как правило, возрастают: часть энергии расходуется на нагрев, газофазные реакции и образование побочных продуктов, а не на деградацию целевого загрязнителя. Наращивание мощности разряда без оптимизации конструкции реактора – малоэффективная стратегия. Более действенный путь – увеличение межфазной поверхности, улучшение перемешивания, подбор режима подачи газа и контроль времени пребывания воды в плазмоактивной зоне [2, 4].

На основании проведённого анализа можно выделить пять приоритетных направлений будущих исследований: (1) разработка масштабируемых реакторов с управляемым газожидкостным контактом; (2) изучение scavenging-эффектов в реальных водных матрицах – это одно из наиболее недостаточно исследованных направлений; (3) разработка

долгосрочно устойчивых электродных материалов для жидкофазных систем; (4) комплексная оценка токсичности промежуточных продуктов, включая пероксинитрит и хлорированные соединения; (5) интеграция плазменных процессов с биологической очисткой или мембранными технологиями для создания комбинированных систем. Указанные направления вытекают непосредственно из ограничений, рассмотренных в разделах 4 и 6.

Заключение

На основании проведённого обзора сформулированы следующие выводы.

1. Эффективность плазменной очистки воды определяется совокупностью факторов: химической активностью РФКА, конструкцией реактора, площадью межфазной поверхности, гидродинамикой и временем пребывания жидкости. Аппаратурное оформление – это не техническая деталь, а ключевая переменная, которая разделяет лабораторный эксперимент и работоспособную водоочистную систему.

2. Каждый тип реактора имеет свою область рационального применения: DBD для стабильной проточной обработки тонких слоёв; коронные и импульсные для интенсивного локального окисления; скользящая дуга для газожидкостных потоков; струи для лабораторных механистических исследований; пузырьковые и жидкофазные для обработки значительных объёмов с развитой межфазной поверхностью. Выбор реактора должен начинаться с анализа конкретной технологической задачи, а не с наличия доступного оборудования.

3. Гибридные плазменно-каталитические реакторы представляют наибольший практический интерес для повышения глубины окисления и снижения удельных энергозатрат, особенно при работе с трудноразлагаемыми микрополлютантами. Однако вопросы регенерации катализатора и долгосрочной стабильности систем требуют самостоятельного исследования.

4. Дальнейшее развитие технологии должно быть направлено на масштабируемые реакторы с контролируемым газожидкостным контактом, минимальным образованием побочных продуктов и длительной устойчивой работой. Объективная оценка процесса невозможна без контроля полноты минерализации, токсичности промежуточных продуктов и состава обработанной воды, а не только степени удаления исходного загрязнителя.

Список литературы

1. Plasma-liquid interactions: a review and roadmap / P.J. Bruggeman et al // Plasma Sources Science and Technology. – 2016. – Vol. 25, № 5. – Article No. 053002. – https://doi.org/10.1088/0963-0252/25/5/053002

2. Review on discharge plasma for water treatment: mechanism, reactor geometries, active species and combined processes / H. Zeghioud et al // Journal of Water Process Engineering. – 2020. – Vol. 38, Article № 101664. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101664.

3. Review on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation / B. Jiang et al // Chemical Engineering Journal. – 2014. – Vol. 236. – P. 348-368. https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.090.

4. Nippatlapalli N. Recent progress on application of nonthermal plasma for the degradation of aqueous emerging contaminants: A review on mechanism, reactor strategies, integrated systems and future perspective / N. Nippatlapalli, A. Ganta // Process Safety and Environmental Protection. – 2024. – Vol. 187. – P. 1454-1470. https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.05.009.

5. Iervolino G. Enhanced removal of water pollutants by dielectric barrier discharge non-thermal plasma reactor / G. Iervolino, V. Vaiano, V. Palma // Separation and Purification Technology. – 2019. – Vol. 215. – P. 155-162. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.01.007.

6. A review on non-thermal plasma treatment of water contaminated with antibiotics / M. Magureanu et al // Journal of Hazardous Materials. – 2021. – Vol. 417, Article № 125481. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125481.

7. Electrohydraulic discharge and nonthermal plasma for water treatment / B.R. Locke et al // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2006. – Vol. 45, № 3. – P. 882-905. https://doi.org/10.1021/ie050981u.

8. Vanraes P. Plasma physics of liquids – a focused review / P. Vanraes, A. Bogaerts // Applied Physics Reviews. – 2018. – Vol. 5, № 3, Article № 031103. https://doi.org/10.1063/1.5020511.

9. Panorel I.C. Degradation of humic substances in water by pulsed corona discharge / I.C. Panorel, I. Lamberg, M. Sillanpaa // Chemosphere. – 2013. – Vol. 93. – P. 1539-1545. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.085
10. Aqueous-phase chemistry and bactericidal effects from an air discharge plasma in contact with water: evidence for the formation of peroxynitrite through a pseudo-second-order post-discharge reaction of H_2O_2 and HNO_2 / P. Lukes et al // Plasma Sources Science and Technology. – 2014. – Vol. 23, Article № 015019. https://doi.org/10.1088/0963-0252/23/1/015019.
11. A critical review on ozone and co-species, generation and reaction mechanisms in plasma induced by dielectric barrier discharge technologies for wastewater remediation / E.S.M. Mouele et al // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2021. – Vol. 9, № 5, Article № 105758. https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105758.
12. Degradation and mineralization of methylene blue by dielectric barrier discharge non-thermal plasma reactor / P.M.K. Reddy et al // Chemical Engineering Journal. – 2013. – Vol. 217. – P. 41-47. https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.11.116.
13. Air pulsed-corona discharges for degradation of emerging pharmaceutical pollutants in water and toxicity by-products control / D. Iya-Sou et al // Journal of Water Process Engineering. – 2024. – Vol. 67, Article № 106127. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106127.
14. Gharagozalian M. Water treatment by the AC gliding arc air plasma / M. Gharagozalian, D. Dorranian, M. Ghoranneviss // Journal of Theoretical and Applied Physics. – 2017. – Vol. 11. – P. 171-180. https://doi.org/10.1007/s40094-017-0254-z.
15. Gliding arc discharge used for water activation: the production mechanism of aqueous NO and its role in sterilization / M. Zhu et al // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2022. – Vol. 56, № 3, Article № 035202. https://doi.org/10.1088/1361-6463/aca340.
16. Applications of plasma-liquid systems: A review / F. Rezaei et al // Materials. – 2019. – Vol. 12, № 17, Article № 2751. https://doi.org/10.3390/ma12172751.
17. Chandana L. Atmospheric pressure non-thermal plasma jet for the degradation of methylene blue in aqueous medium / L. Chandana, P. Manoj Kumar Reddy, C. Subrahmanyam // Chemical Engineering Journal. – 2015. – Vol. 282. – P. 116-122. https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.02.027.
18. Non-thermal atmospheric pressure plasma jet for the bacterial inactivation in an aqueous medium / L. Chandana et al // Science of the Total Environment. – 2018. – Vol. 640-641. – P. 493-500. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.342.
19. Plasma jet's shielding gas impact on bacterial inactivation / H. Jablonowski et al // Biointerphases. – 2015. – Vol. 10, № 2, № 029506. https://doi.org/10.1116/1.4916533.
20. Analysis of a pulsed discharge within single bubbles in water under synchronized conditions / K. Tachibana et al // Plasma Sources Science and Technology. – 2011. – Vol. 20, Article № 034005. https://doi.org/10.1088/0963-0252/20/3/034005.
21. Plasma bubbles: a route to sustainable chemistry / J. Hong et al // AAPPS Bulletin. – 2021. – Vol. 31, Article № 26. https://doi.org/10.1007/s43673-021-00027-y.
22. Meropoulis S. Plasma microbubbles vs gas-liquid DBD energized by low-frequency high voltage nanopulses for pollutants degradation in water: destruction mechanisms, composition of plasma-activated water and energy assessment / S. Meropoulis, C.A. Aggelopoulos // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2023. – Vol. 11, № 3, Article № 109855. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109855.
23. A critical review on the application of non-thermal plasma bubbles for oxidation in water treatment / P.J. Angelina Cullen et al // Chemical Engineering Journal. – 2025. – Vol. 505, Article № 159667. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159667.
24. Non-thermal plasma coupled with catalyst for the degradation of water pollutants: A review / M. Russo et al // Catalysts. – 2020. – Vol. 10, № 12, Article № 1438. https://doi.org/10.3390/catal10121438.
25. Persulfate activated by non-thermal plasma for organic pollutants degradation: A review / H. Guo et al // Chemical Engineering Journal. – 2023. – Vol. 470, Article № 144094. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144094.

26. Aggelopoulos C.A. A comprehensive insight on plasma-catalytic degradation of organic pollutants in water: comparison between ZnO and TiO_2 / C.A. Aggelopoulos, O. Dolinski // Chemosphere. – 2024. – Vol. 347, Article № 140667. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140667.

Финансирование. Данное исследование было профинансировано Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (№ BR28712925, «Исследование и создание холоднoплазменных технологий для комплексной реабилитации экосистем»).

Ұ.Е. Жантикеев*, Д.Т. Ыбырайымқұл, Н.Б. Абильшаиков, М. Әліпұлы, Қ.С. Бексейтова
Satbayev University,
050043, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Сәтбаев к-сі, 22
*e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com

СУДЫ ТАЗАРТУ ПРОЦЕСТЕРІНДЕГІ СУЫҚ ПЛАЗМА РЕАКТОРЛАРЫ: ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ, ӘСЕР ЕТУ МЕХАНИЗМДЕРІ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ШЕКТЕУЛЕРІ

Мақалада суды тазарту процестерінде қолданылатын суық термиялық емес плазма реакторларының негізгі түрлеріне нарративтік шолу берілген. Суды плазмалық өңдеудің физика-химиялық негіздері, соның ішінде оттегі мен азоттың реактивті түрлерінің (ОАРТ) түзілу механизмдері және фазааралық тасымалдың рөлі қарастырылған. Диэлектрлік тосқауылды разряд реакторлары, тәждік және импульстік разряд жүйелері, сырғымалы доғалы реакторлар, атмосфералық плазмалық ағындар, сұйықфазалы және көпіршікті реакторлар, сондай-ақ гибридті плазмалық-каталитикалық аппараттар талданған. Плазмалық тазарту нәтижесі разрядтың түзілу аймағына, газ–сұйықтық фазааралық контактісінің ауданына, ағын гидродинамикасына, судың плазма-белсенді аймақта болу уақытына және меншікті энергия шығындарына тәуелді екені көрсетілген. Су матрицасының өңдеу тиімділігіне әсері талқыланған. Үш кестеге негізделген салыстырмалы талдау су тазартудың барлық міндеттері үшін әмбебап реактор жоқ екенін көрсетті: әрбір аппарат түрінің өзіндік ұтымды қолдану саласы бар. Гибридті плазмалық-каталитикалық жүйелер ластағыштардың минералдану дәрежесін арттыру және энергия шығындарын төмендету тұрғысынан ең жоғары практикалық қызығушылық тудырады. Болашақ зерттеулердің басымдығы бақыланатын газ-сұйықтық массаалмасуы бар және жанама өнімдердің түзілуі барынша төмен масштабталатын реакторларды жасау болуы тиіс деген қорытынды жасалды.

Түйін сөздер: *суық плазма, плазмалық реактор, химиялық технология, процестер мен аппараттар, суды тазарту, диэлектрлік тосқауылды разряд, тәждік разряд, газ-сұйықтық өңдеу.*

U.Ye. Zhantikeyev*, D.T. Ybyraymkul, N.B. Abilshaikov, M. Alipuly, K.S. Bexeitova
Satbayev University,
050043, Republic of Kazakhstan, Almaty, Satpayev str., 22
*e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com

COLD PLASMA REACTORS IN WATER TREATMENT PROCESSES: DESIGN FEATURES, MECHANISMS OF ACTION, AND TECHNOLOGICAL LIMITATIONS

This article presents a narrative review of the main types of cold non-thermal plasma reactors used in water treatment processes. The physicochemical fundamentals of plasma-based water treatment are considered, including the mechanisms of formation of reactive oxygen and nitrogen species (RONS) and the role of interfacial transfer. Dielectric barrier discharge reactors, corona and pulsed discharge systems, gliding arc reactors, atmospheric plasma jets, liquid-phase and bubble reactors, as well as hybrid plasma-catalytic devices are analyzed. It is shown that the performance of plasma water treatment is determined by the discharge formation zone, the gas-liquid interfacial contact area, flow hydrodynamics, water residence time in the plasma-active zone, and specific energy consumption. The influence of the water matrix on treatment efficiency is also discussed. Based on a comparative analysis presented in three tables, it is shown that there is no universal reactor suitable for all water treatment tasks: each type of device has its own rational field of application. Hybrid plasma-catalytic systems are of the greatest practical interest for increasing the degree of pollutant mineralization and reducing energy consumption. It is concluded that future research should prioritize the development of scalable reactors with controlled gas-liquid mass transfer and minimal formation of by-products.

Key words: *cold plasma, plasma reactor, chemical technology, processes and equipment, water treatment, dielectric barrier discharge, corona discharge, gas-liquid treatment.*

Сведения об авторах

Улан Ержанулы Жантикеев* – магистр технических наук, старший научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1200-2340.

Дархан Тореханулы Ыбырайымкул – магистр технических наук, старший преподаватель, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: d.ybyraiymkul@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1506-6531.

Нариман Бактыбаевич Абильшаиков – научный сотрудник, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: n.abilshaikov@gmail.com.

Мухтар Алипулы – магистр технических наук, старший научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6265-6238.

Калампыр Сунакбаевна Бексейтова – PhD, старший научный сотрудник лаборатории инженерного профиля, Satbayev University, Алматы, Казахстан; e-mail: kalampyr.bexeitovas@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5510-7660.

Авторлар туралы мәліметтер

Ұлан Ержанұлы Жантикеев* – техника ғылымдарының магистрі, инженерлік бейіндегі зертханасының аға ғылыми қызметкері, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1200-2340.

Дархан Төреханұлы Ыбырайымқұл – техника ғылымдарының магистрі, аға оқытушы, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: d.ybyraiymkul@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1506-6531.

Нариман Бактыбаевич Абильшаиков – ғылыми қызметкер, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: n.abilshaikov@gmail.com.

Мұхтар Әліпұлы – техника ғылымдарының магистрі, инженерлік бейіндегі зертханасының аға ғылыми қызметкері, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6265-6238.

Қалампыр Сунақбайқызы Бексейтова – PhD, инженерлік бейіндегі зертханасының аға ғылыми қызметкері, Satbayev University, Алматы, Қазақстан; e-mail: kalampyr.bexeitovas@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5510-7660.

Information about the authors

Ulan Yerzhanuly Zhantikeyev* – Master of Technical Sciences, Senior Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: nurlybekov.ulan@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1200-2340.

Darkhan Torekhanuly Ybyraymkul – Master of Technical Sciences, Senior lecturer, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: d.ybyraiymkul@satbayev.university. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1506-6531.

Nariman Baktybayevich Abilshaikov – Researcher, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: n.abilshaikov@gmail.com.

Mukhtar Alipuly – Master of Technical Sciences, Senior Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: mukhtaralipuly@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6265-6238.

Kalampyr Sunakbayevna Bexeitova – PhD, Senior Researcher at the Engineering Profile Laboratory, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: kalampyr.bexeitovas@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5510-7660.

Поступила в редакцию 04.06.2026
Поступила после доработки 14.09.2026
Принята к публикации 16.09.2026