

Очистка влажного воздуха от примесей аммиака УФ-излучением

*М. С. Бочарников, Л. М. Василяк, С. Л. Василяк, С. П. Ветчинин,
В. Я. Печеркин, Ю. Б. Яненко*

Экспериментально исследовано удаление примесей аммиака (100–200 ррт) в потоке влажного воздуха с расходом 30–150 м³/час УФ-излучением амальгамной лампы с ртутным разрядом низкого давления с длиной волны 185 нм и 254 нм. Наличие паров воды необходимо для эффективного удаления примесей УФ-излучением, поскольку при диссоциации молекул воды образуются высокоактивные радикалы ОН и атомарного водорода Н. Наличие капель воды резко снижает эффективность очистки. Рассмотрены основные реакции фотоокисления. Отмечена высокая эффективность удаления молекул аммиака одним фотоном 185 нм.

Ключевые слова: очистка воздуха, аммиак, ультрафиолетовое излучение, ртутная лампа низкого давления.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-4-65-72

Введение

В настоящее время все больше внимания уделяется экологическим проблемам как в глобальных масштабах, так и на муниципальном и бытовом уровне. Одной из наиболее важных задач улучшения качества окружающей среды является очистка воздуха от вредных веществ в малых концентрациях и связанная с этим проблема удаления запахов. Источниками вредных веществ и запахов являются промышленные предприятия, агропромышленный комплекс, мусорные свалки,

предприятий очистки сточных и муниципальных вод. Вредные летучие соединения представляют опасность для здоровья человека. В России качество воздуха нормируется предельно допустимыми концентрациями (ПДК) вредных веществ в атмосферном воздухе населенных пунктов, а также ПДК в рабочих зонах предприятий различных отраслей промышленности. Для аммиака ПДК для атмосферного воздуха составляет 40 мкг/м³, а для сероводорода 8 мкг/см³. Следует отметить, что большинство запахов ощущаются людьми при концентрациях пахнущих веществ в воздухе намного меньших, чем ПДК, которые наносят вред здоровью. Запахи в настоящее время также рассматриваются как фактор загрязнения окружающей среды, который необходимо нормировать и уменьшать. В районах с высокой плотностью населения во многих случаях приходится решать не только задачи очистки воздуха от вредных веществ до уровня ПДК, но и уменьшать уровень запахов для улучшения экологической комфортности условий проживания населения в крупных городах и мегаполисах.

Одним из существенных источников запахов является городская канализация, станции перекачки и очистки сточных и муници-

Бочарников Михаил Сергеевич¹, нач. отдела, к.т.н.

Василяк Леонид Михайлович², гл.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

Василяк Сергей Леонидович¹, старший инженер.

Ветчинин Сергей Петрович², с.н.с., к.ф.-м.н.

Печеркин Владимир Яковлевич², с.н.с., к.ф.-м.н.

Яненко Юрий Борисович¹, гл. конструктор, к.т.н.

¹ Специальное конструкторско-технологическое бюро по электрохимии с опытным заводом.

Россия, 129226, Москва, ул. Сельскохозяйственная, 12.

² Объединенный институт высоких температур РАН.

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 04 августа 2021 г.

© Бочарников М. С., Василяк Л. М., Василяк С. Л., Ветчинин С. П., Печеркин В. Я., Яненко Ю. Б., 2021

пальных вод. Эти сооружения располагаются в городах, и это становится серьезной социальной проблемой. Анализ различных методов удаления запахов показал, что для городской канализации лучше применять физические методы [1], наиболее перспективным из которых является обработка воздушных потоков ультрафиолетовым излучением. Поскольку основными источниками запахов городской канализации являются сероводород и меркаптаны, то и основная технологии очистки воздуха направлены на удаление этих примесей [1–4]. Следует отметить, что все чаще рассматривается концепция многобарьерной очистки воздуха городской канализации с применением различных методов [1, 4]. Еще одним вредным веществом является аммиак, который выбрасывается в атмосферу из канализации и свалок. Аммиак также образуется в воздухе закрытых объектов с длительным пребыванием людей, например, таких как космические станции, и в этом случае воздух необходимо обрабатывать непосредственно в этих помещениях.

Использование УФ-излучения с длиной волны менее 190 нм для разрушения вредных веществ основано на поглощении молекулами воды и кислородом УФ-фотонов, в результате чего образуются высокоактивные радикалы OH , H , O , $\text{O}(\text{D})$ и др., которые окисляют молекулы примеси. Кроме радикалов в воздухе образуются озон O_3 , пероксид водорода H_2O_2 и другие активные молекулы. Может иметь место и другой механизм – это непосредственное разрушение молекул примесей при поглощении ими УФ-излучения. Для удаления примесей и запахов из воздуха чаще всего используют ртутные лампы низкого давления с двумя УФ-линиями 185 и 254 нм, так как они в настоящее время являются наиболее экономичными и мощными источниками.

Существующие в настоящее время УФ-установки для дезодорации воздуха работают как с дополнительной адсорбционной или каталитической ступенью, так и без нее [1]. Важным для применений и конструирования оборудования свойством УФ-излучения является относительная простота его транспортировки в реактор. Например, использование ультрафиолетового излучения позволяет избежать одного из основных недостатков электрических разрядов при атмосферном

давлении, это – сложность наработки радикалов во всем объеме реактора, поскольку сложно создать объемный разряд. При этом нет и проблем сравнительно небольшого ресурса электродов в реакторах с электрическим разрядом.

Развитие метода очистки с помощью УФ-излучения сдерживается в основном недостаточными знаниями идущих физико-химических процессов и их кинетики, а также отсутствием корректно измеренных экспериментальных данных, поэтому в различных лабораториях проводят исследования применения ртутных ламп для фотоокисления различных примесей [5–11]. Корректно выполненных экспериментальных работ по фотоокислению примесей крайне мало. Наиболее часто исследуют механизмы образования озона [12] и удаления сероводорода [2, 3, 5] и стирола. Удаление аммиака также является актуальной практической задачей. Фотохимические реакции для аммиака с участием УФ-излучения исследованы мало, в основном, для процессов в верхних слоях атмосферы [13, 14] или для фотокатализа [15], что не позволяет оценить эффективность использования УФ-излучения в новых технологиях.

Целью настоящей работы являлось исследование фотоокисления аммиака УФ-излучением ртутной лампы с двумя линиями в УФ-области 185 и 254 нм.

Методика эксперимента

Структурная схема экспериментальной установки для исследования удаления аммиака из воздушного потока приведена на рисунке. Газообразный аммиак от источника (1) добавлялся к потоку воздуха на входе гибкого воздухопровода (13). Прокачка воздуха через систему очистки осуществлялась вентилятором (14) с регулируемой производительностью 30–450 м³/час, который соединялся через другой гибкий воздухопровод (13) с выходом системы очистки. Длина воздухопроводов (13) составляла по 6 м с каждой стороны, что обеспечивало полное перемешивание аммиака в воздухопроводе на входе установки. Были использованы два различных источника газообразного аммиака. Газообразный аммиак либо подавали от баллона с аммиаком, либо по-

лучали испарением водного раствора жидкого аммиака, налитого в химическую колбу, при нагреве колбы. Температура нагрева опреде-

ляла величину эмиссии аммиака и, соответственно, величину его концентрации в потоке воздуха.

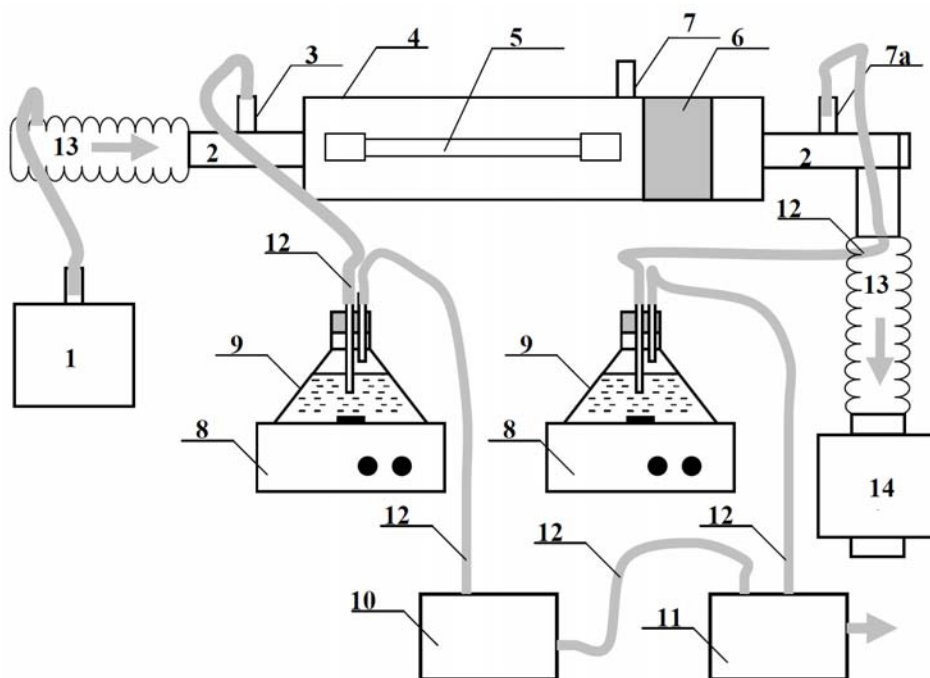


Рисунок. Структурная схема экспериментальной установки: 1 – источник газообразного аммиака; 2 – входной и выходной патрубки; 3 – входной пробоотборник; 4 – цилиндрический корпус УФ-реактора; 5 – УФ-лампа; 6 – гранулированный активированный уголь; 7 – выходной пробоотборник до активированного угля; 7а – выходной пробоотборник после активированного угля; 8 – магнитная мешалка; 9 – стеклянная колба; 10 – «водяные часы»; 11 – аспиратор ПУ-2Э; 12 – соединительные шланги; 13 – гибкие воздухопроводы; 14 – вентилятор.

Поток воздуха с примесью аммиака последовательно проходит через фотореактор (4) и каталитический фильтр (6) из активированного угля. Фотореактор представляет из себя цилиндрический корпус из нержавеющей стали диаметром 20 см, в котором по оси цилиндра вдоль потока очищаемого воздуха расположена амальгамная УФ-лампа (5) с электрическим разрядом в парах ртути низкого давления (две УФ-линии с длинами волн 185 и 354 нм). Такой выбор материала корпуса обеспечивает выполнение требований по токсичности, устойчивости к окислительной деградации материала корпуса фильтра и выделению пахнущих и вредных веществ в фильтре. Диаметр корпуса и расположение лампы выбраны из условия наиболее полного поглощения УФ-излучения с длиной волны 185 нм (длина поглощения УФ-фотонов 185 нм во влажном воздухе равна 10 см) и ми-

нимального падения давления в воздушном потоке в фотореакторе. Электрическая мощность лампы (производство НПО «ЛИТ») составляет 120 Вт, длина лампы – 110 см, внешний диаметр – 19 мм, диаметр цоколей 23 мм. Энергетический КПД лампы генерации УФ-излучения составляет 10 % в линию 185 нм и 30 % в линию 254 нм от электрической мощности. Оболочка лампы выполнена из специального синтетического кварца, который позволяет пропускать коротковолновое УФ-излучение (185 нм и 254 нм) с минимальным поглощением.

После прохождения зоны УФ-облучения воздух попадает в каталитический блок (6) с активированным углем, толщина засыпки которого вдоль потока воздуха составляет 10 см. Гранулы активированного угля имеют вид цилиндров с размерами 2–5 мм. Для уменьшения потерь давления на каталитическом блоке

площадь его поперечного сечения увеличена за счет увеличения диаметра до 40 см. На активированном угле под воздействием УФ-излучения и активных радикалов происходит дополнительное разложение как основных, так и побочных продуктов реакции, образовавшихся под воздействием УФ-излучения, например, озона.

Определение концентрации аммиака в воздухе до фильтра и после него проводилось двумя методами: электронным датчиком аммиака GasBadge Pro и с помощью химического метода Несслера. Датчик GasBadge Pro устанавливался на выходе установки после вентилятора. Показания датчика регистрировались через три минуты после его помещения в поток воздуха. Для измерения концентрации аммиака на входе производилось переключение входного воздухопровода (13) на датчик GasBadge Pro. Наиболее надежными являются химические методы, применяемые в аналитической химии. Химические методы требуют наибольшего времени для измерений, но зато они обладают высокой селективностью, а также пригодны для определения малых примесей путем пропускания больших объемов воздуха через реагенты. Было решено использовать метод Несслера как наиболее общепринятый и распространенный для определения содержания аммиака и аммонийных солей. Он основан на образовании коллоида, окрашенного в красно-бурый цвет, при взаимодействии аммиака или аммонийных солей с реактивом Несслера. Готовый реактив Несслера со степенью чистоты ЧДА был приобретен в магазине химреактивов. Отбор проб проводился пропусканием отбираемого воздуха через колбы (9) с деионизованной водой объемом 1 л, в которой растворялся присутствующий в воздухе аммиак. Выбор довольно большого объема для растворения примесей из пробы обусловлен тем, что для полного растворения аммиака необходимо исходный воздух пропускать в течение времени, достаточного для поглощения аммиака. Это время определяется размером воздушных пузырьков и временем их нахождения в воде. Чем больше объем воды в колбе, тем больший объем воздуха необходимо пропустить, что увеличивает время измерений и увеличивает погрешность. Для более полного растворения аммиака в воде применялась магнитная мешалка (8),

которая размещалась в центре колбы напротив трубки с входящим потоком воздуха. Для прокачки отбираемого воздуха через воду использовался 4-канальный аспиратор ПУ-2Э (11), поэтому можно было одновременно производить отбор из разных точек по потоку воздуха. Отбор проб проводился одновременно на входе (3) и выходе (7) до угольного катализатора или (7а) после угольного катализатора установки. Все соединения осуществлялись силиконовыми шлангами, стойкими к агрессивным средам. Расход воздуха устанавливался 2 л/мин. Время отбора проб составляло от 10 до 30 минут. Для более точного определения общего объема воздуха также использовались «водяные часы» (10). После этого концентрация аммиака в растворе определялась с помощью химического метода Несслера по поглощению линии 425 нм раствором, после взаимодействия аммиака с реактивом Несслера. Поглощение линии 425 нм определялось с помощью фотокolorиметра КФК-3-01. Для проверки точности метода предварительно проводилось измерение на водном растворе аммиака с заранее известной концентрацией. Результаты измерений концентрации аммиака с помощью электронного датчика аммиака GasBadge Pro и с помощью метода Несслера соответствовали друг другу в пределах погрешности измерений.

Экспериментальные результаты и механизм фотоокисления

Испытания установки по удалению аммиака проводились в трех режимах.

Режим 1 – относительная влажность воздуха менее 50 %. Этот режим реализовывался при подогреве колбы с раствором аммиака до 40–45 °С. Расход воздуха через фотореактор 55 м³/час. Измерения концентрации аммиака на входе и выходе проводились электронным газоанализатором аммиака GasBadge Pro через три минуты после его установки в поток воздуха в воздуховоде. Зафиксировано следующее снижение концентрации аммиака: от 103 ppm на входе до 0–2 ppm на выходе; от 145 до 2–4 ppm; от 200 до 18–22 ppm.

Режим 2 – относительная влажность воздуха более 50 % при подогреве колбы с раствором аммиака до 70–75 °С, расход воз-

духа через фотореактор $30 \text{ м}^3/\text{час}$. Концентрация аммиака измерялась двумя методами: с помощью газоанализатора GasBadge Pro через три минуты после его установки в поток воздуха и методом Несслера с временем отбора проб 20 минут. Начальная концентрация 162 ppm, ($121 \text{ мкг}/\text{м}^3$) снижалась до величин 12–18 ppm ($9\text{--}13 \text{ мкг}/\text{м}^3$). При увеличении расхода до $150 \text{ м}^3/\text{час}$ снижение концентрации от 136 ppm ($95 \text{ мкг}/\text{м}^3$) до 70 ppm ($49 \text{ мкг}/\text{м}^3$).

Режим 3 – воздух с влажностью 100 % и с капельками воды. Этот режим реализовывался при подогреве колбы с раствором аммиака при температуре $70\text{--}75 \text{ }^\circ\text{C}$ и дополнительной подачей на вход установки воздуха с капельками воды от увлажнителя «Комфорт». Расход воздуха через фотореактор $55 \text{ м}^3/\text{час}$. Концентрация аммиака измерялась двумя методами: с помощью газоанализатора GasBadge Pro через три минуты после его установки в поток воздуха. Начальная концентрация 22–25 ppm снижалась до величин 15–16 ppm, а при продолжительной работе установки (даже при понижении концентрации аммиака на входе до 12–17 ppm) концентрация аммиака на выходе установки составляла 12–14 ppm.

Эксперименты показали, что при наличии в воздушной смеси капелек воды (режим 3) эффективность удаления аммиака резко уменьшается по сравнению с режимами 1 и 2. Такое влияние капелек воды связано с тем, что аммиак хорошо растворяется в воде, и после прохождения капелек через фотореактор аммиак выделяется в воздух, причем весь поглощенный аммиак перейдет в воздух после испарения капелек воды. Следовательно, если в воздухе находятся водяные капельки, то необходимо использовать дополнительную ступень для удаления этих капелек воды из воздушного потока. Соответственно, и при проектировании промышленных установок для очистки воздуха необходимо на входе устанавливать специальные фильтры для отбивания капелек воды из воздушного потока.

При расходах $30\text{--}55 \text{ м}^3/\text{час}$ зафиксировано удаление аммиака до концентраций ниже ПДК до начальных концентраций 200 ppm, однако при повышении расхода до $150 \text{ м}^3/\text{час}$ концентрация на выходе больше ПДК. Если же сравнивать абсолютные удаляемые значения при расходе $55 \text{ м}^3/\text{час}$ и начальной кон-

центрации 200 ppm, то происходит снижение на 180 ppm, а при расходе $150 \text{ м}^3/\text{час}$ и начальной концентрации 136 ppm снижение на 63 ppm. Если сравнить количество удаленного аммиака, то оно одинаково в этих обоих случаях: $55 \times 180 = 9900$ и $150 \times 63 = 9450$. Из этого сравнения следует вывод, что эти предельные значения удаленного аммиака определяются мощностью излучения с длиной волны 185 нм ртутной лампы.

Рассмотрим кинетический механизм удаления аммиака в фотоокислительных процессах. При этом рассмотрении будем использовать данные о сечениях фотопоглощения и различных реакциях с участием радикалов, которые приведены в работах [2, 3] при рассмотрении кинетики фотоокисления сероводорода. Линия с длиной волны 185 нм эффективно поглощается парами воды и кислородом воздуха на расстояниях около 10 см в зависимости от влажности воздуха. В результате поглощения водой образуются радикалы OH и H, а кислород воздуха диссоциирует с образованием двух радикалов атомарного кислорода: $\text{H}_2\text{O} + h\nu(185 \text{ нм}) \rightarrow \text{OH} + \text{H}$; $\text{O}_2 + h\nu(185 \text{ нм}) \rightarrow \text{O} + \text{O}$. Образовавшиеся радикалы OH, H и синглетный кислород $\text{O}(^1\text{D})$ вступают в ряд цепных реакций [2, 3], в результате которых происходит окисление аммиака и образование других высокоактивных соединений во вторичных реакциях, например, таких как гидропероксильный радикал HO_2 , пероксид водорода H_2O_2 , озон O_3 и другие: $\text{O}(^1\text{D}) + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$; $\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$; $\text{O} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{O}_3 + \text{M}$; $\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} \rightarrow \text{HO}_2 + \text{M}$; $\text{H} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$; $\text{HO}_2 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$; $\text{H}_2\text{O}_2 + h\nu(254 \text{ нм}) \rightarrow \text{OH} + \text{OH}$; $\text{O}_3 + h\nu(254 \text{ нм}) \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}(^1\text{D})$ [2, 3]. Радикалы кислорода также эффективно взаимодействуют с молекулами воды с образованием радикалов OH и пероксида водорода. Образовавшийся озон O_3 , гидропероксильный радикал HO_2 и пероксид водорода хорошо поглощают линию 254 нм с образованием радикалов атомарного кислорода и OH, которые также являются активными окислителями.

Первичное окисление аммиака происходит в реакциях с радикалами OH и синглетного кислорода $\text{O}(^1\text{D})$: $\text{NH}_3 + \text{OH} \rightarrow \text{NH}_2 + \text{H}_2\text{O}$; $\text{NH}_3 + \text{O} \rightarrow \text{NH}_2 + \text{OH}$; $\text{NH}_3 + \text{O} \rightarrow \text{NH} + \text{H}_2\text{O}$. Кроме окисления разрушение молекулы ам-

миака происходит и при поглощении кванта 185 нм: $\text{NH}_3 + h\nu(185 \text{ нм}) \rightarrow \text{NH}_2 + \text{H}$. Сечение фотопоглощения аммиака линии ртути 185 нм при температуре 295 К достаточно велико $4,7 \times 10^{-18} \text{ см}^2$ [13], что существенно больше сечения поглощения молекулы воды $7 \times 10^{-20} \text{ см}^2$. Отметим, что при 100 % относительной влажности воздуха (2,5 % абсолютная влажность) абсорбция паров воды сравнивается с абсорбцией аммиака при концентрации аммиака около 300 ppm. В наших условиях максимальная концентрация аммиака была 200 ppm, следовательно, на начальном этапе достаточно большое количество молекул аммиака было диссоциировано излучением 185 нм. При этом образуется также и радикал атомарного водорода H, который будет участвовать в промежуточных процессах с образованием окислителей OH.

Образовавшиеся радикалы NH_2 и NH вступают в ряд промежуточных реакций как с радикалами окислителями O и OH, так и с кислородом воздуха [14–16], а также с собой: $\text{NH}_2 + \text{NH}_2 + \text{M} \rightarrow \text{N}_2\text{H}_4 + \text{M}$ (образуется гидразин [14]). Для доокисления до свободного азота потребуется еще один или два радикала окислителя или молекул кислорода и озона. В работе [16] приведена схема доокисления радикалами OH и O без учета реакций с кислородом воздуха, озоном и гидропероксильным радикалом HO_2 , так как там рассмотрены реакции при фотокатализе в воде. В случае воздуха следует также рассмотреть реакции с молекулой кислорода O_2 , озоном O_3 и гидропероксильным радикалом HO_2 , например: $\text{NH} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{OH}$; $\text{NH} + \text{HO}_2 \rightarrow \text{HNO} + \text{OH}$; $\text{NH} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{OH}$; $\text{NH}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{HNO} + \text{OH}$; $\text{NH}_2 + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO} + \text{H}_2\text{O}_2$; $\text{NH}_2 + \text{HO}_2 \rightarrow \text{HNO} + \text{H}_2\text{O}$; $\text{HNO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{OH}$. Реакции NH_2 с молекулярным кислородом O_2 , согласно [17], достаточно медленные, и некоторые из них имеют барьер с энергией активации, однако, согласно [17, 18], реакция $\text{NH}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NH}_2\text{O}_2$ идет очень быстро с образованием нового радикала и дальнейших реакций, также идет быстро реакция с озоном $\text{NH}_2 + \text{O}_3 \rightarrow \text{NH}_2\text{O} + \text{O}_2$ [17].

Количество УФ-фотонов с длиной волны 185 нм (энергия около 7 эВ), излучаемых лампой каждую секунду при КПД генерации 10 %, составляет $1,1 \times 10^{19}$ шт/с. Для наиболее

благоприятного случая удаления аммиака при расходе $55 \text{ м}^3/\text{час}$, начальной концентрации 200 ppm, конечной 20 ppm получим количество разрушенных молекул аммиака в каждую секунду $7,4 \times 10^{19}$ шт/с, т. е. каждый поглощенный фотон 185 нм запускает цепочку реакций, приводящих к разрушению 7 молекул аммиака. Отсюда следует, что за счет образования двух начальных радикалов на каждый поглощенный фотон 185 нм еще пять радикалов образуются в цепных процессах, т. е. эффективность фотопроцессов очень велика. Следует отметить, что при прямой фотодиссоциации молекулы аммиака тоже образуют два радикала. Как отмечено выше, новые радикалы OH образуются при доокислении радикалов NH и NH_2 кислородом воздуха, озоном и радикалом HO_2 . Обрыв цепных реакций происходит при образовании гидразина, реакциях радикалов между собой и при образовании молекул воды в продуктах реакций.

Следует также отметить, что остаточный озон O_3 и пероксид H_2O_2 будут реагировать на активированном угле в каталитическом блоке, поэтому концентрации озона и пероксида на выходе из фильтра находились в пределах ПДК. Кроме разложения озона на катализаторе будет происходить дополнительный распад молекул примеси и продуктов реакций.

Заключение

Показано, что удаление примесей аммиака (100–200 ppm) из потока влажного воздуха при расходах 30–150 $\text{м}^3/\text{час}$ УФ-излучением с длиной волны 185 нм и 254 нм от амальгамной лампы низкого давления является высокоэффективным процессом, в котором один поглощенный фотон 185 нм приводит к разрушению до 7 молекул аммиака. Наличие паров воды необходимо для эффективного удаления примесей УФ-излучением, поскольку при диссоциации молекул воды образуются высокоактивные радикалы OH и атомарного водорода H. Большое сечение фотопоглощения аммиака позволяют при концентрациях более 300 ppm использовать прямое фото-разложение аммиака и сопутствующее фото-окисление. Наличие капель воды резко снижает эффективность очистки, так как аммиак хорошо растворяется в воде и после прохож-

дения капелек через фотореактор выделяется в воздух, поэтому в этом случае необходимо использовать дополнительную ступень для удаления капель воды из воздушного потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богомолов М. В., Кармазинов Ф. В., Костюченко С. В. // Водоснабжение и санитарная техника. 2016. № 7. С. 33.
2. Богомолов М. В., Брюков М. Г., Васильев А. И., Василяк Л. М., Касаткин Е. М., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Левченко Д. А., Собур Д. А., Стрельцов С. А. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 2. С. 163.
3. Bryukov M. G., Vasiliev A. I., Vasilyak L. M., Kostyuchenko S. V., Kudryavtsev N. N. // J. Phys. Chem. A. 2020. Vol. 124. № 39. P. 7935. doi.org/10.1021/acs.jpca.0c06552
4. Karageorgos P., Latos M., Kotsifaki C., Lazaridis M., Ralogerakis N. // IWA Publishing. Water Science & Technology – WST. 2010. Vol. 61. № 10. P. 2635.
5. Gilardi L. Investigation on the removal of hydrogen sulfide from an air stream using UV light. Master's Thesis. 2016. Politecnico di Milano. Kungliga Tekniska Hogskolan. Available at: <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/125683/> (accessed July 14, 2021).
6. Zhang X., Sangwan M., Yan C., Koshlyakov P., Chesnokov E., Bedjanian Y., Krasnoperov L. // J. Phys. Chem. A. 2020. Vol. 124. P. 3993.
7. Li R., Palm B. B., Ortega A. M., Hu W., Peng Z., Day D. A., Knotte C., Brune W. H., de Gouw J., Jimenez J. L. // J. Phys. Chem. A. 2015. Vol. 119. P. 4418.
8. Peng Z., Day D. A., Stark H., Li R., Palm B. B., Brune W. H., Jimenez J. L. // Atmos. Meas. Tech. 2015. Vol. 8. P. 4863.
9. Keller A., Burtscher H. A. // J. Aerosol Sci. 2012. Vol. 49. P. 9.
10. Johnson M. S., Nilsson E. J. K., Svensson E. A., Langer S. // Environ. Sci. Technol. 2014. Vol. 48. P. 8768.
11. Hanson D., Abdullahi H., Menheer S., Vences J., Alves M., Kunz J. // Atmos. Chem. Phys. 2019. Vol. 19. P. 8999.
12. Брюков М. Г., Дмитрук А. С., Василяк Л. М., Арутюнов В. С. // Прикладная физика. 2020. № 4. С. 5.
13. Chen F. Z., Judge D. L., Wu C. Y. R., Caldwell J. // Planet. Space Sci. 1999. Vol. 47. P. 261. DOI: 10.1016/S0032-0633(98)00074-9
14. Kuhn W. R., Atreya S. K. // ICARUS. 1979. Vol. 37. P. 207.
15. Ferris J., Nicodem D. // Nature. 1972. Vol. 238. P. 268. <https://doi.org/10.1038/238268a0>
16. Choi Hyung-Joo, Kim Jun-Sik, Kang Misook // Bull. Korean Chem. Soc. 2007. Vol. 28. № 4. P. 581.
17. Hack W., Haubold R., Ohms-Bredemann U., Heinrich-Sterzel C., Keller-Rudek H., Schiöberg D., Strametz C. N Nitrogen: Compounds with Noble Gases and Hydrogen. – Springer Science & Business Media, 2013.
18. Laszlo B., Alfassi Z. B., Neta P., Huie R. E. // J. Phys. Chem. A. 1998. Vol. 102. P. 8498.

PACS: 82.50.-m

Cleaning of humid air from ammonia impurities by UV radiation

M. S. Bocharnikov¹, L. M. Vasilyak², S. L. Vasilyak¹, S. P. Vetchinin², V. Ya. Pecherkin²,
and Yu. B. Yanenko¹

¹ Joint-stock company Special Design Engineering Bureau in Electrochemistry with
Experimental Factory
12 Selskokhozyaystvennaya st., Moscow, 129226, Russia

² Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia
E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

Received August 04, 2021

The removal of ammonia impurities (100–200 ppm) in a humid air flow with a flow rate of 30–150 m³/h by ultraviolet radiation of a low-pressure amalgam lamp with a wavelength of 185 nm and 254 nm was experimentally investigated. The presence of water vapor is necessary for the effective removal of impurities by UV radiation, since highly active OH and atomic hydrogen H radicals are formed during the dissociation of water molecules. The presence of water droplets dramatically reduces the efficiency of cleaning. The main reactions of photooxidation

tion are considered. The high efficiency of removing ammonia molecules by one photon of 185 nm is noted.

Keywords: air cleaning, ammonia, ultraviolet radiation, low-pressure mercury lamp.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-4-65-72

REFERENCES

1. M. V. Bogomolov, F. V. Karmazinov, and S. V. Kostyuchenko, *Water Supply and Sanitary Technique*, No. 7, 33 (2016) [in Russian].
2. M. V. Bogomolov, M. G. Bryukov, A. I. Vasiliev, L. M. Vasilyak, E. M. Kasatkin, S. V. Kostyuchenko, N. N. Kudryavtsev, D. A. Levchenko, D. A. Sobur, and S. A. Streltsov, *Usp. Prikl. Fiz.* **7** (2), 163 (2019).
3. M. G. Bryukov, A. I. Vasiliev, L. M. Vasilyak, S. V. Kostyuchenko, and N. N. Kudryavtsev, *J. Phys. Chem. A.* **124**, 7935 (2020). doi.org/10.1021/acs.jpca.0c06552
4. P. Karageorgos, M. Latos, C. Kotsifaki, M. Lazaridis, and N. Ralogerakis, IWA Publishing. *Water Science & Technology – WST* **61** (10), 2635 (2010).
5. L. Gilardi, *Investigation on the removal of hydrogen sulfide from an air stream using UV light. Master's Thesis.* (2016. Politecnico di Milano. Kungliga Tekniska Hogskolan). Available at: <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/125683/> (accessed July 14, 2021).
6. X. Zhang, M. Sangwan, C. Yan, P. Koshlyakov, E. Chesnokov, Y. Bedjanian, and L. J. Krasnoperov, *Phys. Chem. A* **124**, 3993 (2020).
7. R. Li, B. B. Palm, A. M. Ortega, W. Hu, Z. Peng, D. A. Day, C. Knote, W. H. Brune, J. de Gouw, and J. L. Jimenez, *J. Phys. Chem. A* **119**, 4418 (2015).
8. Z. Peng, D.A. Day, H. Stark, R. Li, B. B. Palm, W. H. Brune, and J. L. Jimenez, *Atmos. Meas. Tech.* **8**, 4863 (2015).
9. A. Keller and H. A. Burtscher, *J. Aerosol Sci.* **49**, 9 (2012).
10. M. S. Johnson, E. J. K. Nilsson, and E. A. Svensson, *Environ. Sci. Technol.* **48**, 8768 (2014).
11. D. Hanson, H. Abdullahi, S. Menheer, J. Vences, M. Alves, and J. Kunz, *Atmos. Chem. Phys.* **19**, 9015 (2019).
12. M. G. Bryukov, A. S. Dmitruk, L. M. Vasilyak, and V. S. Arutyunov, *Applied Physics*, No. 4, 5 (2020) [in Russian].
13. F. Z. Chen, D. L. Judge, C. Y. R. Wu, and J. Caldwell, *Planet. Space Sci.* **47**, 261 (1999). doi: 10.1016/S0032-0633(98)00074-9.
14. W. R. Kuhn and S. K. Atreya, *ICARUS* **37**, 207 (1979).
15. J. Ferris and D. Nicodem, *Nature* **238**, 268 (1972). <https://doi.org/10.1038/238268a0>
16. Hyung-Joo Choi, Jun-Sik Kim, and Misook Kang, *Bull. Korean Chem. Soc.* **28**, 581 (2007).
17. W. Hack, R. Haubold, U. Ohms-Bredemann, C. Heinrich-Sterzel, H. Keller-Rudek, D. Schiöberg, and C. Strametz, *Nitrogen: Compounds with Noble Gases and Hydrogen.* (Springer Science & Business Media, 2013).
18. B. Laszlo, Z. B. Alfassi, P. Neta, and R. E. Huie, *J. Phys. Chem. A.* **102**, 8498 (1998).