

Перспективность технологии плазменно-химической очистки воздуха от формальдегида и муравьиной кислоты в промышленности

© 2024. А. Е. Ефимов¹, аспирант, А. Г. Бубнов², д. х. н., доцент, Г. И. Гусев¹, к. х. н., ст. преподаватель, Г. Д. Овчинников¹, магистрант,
¹Ивановский государственный химико-технологический университет, 153000, Россия, г. Иваново, пр. Шереметевский, д. 7,
²Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 153040, Россия, г. Иваново, пр. Строителей, д. 33,
e-mail: artem.efimov.1995@list.ru

Исследована эффективность плазменно-химической технологии очистки воздуха в сравнении с некоторыми технологиями подавления отходящих газов (адсорбция, катализ) при помощи апробированных подходов выбора систем обезвреживания летучих поллютантов: эколого-экономический, экспертный, иерархической процедуры оценивания и критерия относительной общей пользы. Так, эколого-экономический и экспертный подходы, а также критерий относительной общей пользы позволяют сравнить технологии на основе эксплуатационных затрат (технологический риск, энергоэффективность, надёжность и стоимость производственных фондов). При этом иерархическая процедура оценивания, помимо перечисленных показателей, учитывает эргономику и устойчивость к внешнему воздействию. Показано, что плазменно-химическая технология очистки не является приоритетной при выборе систем обезвреживания отходящих газов от формальдегида, поскольку 3 из 4 подходов указывают на неэффективность рассматриваемой технологии относительно адсорбционного метода. При очистке воздуха от паров муравьиной кислоты плазменно-химическая технология в 2 из 4 случаев является настолько же эффективной, как и адсорбционный метод. Рассмотрена эффективность плазменно-химической, каталитической и адсорбционной технологий с точки зрения методики оценки «углеродного следа», позволяющей количественно исследовать эмиссию «парникового газа» не только на этапе эксплуатации оборудования, а также на стадиях производства, транспортировки и утилизации. Полученные значения показателя «углеродного следа» для низкотемпературной плазмы являются лучшими среди сопоставимых доступных технологий, т. к. суммарное количество выбросов CO₂ при её применении сокращается на 80% (в среднем) за счёт того, что относительные общие затраты энергии ниже.

Ключевые слова: летучие органические соединения, методы очистки, углеродный след.

Technology prospects for plasma-chemical air purification from formaldehyde and formic acid in industry

© 2024. А. Е. Efimov¹ ORCID: 0009-0004-7530-8832, А. G. Bubnov² ORCID: 0000-0002-7201-9339,
G. I. Gusev¹ ORCID: 0000-0002-8528-3403, G. D. Ovchinnikov¹ ORCID: 0000-0002-5522-1834,
¹Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 7, Sheremetevsky avenue, Ivanovo, Russia, 153000,
²Ivanovo Fire and Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, 33, Stroiteley avenue, Ivanovo, Russia, 153040,
e-mail: artem.efimov.1995@list.ru

The effectiveness of plasma-chemical air purification technology was studied in comparison with some technologies for suppressing waste gases (adsorption, catalysis). We use proven approaches (environmental-economic, expert, hierarchical evaluation procedure and the criterion of relative overall benefit) to selecting systems for neutralizing volatile pollutants. Thus, environmental-economic and expert approaches, as well as the criterion of relative overall benefit, make it possible to compare technologies based on operating costs (technological risk, energy efficiency, reliability and cost of production assets). At the same time, the hierarchical evaluation procedure, in addition to the listed indicators, takes into account ergonomics and resistance to external influences. It is shown that plasma-chemical cleaning technology is not a priority when choosing systems for neutralizing waste gases from formaldehyde, since 3 out of 4 approaches indicate the ineffectiveness of this technology relative to the adsorption method. When cleaning air from formic acid vapors, plasma-

chemical technology in 2 out of 4 cases is as effective as the adsorption method. The effectiveness of plasma-chemical, catalytic and adsorption technologies is considered from the point of view of the methodology for assessing the “carbon footprint”, which makes it possible to quantitatively study the emission of “greenhouse gas” not only at the stage of equipment operation, but also at the stages of production, transportation and disposal. However, the obtained carbon footprint values for low-temperature plasma are the best among comparable available technologies, because the total amount of CO₂ emissions when using it is reduced by 80% (on average) due to the fact the relative total energy costs are lower.

Keywords: volatile organic compounds, cleaning methods, carbon footprint.

Среди набора современных технологий очистки воздуха от низких концентраций поллютантов органической природы [1, 2] перспективной является плазменно-химическая технология (ПХТ), благодаря тому, что целевые (менее токсичные относительно удаляемых летучих органических соединений (ЛОС)) продукты деструкции (CO₂, H₂O) в газоразрядных устройствах оказываются более чистыми и получаются при меньшем числе стадий процесса в сравнении с каталитической и адсорбционной технологиями [1]. Несмотря на перечисленные преимущества, к возможным недостаткам ПХТ относится образование побочных продуктов, например, озона и оксидов азота, являющихся инициаторами фотохимического смога [3]. Однако O₃ и NO_x, образующиеся в ПХТ, достаточно легко нейтрализовать *in situ* с применением низкотемпературных катализаторов, например, марок ГТТ и АПК, соответственно (НИАП–Катализатор). В совокупности масса используемого дополнительного материала будет значительно ниже по сравнению со значениями, приведёнными в настоящей работе для каталитической очистки воздуха. Также остаётся открытым вопрос, связанный с надёжностью и энергетической эффективностью очистки ПХТ в промышленных масштабах. Вместе с тем, отнести данные характеристики к недостаткам достаточно сложно, ввиду малого количества информации по результатам исследований в указанных направлениях, но этого достаточно для того, чтобы препятствовать промышленной имплементации технологии. Отметим, что ПХТ (совмещённая с катализом) внесена в информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям (НДТ) и отнесена к категории перспективных систем очистки воздуха [4].

В действительности, консерватизм предприятий в отношении традиционных технологий, и, следовательно, трудности с внедрением оборудования для ПХТ связаны, в том числе, и с отсутствием единого нормативного подхода, позволяющего обосновать выбор внедряемой технологии, с учётом её достоинств

и недостатков. Действующий информационно-технический справочник [2], целью разработки которого являлось создание базового инструмента для внедрения НДТ, обладает внушительным набором информации об эффективности традиционных и перспективных технологий очистки в зависимости от условий работы (в нём присутствуют качественные критерии отнесения технологии к НДТ), однако он не приводит единый инструментарий, позволяющий количественно оценить, сравнить и принять решение о внедрении технологии на основании не только экологических, но и экономических и социальных аспектов.

Анализ литературных данных показал, что сведения, касающиеся подбора и обоснования выбора оборудования для очистки воздуха от ЛОС в промышленности, немногочисленны [5, 6], а существующие публикации содержат в основном алгоритмы выбора технологии [7], либо подходы, учитывающие затраты на оборудование и природоохранные мероприятия [8], поэтому проблема поиска комплексного критерия и подхода его оценки для обоснования выбора очистного технологического оборудования (отвечающего принципам НДТ) является актуальной.

Таким образом, цель настоящей работы представляет собой оценку эффективности ПХТ относительно традиционных физико-химических методов очистки воздуха в условиях промышленной эксплуатации.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования являлись технологии очистки воздуха от ЛОС. Проводилось сравнение технологий очистки воздуха существующими апробированными подходами выбора систем очистки. Выявлялась применимость технологий очистки отходящих газов от ЛОС в том числе и по критерию эффективности. В частности, задачами работы были: 1) подбор и анализ существующих технологий очистки воздуха, указанных в [2] для сравнения их с ПХТ (перспективным – согласно [2]);

2) оценка эффективности очистных технологий, а также их «углеродного следа» [9], на основе ранее апробированных подходов [10].

В качестве подходов для выбора наиболее эффективной технологии были использованы: эколого-экономический, экспертный подходы, иерархическая процедура оценивания и критерий относительной общей пользы.

В эколого-экономическом подходе (ЭЭП) предполагается, что эколого-экономическая эффективность проекта характеризуется системой показателей, отражающих применительно к интересам его участников соотношение затрат и результатов реализации проекта [11]. Эколого-экономический подход предусматривает оценку платы в пределах (равных или менее) нормативов допустимых выбросов или сбросов загрязняющих веществ (ЗВ), технологических нормативов с учётом платёжной базы и ставки платы за выбросы или сбросы i -го ЗВ [12], а также дополнительных коэффициентов [13].

Экспертный подход (ЭП) – способ, позволяющий оценить экологические показатели качества оборудования или продуктов на основе учёта и обработки мнений группы (комиссии) специалистов-экспертов при помощи системы баллов [14].

Метод анализа иерархий (или иерархическая процедура оценивания (ИПО)) – математический инструмент системного подхода к принятию решений, который не предписывает определяющему/ответственному лицу какому-либо «правильного» выбора направления его действий [15]. При выборе технической системы по ИПО [15] необходимы экспертные оценки для составления исходной матрицы попарных сравнений, на основании которой затем происходит расчёт основных показателей (индекс и отношение согласованности, главное значение матрицы) [15].

Для оценки предпочтительности и надёжности технических систем, а также их рекомендаций к применению, в [16] предлагается использовать комплексный критерий относительной общей пользы (W), который, в свою очередь, является отношением математического ожидания предотвращённого ущерба от внезапного прекращения работы (отказа) оборудования к сумме затрат от техногенного ущерба и применения природоохранных мероприятий [17].

Методика расчёта «углеродного следа». Порядок оценки (расчёта) «углеродного следа» того или иного производства и/или технологии представляет собой ряд пошаговых действий [9], приведённых ниже:

1. Определение коэффициента выбросов углекислого газа с учётом территориального расположения производственной площадки [18, 19].

2. Расчёт выбросов парниковых газов в результате работы производственного оборудования, работающего от электрической сети, в единицу времени [9].

3. Рассчитанное количество выбросов парниковых газов приводится к единице оцениваемой инновационной продукции в натуральном выражении [9].

4. Оценка выбросов парниковых газов, если на производственной площадке осуществлялось сжигание топлива [10].

5. В том случае, если сорбент/катализатор транспортировался автотранспортом к местам захоронения или переработки, учитывались выбросы парниковых газов при сгорании автомобильного топлива [10].

Результаты и обсуждение

На сегодняшний день, руководствуясь [2], для обезвреживания отходящих газов от газообразных и парообразных токсичных веществ, применяются физико-химические (адсорбция, конденсация, термическая и каталитическая нейтрализации) и биохимические методы очистки воздушных потоков. Основными параметрами, характеризующими эффективность перечисленных методов, являются: объёмный расход отходящих газов, концентрации ЗВ на входе и требуемая степень очистки.

Поскольку ПХТ относится к физико-химическим методам очистки, то необходимо сравнивать данную технологию с соответствующей группой методов. Более того, из представленных в [2] способов очистки только адсорбция и катализ являются хорошо сравнимаемыми с ПХТ, в т. ч. благодаря сопоставимым диапазонам объёмных расходов очищаемого воздуха.

На следующем этапе нами были проведены оценки по выбору воздухоочистного оборудования от паров муравьиной кислоты (CH_2O_2) и формальдегида (CH_2O). Выбор указанных веществ обусловлен тем, что эти ЛОС относятся к категории критериальных поллютантов, при этом CH_2O распространён в качестве загрязняющего атмосферу вещества [20]. Кроме того, CH_2O и CH_2O_2 являются маркерными веществами для текстильных предприятий и производств основных органических химических веществ, а предприятия по

переработке древесного материала также можно рассматривать в качестве источника CH_2O . Таким образом, для достижения цели работы первоначально было необходимо определить исходные значения выбросов, а также действующие модели очистного оборудования.

В качестве исходных данных для оценок принято, что выбросы CH_2O_2 составляют 2,5 т/год (4,2 млрд м^3 /год) – в результате производства 8150 т/год терефталевой кислоты в России [21] (при условии, что на предприятии установлены НДТ), а выбросы CH_2O , присутствующие на ведущем деревоперерабатывающем предприятии в г. Шуя Ивановской области при получении 250 тыс. м^3 готовой продукции (древесно-стружечных плит (ДСП) и древесно-волоконистых плит (ДВП)) – 30 т/год формальдегида, что соответствует объёмному расходу отходящих газов – 2,63 млрд м^3 /год [22].

Среди действующих представителей технологий очистки для оценки эффективности последних при «обезвреживании» от перечисленных поллютантов с заданными расходами было выбрано следующее оборудование:

– адсорбер (для CH_2O_2) с диапазоном объёмного расхода обрабатываемой среды от 100 до 100000 м^3 /ч; оценённый объём адсорбера составляет 25 м^3 (НПО «ЦЕНТР «ШВ» (1)); в качестве сорбента использовался активированный уголь AP-B с насыпной плотностью 600 $\text{кг}/\text{м}^3$ (Гидродисконт.рф);

– адсорбционная колонна ЗТ-НХТ-Q05 с активированным углём (для CH_2O); объёмный расход очищаемого воздуха составляет для этого аппарата 40000 м^3 /ч; объём адсорбера составляет 23 м^3 (Приволжский завод газоочистного оборудования (2)); в качестве сорбента применяется активированный уголь марки ВЛ-115 с насыпной плотностью 600 $\text{кг}/\text{м}^3$;

– плазменно-химическая установка «Ятаган» с расходом воздуха 100000 м^3 /ч; оценённое потребление электроэнергии – 18 кВт (ООО «НПП «Ятаган» (3));

– каталитическая установка SC, производительностью до 70000 м^3 /ч; объём аппарата 416 и 480 м^3 для CH_2O_2 и CH_2O , соответственно; объём катализатора составил 375 и 432 м^3 , а плотность стекловолокна (на которое нанесена платина) 2000 $\text{кг}/\text{м}^3$ (ЗАО «Безопасные Технологии» (4)).

Результаты эколого-экономического подхода для выбора оборудования. Оценки экологических платежей и средозащитных затрат при эксплуатации воздухоочистного оборудования на основе эколого-экономического подхода от CH_2O_2 и CH_2O показали следующие значения (табл. 1).

По данным таблицы 1 можно сделать следующий вывод: при сравнении трёх методов (технологий) очистки воздуха эколого-экономическим подходом с точки зрения степени очистки воздуха и наименьших затрат

Таблица 1 / Table 1
 Результаты использования ЭЭП для оценки методов очистки воздуха от 2,5 т/год CH_2O_2 и 30 т/год CH_2O / The ecological and economic approach results for evaluating air purification methods form 2.5 t/year CH_2O_2 and 30 t/year CH_2O

Показатели Indicators	Адсорбция Adsorption	ПХТ Plasma-chemical technology	Катализ Catalysis
	(CH ₂ O ₂ / CH ₂ O)		
Степень очистки, % Purification degree, %	99 / 95	99 / 98	95 / 99
Вероятность отказа Failure probability	0,00127 / 0,00130	0,037 / до 0,620	0,620 / 0,037
Капитальные затраты, руб. Capital expenditures, rubles	12199000 / 14300200	6484800 / 7134400	10869760 / 3857200
Амортизация, руб./год Depreciation, rubles/year	1357200 / 1587000	730800 / 791700	1224960 / 428000
Эксплуатационные затраты, руб./год Operating costs, rubles/year	6443220 / 3743544	1551600 / 3850980	8508960 / 5024480
Платежи с очисткой, руб./год Payments with clearing, rubles/year	3 / 6736	3 / 2694	14 / 1347
Затраты по методу, руб./год Costs by method, rubles/year	8370653 / 7074672	2650041 / 5504961	10302744 / 5681456

Таблица 2 / Table 2

Результаты применения ЭП для оценки методов очистки воздуха от 2,5 т/год CH_2O_2 и 30 т/год CH_2O / Results of using an expert approach to evaluate methods for air purification from 2.5 t/year CH_2O_2 and 30 t/year CH_2O

Метод очистки / Purification method	Экспертная оценка / Expert assessment (CH_2O_2 / CH_2O)
Адсорбция / Adsorption	10,8 / 10,5
ПХТ / Plasma-chemical technology	11,7 / 10,8
Катализ / Catalysis	9,7 / 9,2

выгодным является использование именно ПХТ на основе диэлектрического барьерного разряда (для CH_2O_2), а для CH_2O – каталитический метод (эффективнее на 15%, чем ПХТ только за счёт капитальных затрат на приобретение оборудования). Отметим, что адсорбционный метод кроме всего прочего, хорошо зарекомендовал себя в качестве более надёжного, поскольку вероятности отказа адсорберов 0,00127/0,00130 (основных аппаратов метода), в частности, относительно другого оборудования (3, 4), имеют наименьшее значение.

Вместе с тем, стоит отметить, что одним из ключевых недостатков данного подхода к выбору оборудования является то, что он учитывает исключительно стоимость оборудования и финансовые затраты на его эксплуатацию; кроме того, данный подход практически не учитывает показатели надёжности. Вероятность отказа, приведённая выше, единственный показатель (часть свойства безотказности), позволяющий связать ущерб окружающей среде от применения очистной установки с надёжностью используемого оборудования. Однако, существуют ещё такие свойства надёжности, как ремонтпригодность и сохраняемость (долговечность отображается в амортизационных отчислениях), которые могут оказать влияние на природоохранные затраты, играющие важную роль при выборе лучшей альтернативы.

Результаты экспертного подхода. Результаты определения соответствия показателей методов очистки экологическим требованиям и установление экологического уровня качества очистного оборудования, т. е. степени реализации экологических требований, на основе ЭП представлены в таблице 2. В опросе участвовало 6 экспертов.

В ходе опроса среди экспертов (специалистов) было установлено, что для очистки воздуха от CH_2O_2 и CH_2O наиболее эффективным является плазменный метод. В действительности, ЭП имеет множество недостатков, связанных со сложностями нахождения достаточного

количества экспертов, процедур получения информации и формирования итогового мнения группы по индивидуальным суждениям экспертов, возможность давления авторитетов в группе и т. п.

Наряду с недостатками, нельзя не отметить основное преимущество метода – возможность разностороннего анализа проблем на ранних стадиях (при отсутствии показателей надёжности); к достоинствам можно отнести относительно высокую скорость определения результатов, а также возможность оценивания объекта при невозможности измерить его характеристики количественными объективными методами.

Результаты применения иерархической процедуры оценивания. Для выбора очистного оборудования с помощью ИПО сформирована трёхуровневая иерархия: по выбору из трёх альтернатив по шести критериям (рис. 1).

Критерии для выбора очистного оборудования: вероятность снижения степени очистки (K_1), затраты на закупку оборудования (K_2), вред для окружающей среды (K_3), удобство использования (K_4), устойчивость к механическому воздействию извне (K_5), степень очистки (K_6).

Варианты (альтернативы) выбора: «Адсорбер» (V_1), «ПХТ» (V_2), «Катализ» (V_3).

При ИПО получены оценки показателей свойств очистного оборудования, определена весомость этих свойств, а также решающий вектор приоритетов, который наглядно демонстрирует предпочтительность выбора очистного оборудования из сравниваемых. Достоверность полученных результатов подтверждается расчётом обобщённого отношения согласованности. Результаты расчёта компонентов метода представлены в таблице 3.

Из данных таблицы 3 следует, что при выборе очистного оборудования от паров CH_2O_2 / CH_2O рекомендуется принять во внимание вариант V_1 , т. е. «Адсорбер» (адсорбционный метод (технология) очистки воздуха). Достоверность полученных данных применения ИПО подкреплена расчётом обобщённого

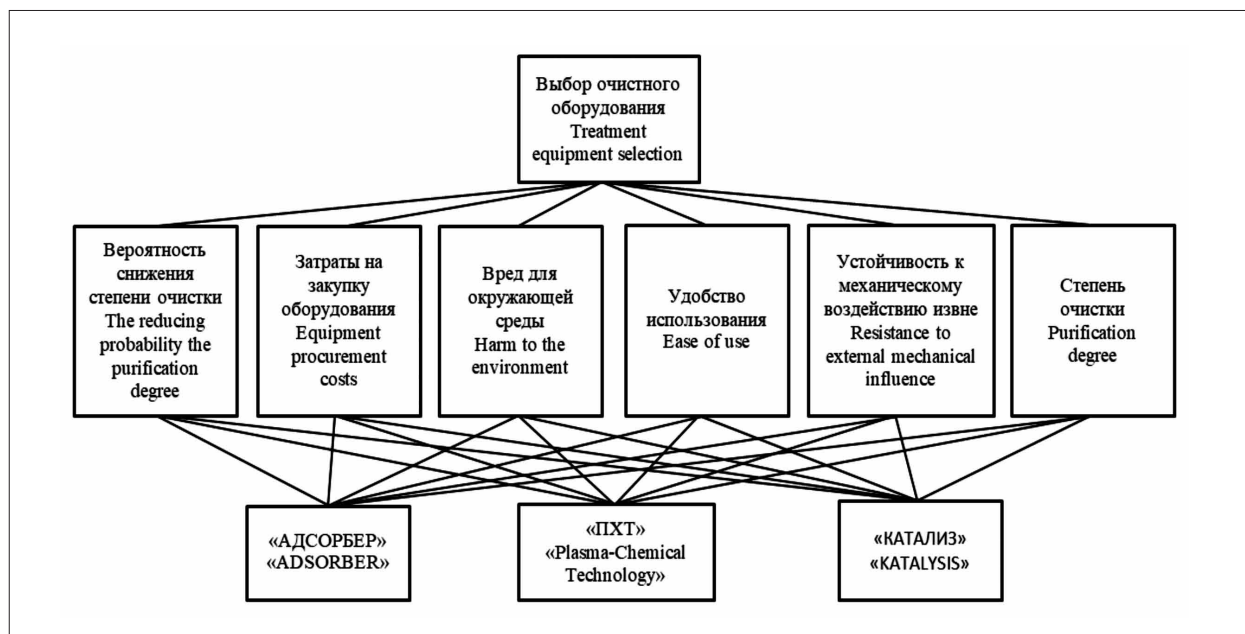


Рис. 1. Иерархия выбора очистного оборудования от паров CH_2O_2 и CH_2O
 Fig. 1. Cleaning equipment selection hierarchy from CH_2O_2 vapors and CH_2O

Таблица 3 / Table 3

Итоговые значения приоритетов выбора очистного оборудования (очистка от CH_2O_2 / CH_2O)
 Summary values of priorities for the cleaning equipment selection (cleaning from CH_2O_2 / CH_2O)

Варианты выбора очистного оборудования Options for choosing cleaning equipment	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	Итоговое значение приоритета при выборе очистного оборудования Summary values of priorities for the cleaning equipment selection
B_1	0,08 / 0,10	0,71 / 0,59	0,80 / 0,66	0,12 / 0,60	0,33 / 0,45	0,08 / 0,50	0,375 / 0,413
B_2	0,44 / 0,26	0,14 / 0,26	0,14 / 0,20	0,20 / 0,20	0,33 / 0,24	0,44 / 0,26	0,311 / 0,242
B_3	0,49 / 0,64	0,14 / 0,16	0,06 / 0,15	0,67 / 0,20	0,33 / 0,31	0,49 / 0,26	0,314 / 0,351

индекса согласованного выбора очистного оборудования (равен 4,1/4,5%) и обобщённого отношения согласованности (7,1/7,8%), значения которых не превышают порог 10–15%, что подтверждает адекватность полученных векторов приоритетности.

Однако результаты выбора отнюдь не очевидны («лучший» вариант «Адсорбер» превосходит «худший» («ПХТ») – всего на 20% (для CH_2O_2)), преимущественно благодаря низким капитальным затратам (K_2) и значению вероятного вреда для окружающей среды (отсутствие побочных продуктов реакции, K_3).

Следует отметить, что представленный выше метод ИПО имеет некоторые недостатки:

возможный субъективный подход опрашиваемых экспертов (специалистов); неполное (неправильное) понимание поставленного вопроса; неполнота и неоднозначность ответа. Стоит упомянуть о том, что каждый задействованный эксперт (специалист) должен глубоко разбираться в исследуемой тематике, т. к. от него требуется большой объём информации [23, 24]. Но все недостатки метода нивелируются его универсальностью и возможностью применения для решения самых разнообразных задач, а также высокой информативностью благодаря пошаговому анализу каждого критерия.

Результаты оценки комплексного критерия относительной общей пользы. Результаты

Таблица 4 / Table 4

Итоговые значения относительной общей пользы оборудования очистки воздуха от CH_2O_2 / CH_2O
The relative total benefits resulting values of CH_2O_2 / CH_2O air purification equipment

Метод очистки / Purification method	W
Адсорбция / Adsorption	0,017 / 0,330
ПХТ / Plasma-chemical technology	0,007 / 0,260
Катализ / Catalysis	0,012 / 0,290

Таблица 5 / Table 5

Обобщённые результаты расчётов на основе использованных подходов
для выбора очистного оборудования / Calculation results for the cleaning equipment selection

Метод Method	Подход (методика) / Approach							
	CH_2O_2				CH_2O			
	ЭЭП	ЭП	ИПО	W	ЭЭП	ЭП	ИПО	W
Адсорбционный / Adsorption	-	-	+	+	-	-	+	+
ПХТ / Plasma-chemical technology	+	+	-	-	-	+	-	-
Катализ / Catalysis	-	-	-	-	+	-	-	-

Примечание: + обозначает наиболее подходящий метод очистки согласно применённого подхода; - обозначает метод очистки, уступающий лидеру по используемым показателям.

Note: + denotes the most suitable cleaning method according to the applied approach; - denotes a cleaning method that is inferior to the leader in terms of the indicators used.

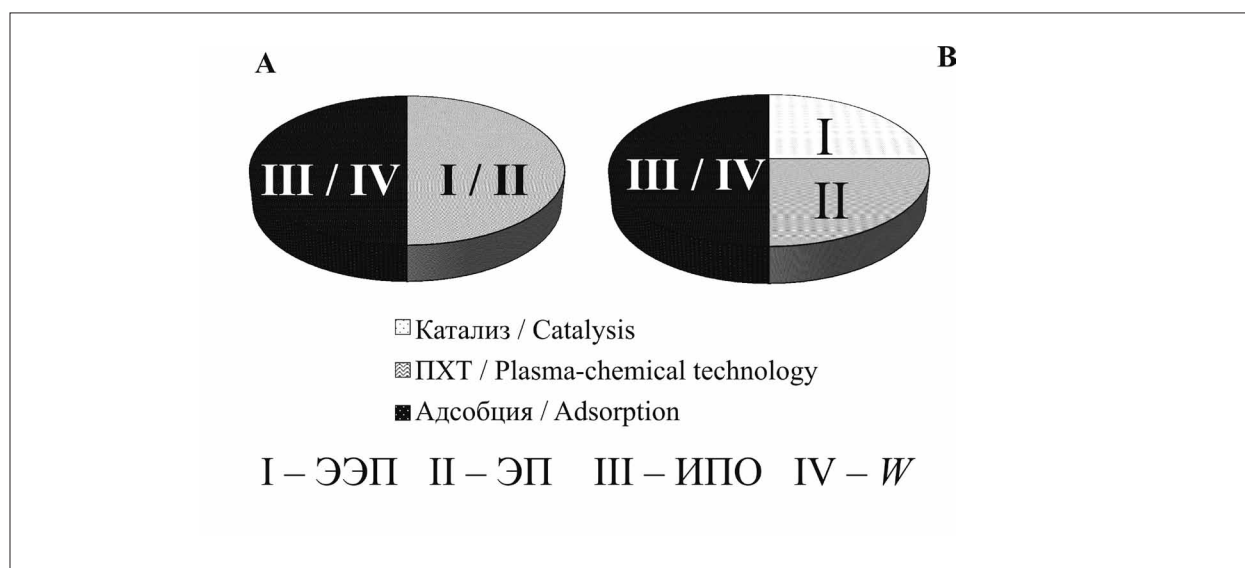


Рис. 2. Наиболее предпочтительные методы очистки воздуха от CH_2O_2 (А) и CH_2O (В) согласно результатам использования различных подходов (табл. 5)

Fig. 2. The most preferred methods for purifying air from CH_2O_2 (A) and CH_2O (B) according to the results of using various approaches (Table 5)

оценки интегральной величины, учитывающей величину предотвращённого ущерба от катастрофы, затраты на предотвращение и понижение техногенного риска, а также уровень техногенного риска по методу W, представлены в таблице 4.

Полученные расчёты (табл. 4) показывают, что наилучшим показателем с учётом параметров экологического риска обладает адсорбционный метод/технология, превосходящий ПХТ на 60 и 20% при очистке воздуха от CH_2O_2 и CH_2O соответственно, преимущественно за

счёт относительно низких затрат энергии для реализации процесса очистки.

Методика, основанная на W, имеет достаточно универсальный характер, что подтверждается её применением в работе [17] при обеспечении экологической безопасности путём выбора наиболее эффективных мер очистки атмосферного воздуха и воды в процессе производства.

Важным достоинством применённого метода является учёт нескольких аспектов эффективности применения оборудования:

Таблица 6 / Table 6

Итоговые данные по оценкам «углеродного следа» для каждого из методов очистки воздуха от 2,5 т CH_2O_2 и 30 т CH_2O / Resulting data on “carbon footprint” estimates for each method of air purification from 2.5 tons of CH_2O_2 and 30 tons of CH_2O

Углеродный след Carbon footprint	Адсорбция Adsorption	Катализ Catalysis	ПХТ Plasma-chemical technology
по CH_2O_2 , т CO_2 /год on CH_2O_2 , t CO_2 / year	2552315	2980485	538556
по CH_2O , т CO_2 /год on CH_2O , t CO_2 / year	3262229	2156210	375357

экономического и социального (предотвращённый экологический ущерб), а также надёжности. К существенному недостатку относится то, что невозможно воспользоваться методом на этапе проектирования при условии отсутствия данных по показателям надёжности соответствующих очистных устройств.

Сопоставление расчётных данных. При проведении оценок с использованием четырёх рассмотренных подходов были получены следующие данные (табл. 5, рис. 2).

В ходе проведения оценок с использованием различных подходов было установлено следующее:

1) на промышленном предприятии для очистки 2,5 т паров муравьиной кислоты возможно применение как адсорбционного оборудования, так и плазменного способов очистки (рис. 2А);

2) сведения, представленные на рисунке 2Б, показывают, что приобретение и применение для очистки адсорбционной установки являются более выгодными по сравнению с каталитической колонкой и плазменно-химическим реактором для удаления 30 т формальдегида, который образуется в процессе получения 250 тыс. м³ готовой продукции ДСП и ДВП.

Следовательно, результаты оценок при помощи использованных подходов дают отрицательный ответ на вопрос о целесообразности реализации ПХТ в промышленной деятельности (за исключением предприятий, в выбросах которых будет необходимо удалять CH_2O_2). Однако необходимо рассмотреть ещё дополнительный и актуальный показатель, учитывающий ресурсосбережение, влияние технологии на состояние атмосферы и климата Земли, а также применяемый в последние 2–3 года [9] – «углеродный след».

Оценка «углеродного следа». Определение «углеродного следа», в первую очередь, обусловлено политикой в отношении «углерод-

ной нейтральности», поскольку РФ является страной-участником Парижского соглашения «Об изменении климата» [25]. Соответственно, введение «углеродного налога» на территории страны является вопросом времени, и оценка углеродного выброса от эксплуатации различных технологий в таком случае приобретает особую значимость [26, 27]. Отметим, что в работе в качестве представителя «углеродного следа» рассматривается CO_2 , поскольку вклад данного газа в парниковый эффект наибольший [28]. Результаты оценок «углеродного следа» приведены в таблице 6.

Следовательно, можно сделать следующий вывод: для очистки атмосферного воздуха от 2,5 т CH_2O_2 и 30 т CH_2O наиболее эффективным по показателю «углеродного следа» является ПХТ (табл. 6). Плазменные методы (низкотемпературная плазма, получаемая на установках типа «Ятаган») имеют преимущества относительно адсорбционного и каталитического метода, а именно: более низкие обобщённые затраты на электроэнергию (транспортировка утилизируемого сорбента / катализатора). Кроме того, ПХТ не требует применения сорбентов и катализаторов, на производство которых приходится большой объём выбросов CO_2 .

Таким образом, в отношении «углеродной нейтральности», ПХТ является более предпочтительным методом в сравнении с упомянутыми технологиями, поскольку предоставляется возможность сократить выбросы CO_2 практически на порядок. С другой стороны, применение ПХТ, как перспективной технологии, подразумевает сокращение расходов энергии, но, именно по этому показателю данный способ уступает сравниваемым технологиям. По этой причине необходимы исследования по оптимизации ПХТ, и одним из возможных путей является совмещение ПХТ с традиционными и/или перспективными технологиями (в противном случае применение плазменного метода очистки воздуха будет

ограничено практикой, не рассматривающей энергоэффективность как приоритет).

В частности, необходимы дальнейшие исследования для оптимизации применения плазмы барьерного разряда (коронного, стримерного или вообще разрядных систем). Так, интересные возможности представляет плазма барьерного разряда в присутствии катализатора **Cu-Se, снижающая концентрацию** поллютантов не менее чем на 94,7% при начальной концентрации 73 мг/м³ [29], а при нейтрализации муравьиной кислоты совместно с ароматическими соединениями (бензол, толуол, ксилол) достигается 90% степень превращения органических поллютантов плазменно-каталитическим методом [30]. В целом, оценка количества работ в направлении исследования совмещённых плазменно-каталитических процессов (СПКП) за последнее время позволяет предположить хорошую эколого-экономическую эффективность ПХТ, поскольку может расширить возможности уже используемых технологий очистки воздуха.

Заключение

Результаты осуществлённых оценок эффективности очистки воздуха от формальдегида и муравьиной кислоты показывают, что на данный момент ПХТ не может быть самостоятельной технологией, как в случае очистки отходящих газов от CH_2O_2 , так и CH_2O , поскольку в среднем отстаёт на 30% от сопоставимых традиционных физико-химических методов очистки. Так, например, только два из четырёх способов выбора наиболее предпочтительного метода очистки воздуха от CH_2O_2 показывают преимущество данной технологии относительно катализа. При рассмотрении же промышленных технологий удаления CH_2O из воздуха можно констатировать, что ПХТ отстаёт от адсорбционной технологии, поскольку капитальные затраты на реализацию ПХТ и на электроэнергию при эксплуатации оборудования относительно высоки.

Вместе с тем, с точки зрения «углеродной нейтральности» ПХТ для удаления CH_2O_2 и CH_2O более предпочтительна, она позволяет сократить суммарные выбросы CO_2 в среднем на 80%, преимущественно за счёт того, что отсутствует необходимость транспортировать утилизируемый сорбент (адсорбционные технологии) или катализатор (катализ). Кроме того, при сравнении с адсорбционным или каталитическим методами можно пренебречь затратами ресурсов на реализацию ПХТ.

Следовательно, снижая эксплуатационные затраты, например, за счёт выбора оптимальных частот электрогенераторов низкотемпературной плазмы, применяя катализаторы в СПКП, внедряя инновационные материалы в конструкцию разрядных ячеек, а также повышая надёжность последних (увеличивая ресурс реакторов ПХТ), можно попытаться достичь и превзойти эффективность традиционных технологий очистки воздуха.

References

1. Efimov A.E., Bubnov A.G. Air purification from formaldehyde by active barrier discharge particles // Russian Journal of Applied Ecology. 2023. No. 1. P. 38–44 (in Russian). doi: 10.24852/2411-7374.2023.1.38.44
2. ITS 22-2016 Treatment of emissions of harmful (polluting) substances into the atmospheric air during the production of products (goods), as well as during the performance of work and the provision of services at major events. Moskva: Byuro NDT, 2016. 211 p. (in Russian).
3. Pankratov A.N., Uchaeva I.M. Oxidation-reduction reactions in the environment. Moskva: Izdatelstvo "Pero", 2020. 256 p. (in Russian).
4. ITD 47-2023 Treatment (handling) systems for wastewater and exhaust gases in the chemical industry. Moskva, 2023. 102 p. (in Russian).
5. Evsina E.M., Khomenko T.V., Zolotareva N.V. Mathematical modeling of evaluation and the choice of technical solutions in air purification systems // Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. 2019. No. 4 (30). P. 135–140 (in Russian).
6. Evsina E.M., Shikulsky M.I. Intellectualization of the decision support system for the selection of methods and means of air purification of industrial enterprises // Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region. 2021. No. 1 (35). P. 66–69 (in Russian).
7. Berezyuk M.V., Romyantseva A.V., Merzlikina Yu.B., Makarova D.N. Choice of the best available technologies: economic aspects // Vestnik UrFU. Seriya Ekonomika i upravlenie. 2014. No. 2. P. 109–121 (in Russian).
8. Berezin S.E., Bazhenov V.I., Chernenko A.V. Justification for the choice of technological equipment for wastewater treatment // Nailuchshie dostupnye tekhnologii vodosnabzheniya i vodootvedeniya. 2014. No. 2. P. 48–59 (in Russian).
9. STO MON 2.42-2018. "Green" standards in the nanoindustry methodology for assessing the carbon footprint of the production of innovative products. Moskva, 2018. 43 p. (in Russian).
10. Begak M.V., Guseva T.V., Molchanova T.V., Averochkin E.M., Sagayduk V.L. Monitoring and reducing the carbon footprint of Russian water utilities. Methods for determining the carbon footprint of wastewater treatment facilities. Moskva: RKhTU im. D.I. Mendeleeva, 2013. 56 p. (in Russian).

11. Bykova Ya.P., Ermolenko B.V. Statement of the problem of choosing an effective technological scheme for treating wastewater from oil refineries and constructing a mathematical model // *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2007. V. 21. No. 12 (80). P. 7–12 (in Russian).
12. Decree of the Government of the Russian Federation of January 24, 2020. No. 39 “On the application of payment rates for negative environmental impact in 2020” [Internet resource] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202001280014?index=1&rangeSize=1> (Accessed: 30.12.2022) (in Russian).
13. Decree of the Government of the Russian Federation of September 13, 2016 No. 913 (as amended on January 24, 2020) “On the rates of payment for the negative impact on the environment and additional coefficients” [Internet resource] <https://docs.cntd.ru/document/420375216?ysclid=lcovonu tc9361188670> (Accessed: 30.12.2022) (in Russian).
14. Evstropov N.A. Environmental assessment of the quality level of industrial products and technological processes: guidelines. Moskva: Akademiya standartizatsii, metrologii i sertifikatsii, 2001. 44 p. (in Russian).
15. Saati T.L. *The Analytic Hierarchy Process*. Moskva: Radio i svyaz, 1993. 278 p. (in Russian).
16. Saraev I.V., Bubnov A.G. Choosing personal protective equipment for firefighter respiratory and eye protection based on relative total benefit // *Civil Security Technology*. 2017. V. 14. No. 1 (51). P. 71–79 (in Russian).
17. Bubnov A.G., Grinevich V.I., Gushchin A.A., Platinina N.A. Methodology of method choice for water purification from organic substances applying ecological risk parameters // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2007. V. 50. No. 8. P. 89–93 (in Russian).
18. Dynamics of development of carbon emission factors for electricity generation in Russia. Study of the baseline level of carbon emissions in Russia: final report [Internet resource] https://www.ebrd.com/downloads/sector/eccc/Baseline_Study_Russia_Final_Russian.pdf (Accessed: 25.04.2022) (in Russian).
19. Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation [Internet resource] <http://www.mnr.gov.ru> (Accessed: 25.04.2022) (in Russian).
20. Sedykh V.A., Kurolap S.A., Belyaeva L.N., Mazurov G.I., Kozlov A.T., Zakusilov V.P. Formaldehyde air pollution and risk assessment of carcinogenic effects // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 2. P. 73–79 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-2-073-079
21. Order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated December 29, 2020 No. 1416 “On approval of the regulatory document in the field of environmental protection “Technological indicators of the best available technologies for the production of basic organic chemicals” [Internet resource] <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202101290016?ysclid=ls8wwxvr6c782648591> (Accessed: 04.02.2024) (in Russian).
22. Kakareka S.V., Ashurko Yu.G. Peculiarities of formaldehyde into atmospheric air emission from manufacture and use of wood processing production // *Prirodopolzovanie*. 2011. No. 19. P. 31–36 (in Russian).
23. Seredkin K.A., Dolgoshchelova M.I., Korobov V.B., Comparison of methods for expert evaluation of factors in terms of ecological-geographical value of environmental impact assessment of transport infrastructure of Arkhangel'sk region // *Arctic Environmental Research*. 2014. No. 4. P. 43–52 (in Russian).
24. Uzhga-Rebrov O.I., Grabusts P.S. Comparative analysis of two approaches to modeling and accounting for risks in decision making // *Problemy Analiza Riska*. 2012. No. 2. P. 8–23 (in Russian).
25. Paris agreement: Status of ratification / United Nations framework convention on climate change (UNFCCC) [Internet resource] http://unfccc.int/paris_agreement/items/9444.php (Accessed: 30.12.2022).
26. Syrcina N.V., Kantor G.Ya., Pugach V.N., Ashikhmina T.Ya. Contribution of carbon dioxide and water to the greenhouse effect // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 4. P. 218–223 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-4-218-223
27. Gordeeva E.M., Pugach V.N. The Paris Agreement and “Climate neutrality”: the role for “Agriculture, forestry and other land use” sector // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 3. P. 219–227 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-3-219-227
28. Kantor G.Ya., Syrcina N.V. Alternative assessment of methane’s contribution to the greenhouse effect // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 3. P. 197–207 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-197-207
29. Zhu X., Gao X., Qin R., Zeng Y., Qu R., Zheng C., Tu X. Plasma-catalytic removal of formaldehyde over Cu–Ce catalysts in a dielectric barrier discharge reactor // *Appl. Catal., B*. 2015. V. 170–171. P. 293–300. doi:10.1016/j.apcatb.2015.01.032
30. Kim H.H., Ogata A., Futamura S. Atmospheric plasma-driven catalysis for the low temperature decomposition of dilute aromatic compounds // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2005. V. 38. No. 8. Article No. 1292. doi: 10.1088/0022-3727/38/8/029