

УДК 62:665.3

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-11-19

Анализ зарубежного опыта применения систем газоочистки тепловых электрических станций на твердых коммунальных отходах

А.Н. Ефремов, А.А. Дудолин

Существующая в Российской Федерации методика выбора структуры энергетической установки для термической утилизации ТКО (твердых коммунальных отходов) не отражает выбора всех элементов схемы энергетического комплекса (ЭК) на ТКО, а сфокусирована на определении наилучшей доступной технологии термического обезвреживания, что приводит к необходимости поиска новых методик и подбора критериев выбора структуры для каждого проекта.

Проведение сравнительного анализа различных структурных схем ТЭС на ТКО, распространенных за рубежом, позволит выявить их основные достоинства и недостатки, установить области применения.

Описаны статистические показатели работы системы очистки дымовых газов (ДГ) от кислых газов, которые можно использовать на этапах ТЭО, ОИС, при разработке базового инжиниринга.

При строительстве ТЭС на ТКО в условиях городской застройки и стремлении к минимизации валовых выбросов кислых газов в атмосферный воздух рекомендована система с мокрым реактором, обеспечивающая низкие выбросы HF, HCl, SO_x. Система с мокрым реактором позволит сократить валовые выбросы вредных веществ при строительстве ТЭС на ТКО большой производительности, и, в этом случае, является обоснованной.

При строительстве ТЭС на ТКО средней мощности (до 350000 т ТКО в год) возможно применение полусухого и сухого реакторов, при этом наиболее предпочтительна технология с полусухим реактором.

Ключевые слова: ТЭС на ТКО, термическая утилизация отходов, экономичность газоочистки, удаление кислых газов, экологические показатели работы ТЭС на ТКО.

Для цитирования: Ефремов А.Н., Дудолин А.А. Анализ зарубежного опыта применения систем газоочистки тепловых электрических станций на твердых коммунальных отходах // Вестник МЭИ. 2021. № 2. С. 11—19. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-11-19.

Analysis of Foreign Experience in Using Flue Gas Purification Systems at Waste-to-Energy Plants

A.N. Efremov, A.A. Dudolin

The existing method for selecting the structure of a power plant for thermally recycling municipal solid waste (MSW) in the Russian Federation does not address the matter of selecting all components of an energy complex operating on MSW, but places focus on determining the best accessible waste thermal neutralization technology. This generates the need to search for new methods and to select criteria of choosing the structure for each particular project.

A comparative analysis of various structural schemes of waste-to-energy plants widely used outside of Russia will make it possible to reveal their main advantages and drawbacks, and to determine their application fields.

The article describes the statistical indicators characterizing the operation of the flue gas purification system from acid gases, which can be applied in performing a feasibility study, intellectual property assessment, and in carrying out front-end engineering.

For waste-to-energy plants constructed in an urban environment and aimed to operate with keeping to a minimum the gross emissions of acid gases into the atmospheric air, the use of a wet reactor system is recommended, which will ensure low emissions of HF, HCl, and SO_x. The system with a wet reactor will make it possible to reduce gross emissions of harmful substances during the operation of large capacity waste-to-energy power plants and will be a justified choice in such case.

In constructing medium capacity waste-to-energy plants (with a throughput of up to 350 000 t of MSW per annum), semi-dry and dry reactors can be used; for such plants, the technology involving the use of a semi-dry reactor is the most preferred one.

Key words: waste-to-energy plant, waste thermal recycling, gas purification efficiency, acid gas removal, waste-to-energy plant environmental performance indicators.

For citation: Efremov A.N., Dudolin A.A. Analysis of Foreign Experience in Using Flue Gas Purification Systems at Waste-to-Energy Plants. Bulletin of MPEI. 2021;2:11—19. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-11-19.

Введение

Использование твердых коммунальных отходов (ТКО) в качестве ресурса для получения вторичного сырья и энергии — привлекательный вариант для коммерческих структур и местных органов власти во многих странах. Термическое обезвреживание способствует сокращению захоронения несортированных ТКО на полигонах, допускает переработку отходов, которые не могут быть эффективно использованы для получения вторичного сырья или рекуперации путем биологической очистки [1].

Методика выбора структуры энергетической установки для термической утилизации ТКО, приведенная в [2], не отражает выбора всех элементов схемы энергетического комплекса (ЭК) на ТКО, а сфокусирована на выборе наилучшей доступной технологии термического обезвреживания, что приводит к необходимости поиска новых методик для каждого проекта, подборки критериев выбора схемы объекта.

Создание методологии и определение критериев оценки различных технологий термической переработки ТКО элементов, входящих в состав технологической схемы ЭК, — актуальная задача в условиях развития отрасли. Как отмечено в [3 — 5], в России на сегодняшний день имеется всего несколько крупных ТЭС на ТКО, а значит, изучение влияния элементов структуры ТЭС на ТКО только на основе отечественного опыта эксплуатации подобных установок невозможно. Проведение сравнительного анализа различных структурных схем ТЭС на ТКО, распространенных за рубежом, позволит выявить их основные достоинства и недостатки, определить области применения.

Целями работы являются составление общей методики выбора структуры ЭК на ТКО и обоснование выбора каждого ее элемента по отдельности в соответствии с данными о зарубежном опыте эксплуатации подобных систем.

Описаны статистические показатели работы системы очистки дымовых газов (ДГ) от кислых газов, которые могут быть применены для выбора системы газоочистки на этапе предпроектных проработок. Экономические аспекты задачи будут изложены в последующих публикациях.

Основные элементы, входящие в систему очистки дымовых газов теплоэлектростанций на твердых коммунальных отходах

В зависимости от структуры ТЭС на ТКО технология очистки дымовых газов включает в себя различные методы первичного и вторичного удаления вредных веществ [6], каждый из которых выполняет функцию по удалению конкретного вещества или группы загрязнителей. В общем виде перечень основных загрязнителей в ДГ и технологий очистки приведен в таблице.

Перечень основных загрязнителей ДГ и технологий газоочистки [7]

Наименование вещества	Технология газоочистки
Твердые частицы	Рукавные фильтры, электрофильтры, циклоны
Оксиды азота (NO _x)	Первичные методы по снижению, SNCR и SCR
Кислые газы (SO _x , HCl, HF)	Мокрые (WS), полусухие (Semi WS) или сухие (DSI) системы, рукавные фильтры
Тяжелые металлы	Первичные методы, впрыск активированного угля, удаление твердых частиц
Диоксины и фураны	Первичные методы по снижению, впрыск активированного угля, SCR, удаление твердых частиц

Методика определения оптимальной системы газоочистки

Авторами предложена методика выбора технологии очистки дымовых газов на основании оценки статистических данных о снижении концентрации вредных веществ на существующих предприятиях. Выполнен анализ результатов эксперимента по сбору статистических данных о выбросах ТЭС на ТКО, проведенного в ЕС в 2016 г. В нем было задействовано 204 предприятия по термическому обезвреживанию ТКО различной производительности, построенных в разные годы и имеющих различные схемы газоочистки [8, 9]. Контроль выбросов проводился для постоянно фиксируемых показателей с получасовым временным разрешением в течение года. Для каждого параметра

была собрана серия из 17520 среднечасовых значений концентраций загрязнителей. На основе информации о выбросах определены максимальные среднесуточные концентрации загрязнителей в ДГ, среднегодовые концентрации, найдены средние расходы реагентов, приведенные к тонне утилизируемых отходов.

Изучены описанные в [8, 10] результаты для определения следующих показателей работы для каждой технологии:

- среднегодовые показатели выбросов (распределение установок по среднегодовым выбросам);
- максимальные суточные и средние по объектам данные выбросов;
- влияние системы газоочистки на расход реагентов;
- распространенность технологии.

Полученные выводы могут быть использованы для определения оптимальной структуры системы очистки ДГ ТЭС на ТКО с целью достижения минимального негативного воздействия на окружающую среду.

Очистка дымовых газов теплоэлектростанций на твердых коммунальных отходах от кислых газов

Описание технологий удаления кислых газов ТЭС на ТКО.

Для удаления кислых газов применяют следующие способы [10]:

- сухую газоочистку (DSI);
- полусухую систему очистки (Semi WS);
- мокрую газоочистку (WS).

При сухой очистке дымовых газов газообразные кислотные компоненты (HF, HCl) адсорбируются щелочным химическим веществом (карбонат натрия, известь и др.), тяжелые металлы, ПХДД/Ф удаляются при помощи активированного угля, впрыскиваемого в систему. Для смешения используется сухой реактор, обеспечивающий однородное распределение адсорбента в потоке дымовых газов и достаточное время реакции. Из-за сухого вида реагентов эффективность реакции адсорбента достаточно низкая. Для ее повышения применяют рециркуляцию адсорбента, расход которого в целом превышает стехиометрическое соотношение с коэффициентом около 2 [8], что приводит к его большому расходу и, как следствие, большому расходу золы на рукавных фильтрах (BF). Система характеризуется сложностью регулирования расхода реагента для поддержания заданных значений концентраций загрязнителей.

Основной принцип обработки ДГ полусухим методом не отличается от сухой очистки ДГ, основное отличие заключается в том, что реагент растворяется в воде для получения жидкого раствора. Раствор распыляется в потоке дымовых газов при температуре 200...240 °С с помощью сопел в полусухом реакторе. Разбрызгивание реагента увеличивает площадь контакта адсор-

бента с химическими веществами в составе ДГ, так как при испарении воды происходит охлаждение дымовых газов до 130...180 °С. В процессе полусухой очистки используется рециркуляция золы рукавного фильтра, содержащей большое количество реагента, стехиометрическое соотношение обычно составляет порядка 1,5 [8], образование золы на BF сокращается. Эффективность системы по удалению вредностей из дымовых газов выше в сравнении с сухой.

Существуют разнообразные элементы и конструкции систем мокрой очистки дымовых газов. Основным принципом является интенсивный контакт между дымовыми газами и водой. Дымовые газы контактируют с каплями раствора реагента, загрязняющие компоненты поглощаются и отводятся с водным раствором. Обычно применяется двухступенчатая очистка ДГ, где на первой ступени дымовые газы проходят через скруббер, в котором распыляется вода для удаления HCl и HF, а на второй ступени распыляется вода со щелочными добавками для нейтрализации SO_x. При работе данной системой известь не поступает на BF с золой, сокращается объем золы. Мокрая система газоочистки характеризуется наибольшей эффективностью работы и одновременно высоким CAPEX. В ней образуются сточные воды, требующие нейтрализации и дополнительной обработки (высокий OPEX).

Показатели очистки газов для разных технологий

Приведены результаты анализа среднегодовых и максимальных суточных концентраций HCl, HF, SO_x в ДГ исследуемых объектов, даны максимальные и минимальные суточные значения концентраций загрязнителей.

В соответствии с нормативными документами на территории РФ нормируются следующие показатели, отражающие выбросы кислых газов [2]:

Диоксид серы (SO _x), мг/м ³	50
Хлористый водород (HCl), мг/м ³	10
Фтористый водород (HF), мг/м ³	1

Влияние системы газоочистки на выбросы HCl

Анализ данных о среднесуточных и среднегодовых концентрациях HCl [8] показал наличие зависимости концентрации HCl в дымовых газах ТЭС на ТКО от применяемой системы газоочистки (рис. 1).

Концентрации HCl в ДГ установок, оснащенных сухими и полусухими системами газоочистки, сопоставимы с установками с мокрой системой. Среднегодовая концентрация HCl в ДГ после установок, оснащенных полусухой системой газоочистки, на 13,3% выше, чем для установок с сухой системой, средняя максимальная концентрация выше на 17,5%.

Максимальные зафиксированные концентрации HCl в ДГ установок, оснащенных DSI и SemiWS, отличаются незначительно (2,6%) и составляют 19 и 18,5 мг/м³, соответственно.

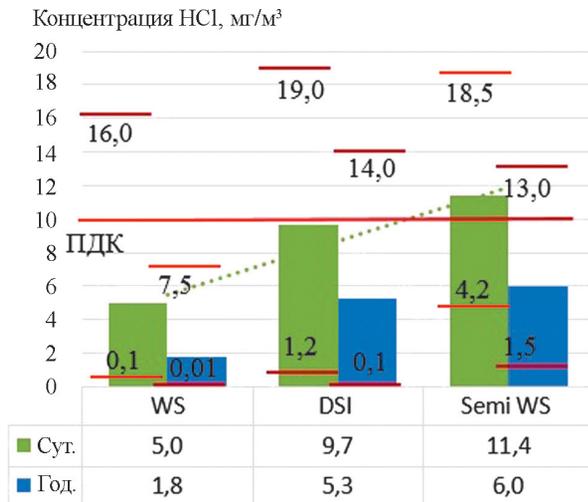


Рис. 1. Средние годовые и максимальные суточные концентрации HCl для различных систем

Среднее значение максимальных суточных концентраций для установок с SemiWS составляет 1,13 ПДК, а в случае с установками с DSI — 0,96 ПДК.

Анализ статистических данных показывает, что наименьшие концентрации HCl достигаются при использовании системы мокрой газоочистки WS. Среднее максимальное суточное значение концентрации HCl в ДГ — 5,0 мг/м³, среднее среднегодовое значение концентрации HCl в ДГ — 1,8 мг/м³. Средние максимальные концентрации HCl в ДГ при использовании WS на 93,1% меньше, чем для DSI и на 127% меньше, чем для SemiWS. Максимальные зафиксированные концентрации HCl в ДГ после установок, оснащенных WS, равны 16 мг/м³, что на 18,8% меньше, чем для DSI и на 15,6% меньше, чем для SemiWS.

Средняя максимальная суточная концентрация HCl в ДГ после установок с WS — 0,5 ПДК.

На рисунке 2 изображен график распределения установок с различными системами газоочистки по максимальной суточной концентрации HCl в ДГ.

В соответствии с результатами анализа 33,7% установок, оснащенных WS, имеют пиковые показатели концентраций по загрязнителю менее 2 мг/м³, при этом у 20,2% установок пиковые концентрации превышают ПДК. Пиковые концентрации превышают ПДК у 44,6% установок с DSI и 60,9% установок SemiWS.

На рисунке 3 дан график распределения установок с различными системами газоочистки по среднегодовым выбросам HCl.

По итогам анализа данных, 63,3% установок с WS имеют среднегодовые концентрации HCl менее 2 мг/м³, при этом 100% установок обладают среднегодовыми выбросами менее 8 мг/м³.

Среди исследуемых объектов с DSI и SemiWS на 7,7 и 4,3% объектов концентрация HCl в среднем по году выше ПДК.

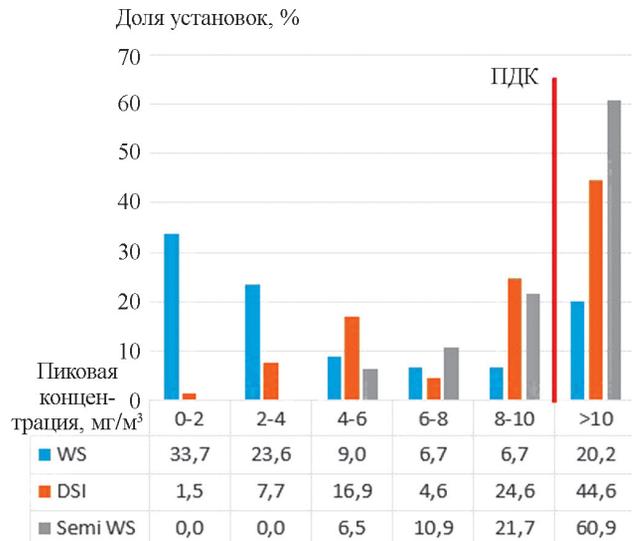


Рис. 2. Распределение объектов по максимальным суточным выбросам HCl

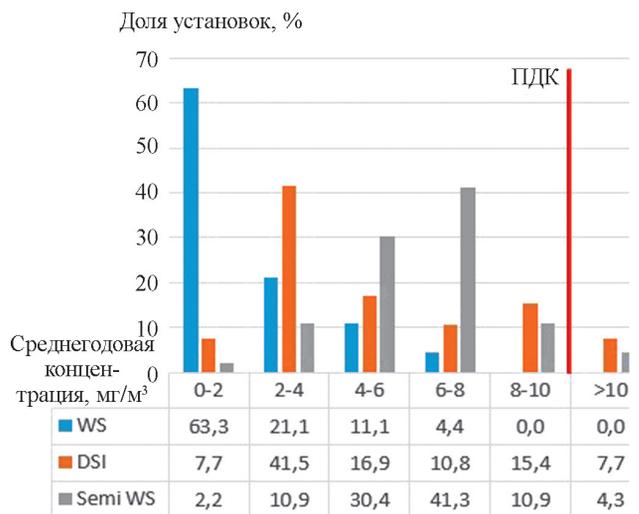


Рис. 3. Распределение объектов по среднегодовым выбросам HCl

Исследование [8] показывает, что ТЭС на ТКО, оснащенные мокрым скруббером, обычно достигают более низких концентраций (в среднем по году ниже 2 мг/м³, средний суточный максимум составляет 5 мг/м³), чем объекты с сухими или полусухими системами очистки ДГ.

Влияние системы газоочистки на выбросы HF

Анализ данных о среднесуточных и среднегодовых концентрациях HF [8] показал наличие зависимости концентрации HF в дымовых газах ТЭС на ТКО от применяемой системы газоочистки (рис. 4).

Наибольшие показатели выбросов HF наблюдаются у установок, оснащенных сухим реактором DS. Средняя максимальная концентрация HF для DSI составляет 0,49 мг/м³, что на 32,4% больше, чем для установок,

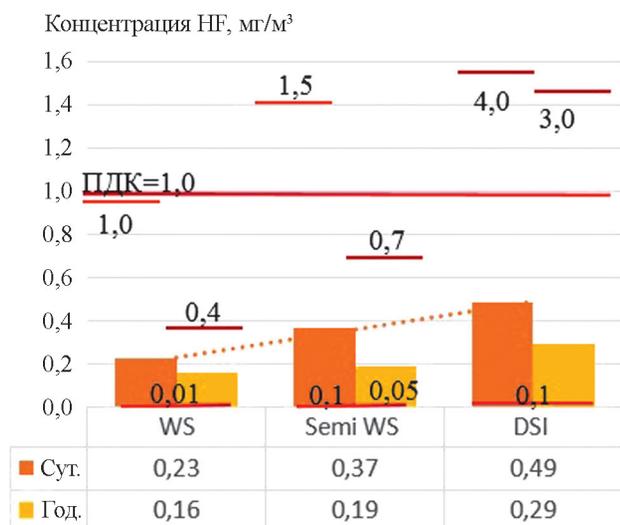


Рис. 4. Средние годовые и максимальные суточные концентрации HF для различных систем

оснащенных SemiWS, и на 113,6% больше, чем для установок с WS.

Максимальные зафиксированные суточные концентрации HF — 4,0 мг/м³, максимальная среднегодовая концентрация — 3,0 мг/м³. Среднее значение максимальных суточных концентраций для установок с DSI — 0,48 ПДК.

Показатели очистки газов на установках, оснащенных SemiWS, несколько лучше, чем для установок с DSI, при этом средняя максимальная суточная концентрация HF — 0,37 мг/м³. Максимальная суточная концентрация HF равна 1,5 мг/м³, что на 61,3% выше, чем для установок с WS. Среднее значение максимальных суточных концентраций для установок с DSI — 0,36 ПДК.

Наилучшие показатели очистки ДГ от HF получаются при применении систем с WS, по статистическим данным средняя максимальная суточная концентрация HF — 0,23 мг/м³, что на 61,3% меньше, чем для установок с SemiWS и на 113,6% меньше, чем для установок с DSI. Максимальная зафиксированная суточная концентрация для систем оснащенных WS — 1,0 мг/м³, максимальная среднегодовая концентрация — 0,4 мг/м³, что на 75% меньше, чем для систем с SemiWS и на 650% меньше, чем для систем с DSI. Среднее значение максимальных суточных концентраций для установок с DSI — 0,22 ПДК.

На рисунке 5 представлен график распределения установок с различными системами газоочистки по максимальной суточной концентрации HF в ДГ. В соответствии с результатами анализа 58,5% установок, оснащенных WS, обладают пиковыми суточными концентрациями HF менее 0,2 мг/м³, при этом 0% установок имеют пиковые концентрации, превышающие ПДК.

Среди установок, оснащенных DSI и SemiWS, у 5,6 и 7,9% максимальные суточные концентрации превышают ПДК.

На рисунке 6 дан график распределения установок с различными системами газоочистки по среднегодовым выбросам HF, демонстрирующий что 74,2% установок с WS имеют среднегодовые концентрации HF менее 0,2 мг/м³, при этом у 100% установок среднегодовые выбросы менее 0,6 мг/м³.

Среди изучаемых объектов с DSI на 3,6% концентрация HF в среднем по году выше ПДК. Среднегодовые показатели выбросов HF для установок с Semi WS в 100% случаев менее 0,8 мг/м³, что несколько хуже, чем для установок с WS.

Исследование [8] показывает, что ТЭС на ТКО, оснащенные мокрой системой газоочистки, обычно достигают более низких уровней выбросов (в среднем по году менее 0,16 мг/м³, средний суточный максимум — 0,23 мг/м³), чем объекты, оснащенные сухой или полусухой системами очистки ДГ. При этом как установки с Semi WS, так и с DSI удаляют HF из потока ДГ в достаточной мере, концентрации HF на 90% ТЭС на ТКО не превышают ПДК даже в виде пиковых суточных значений.

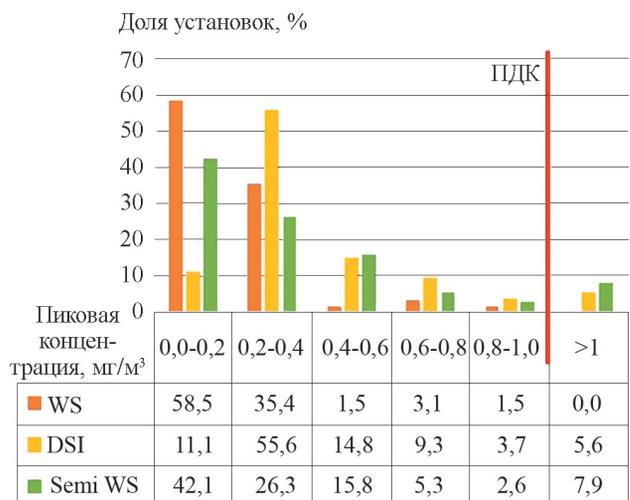


Рис. 5. Распределение объектов по максимальным суточным выбросам HF

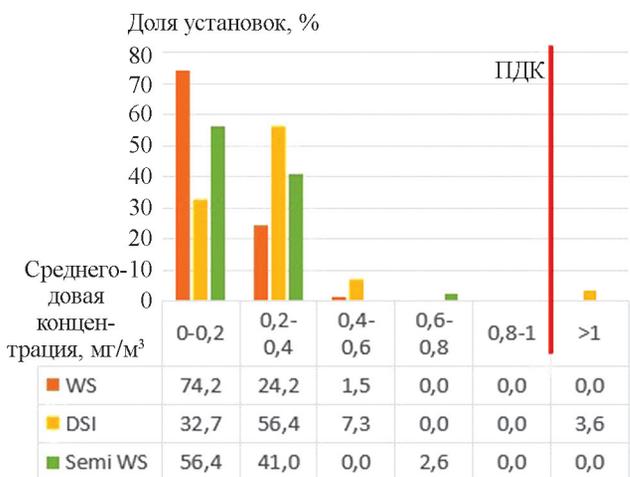


Рис. 6. Распределение объектов по среднегодовым выбросам HF

Влияние системы газоочистки на выбросы SO_x

Данные о среднесуточных и среднегодовых концентрациях SO_x [8] говорят о наличии однозначной зависимости концентрации SO_x в дымовых газах ТЭС на ТКО от применяемой системы газоочистки (рис. 7) для среднегодовых и максимальных концентраций.

Наибольшие концентрации наблюдаются на установках, оснащенных полусухой системой газоочистки. Средние максимальные суточные концентрации равны $33,2 \text{ мг/м}^3$, что на $23,4\%$ больше, чем для установок, оснащенных WS, и на $40,2\%$ больше чем для установок с DSI. Максимальные зафиксированные суточные концентрации SO_x составляют $90,0 \text{ мг/м}^3$, максимальная среднегодовая концентрация составляет $40,0 \text{ мг/м}^3$. Среднее значение максимальных суточных концентраций для установок с SemiWS составляет $0,66$ ПДК.

Концентрации SO_x после установок с DSI несколько ниже, чем для SemiWS, средняя максимальная суточная концентрация — $23,7 \text{ мг/м}^3$. Максимальная суточная концентрация — 90 мг/м^3 , что сравнимо со статистическими данными по всем видам систем газоочистки. Среднее значение максимальных суточных концентраций для установок с DSI — $0,47$ ПДК.

Наилучшие среднегодовые показатели очистки ДГ от SO_x достигаются при использовании систем с WS, по статистическим данным среднегодовая концентрация — $7,1 \text{ мг/м}^3$, что на 35% меньше, чем для установок с DSI и на $73,6\%$ меньше, чем для SemiWS. Максимальная суточная концентрация равна $88,0 \text{ мг/м}^3$, что сопоставимо с результатами по всем системам очистки. Средняя максимальная концентрация SO_x в ДГ — $26,9 \text{ мг/м}^3$, что на 12% выше чем для DSI. Среднее значение максимальных суточных концентраций для установок с WS — $0,53$ ПДК.

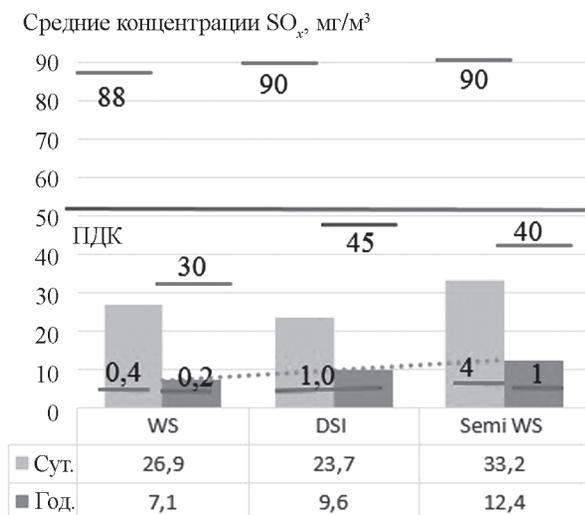


Рис. 7. Средние годовые и максимальные суточные концентрации SO_x для различных систем

На рисунке 8 изображен график распределения установок с различными системами газоочистки по максимальной суточной концентрации SO_x в ДГ.

В соответствии с результатами анализа $28,1\%$ установок, оснащенных DSI, имеют пиковые показатели концентраций по загрязнителю менее 10 мг/м^3 , при этом у $15,6\%$ установок пиковые концентрации выше ПДК, что считается наилучшим результатом по приведенной статистике.

Среди установок с SemiWS и WS максимальная суточная концентрация SO_x в $25,6$ и $18,6\%$ выше ПДК.

На рисунке 9 приведен график распределения установок с различными системами газоочистки по среднегодовым выбросам SO_x .

По результатам анализа $4,2\%$ установок с WS имеют среднегодовые концентрации SO_x менее 10 мг/м^3 .

Среди всех исследуемых объектов с различными системами газоочистки отсутствуют объекты со среднегодовыми показателями выбросов, превышающими ПДК.

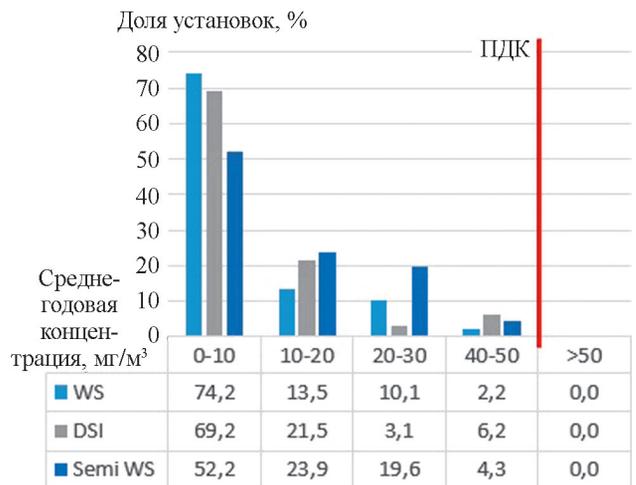


Рис. 8. Распределение объектов по максимальным суточным выбросам SO_x

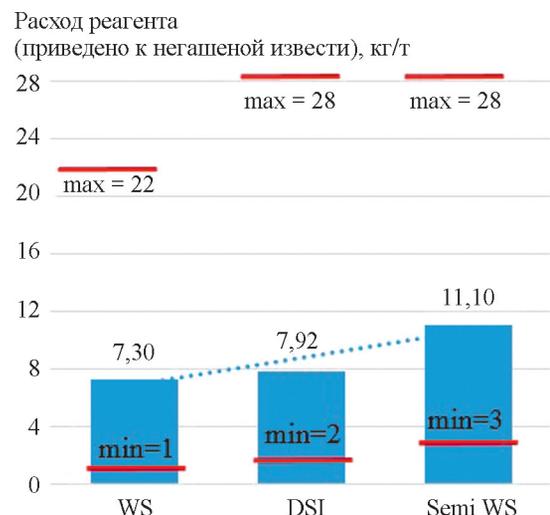


Рис. 9. Распределение объектов по среднегодовым выбросам SO_x

В публикации [8] показано, что ТЭС на ТКО, оснащенные сухой системой газоочистки, обычно достигают более низких пиковых уровней выбросов (в среднем по году ниже $23,7 \text{ мг/м}^3$), чем объекты с мокрой или полусухой системой очистки ДГ. При этом максимальные выбросы, зафиксированные при работе всех видов систем, имеют практически одинаковые показатели. Среднегодовые концентрации SO_x в дымовых газах для установок, оснащенных мокрой системой газоочистки, составляют $7,1 \text{ мг/м}^3$, что является наилучшим среди рассматриваемых технологий.

Влияние системы газоочистки на расход реагентов

Данные анализа статистических данных [8] показали наличие зависимости расхода щелочного реагента от применяемой системы газоочистки (рис. 10).

В связи с тем, что на объектах используются различные щелочные реагенты, необходимые в системе удаления кислых газов, количество реагента пересчитано до эквивалента негашеной извести по стехиометрическому соотношению.

Для каждой из систем газоочистки стехиометрическое соотношение имеет свое значение. В соответствии с [8] стехиометрические соотношения составлены для DSI-2, SemiWS-1,5, WS-1.

Анализ статистических данных подтверждает то, что расход реагентов для удаления кислых газов мокрой системы газоочистки меньше, чем для систем с сухим (8,5%) и полусухим реактором (52,1%).

Тем не менее, расход реагентов для системы с сухим реактором меньше, чем для систем с полусухим реактором, что не соответствует теоретическим данным и, вероятно, связано с химическим составом утилизируемых ТКО, различиями технических решений, примененных на ТЭС.

Максимальный расход реагентов для установок с DSI и SemiWS на 27,3% выше, чем максимальный зафиксированный расход на установках с WS.

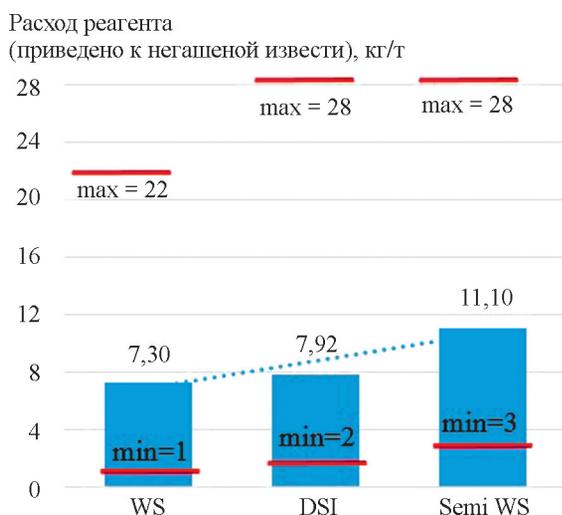


Рис. 10. Расход щелочного реагента в системе газоочистки (по негашеной извести)

Распространенность технологий

Технологические схемы газоочистки непрерывно модернизируются. Наличие опыта эксплуатации [8, 10] позволило производителям предлагать на рынке более экономичные решения, а анализ зависимости между годом ввода объекта в эксплуатацию и примененной системой газоочистки — определить тенденцию о частоте применения различных схем удаления кислых газов. Зависимость между годом ввода ТЭС на ТКО в эксплуатацию и применяемой системой газоочистки в исследуемой группе, приведенная на рис. 11, доказывает, что на объектах, построенных до 2000 г., мокрая система газоочистки применялась в 52,7% случаев. Для объектов, построенных после 2006 г., характерны сухая и полусухая системы (79,1%).

Зависимость, полученная при изучении максимальных суточных концентраций HCl , HF , SO_x в ДГ ТЭС на ТКО различных годов ввода в эксплуатацию и изображенная на рис. 12, продемонстрировала тенденцию к увеличению концентрации загрязнителей в дымовых газах для вновь строящихся объектов, что хорошо коррелируется с данными относительно сокращения количества вновь вводимых объектов с мокрой системой газоочистки и сведениями о показателях работы различных систем газоочистки.

Накопленный поставщиками оборудования опыт применения технологий удаления кислых газов в странах ЕС привел к тому, что для вновь строящихся объектов стала реже предлагаться система мокрой газоочистки, вероятно с целью сокращения CAPEX и OPEX, а также в связи с увеличением освоенности сухой и полусухой методик, показывающих хорошие результаты по очистке ДГ кислых газов и на подавляющем большинстве установок не превышающих ПДК.

Заключение

Таким образом, у всех работающих на современных объектах термического обезвреживания отходов систем газоочистки в среднем показатели по выбро-

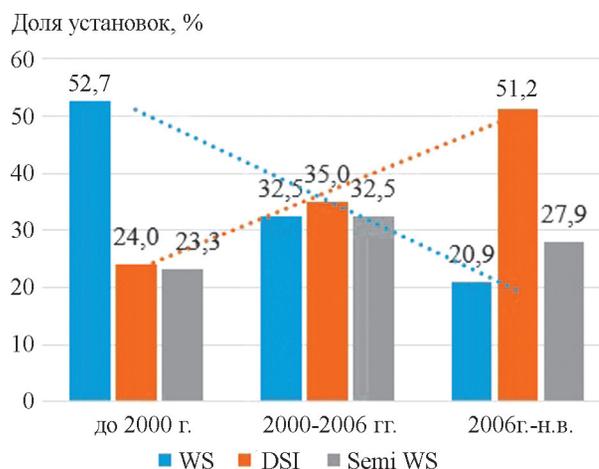


Рис. 11. Распространенность систем газоочистки в зависимости от года ввода объекта в эксплуатацию

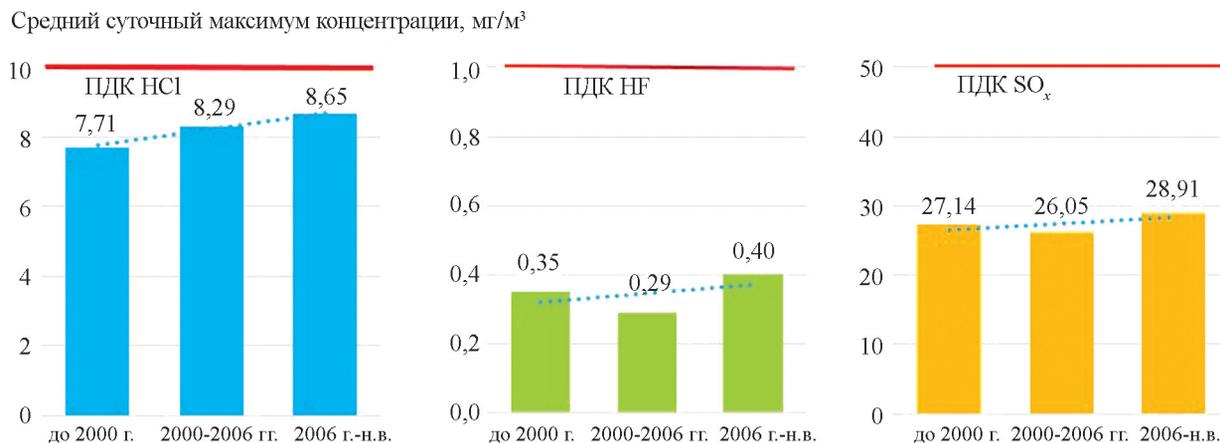


Рис. 12. Максимальные суточные кислотных газов в ДГ ТЭС на ТКО разных годов строительства

сам кислотных газов HCl, HF, SO_x находятся в пределах ПДК. Среди рассмотренных систем имеются ТЭС на ТКО, выбросы от которых превышают ПДК. В отчетах [8, 10] указано, что превышения зачастую связаны с нештатными режимами работы предприятия.

Сделаны выводы, которые могут быть использованы при выборе системы очистки ДГ от кислотных газов:

- системы с мокрым реактором WS имеют лучшие показатели по удалению HCl и HF в сравнении с остальными, также по удалению SO_x в среднем по году;
- показатели очистки ДГ от кислотных газов для систем с сухим и полусухим реакторами сопоставимы (удаление HCl и SO_x лучше на установках с сухим, а удаление HF — с полусухим реакторами);
- расход реагентов для систем с мокрым реактором ниже чем для остальных систем, и реагент не переходит в золовые отходы ТЭС на ТКО, а удаляется системой очистки сточных вод, что сокращает объем образующейся золы;

Литература

1. **Территориальная схема** обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами Московской области. Красногорск, 2016.
2. **Информационно-технический справочник** по наилучшим доступным технологиям. Обезвреживание отходов термическим способом (сжигание отходов). М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2015.
3. **Дыган М.М.** Экологическая безопасность мусоросжигающих заводов при переменной мощности по сжиганию твердых бытовых отходов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2012.
4. **Тугов А.Н.** Исследование процессов и технологий энергетической утилизации бытовых отходов для разработки отечественной ТЭС на ТБО: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2012.
5. **Тугов А.Н., Тумановский А.Г., Москвичев В.Ф.** Опыт ВТИ по сжиганию твердых бытовых отходов в слоевых топках // Горение твердого топлива: Материа-

- на современных объектах по термическому обезвреживанию ТКО все чаще устанавливают системы сухой и полусухой очистки ДГ от кислотных газов, что связано с удовлетворительными показателями работы, низкими CAPEX и OPEX.

При строительстве ТЭС на ТКО в условиях городской застройки и стремлении к минимизации валовых выбросов кислотных газов в атмосферный воздух может быть рекомендована система с мокрым реактором, обеспечивающая низкие выбросы HF, HCl, SO_x. Она позволит сократить валовые выбросы вредных веществ при строительстве ТЭС на ТКО большой производительности.

При эксплуатации ТЭС на ТКО средней мощности (до 350000 т. ТКО в год) могут быть рекомендованы полусухой и сухой реакторы, при этом наибольшее предпочтение следует отдавать технологии с полусухим реактором, как наиболее перспективной [4].

References

1. **Territorial'naya Skhema** Obrashcheniya s Otkhodami, v Tom Chisle s Tverdymi Kommunal'nymi Otkhodami Moskovskoy Oblasti. Krasnogorsk, 2016. (in Russian).
2. **Informatsionno-tekhnicheskii Spravochnik** po Nailuchshim Dostupnym Tekhnologiyam. Obvezvrezhivanie Otkhodov Termicheskim Sposobom (Szhiganiye Otkhodov). M.: Federal'noe Agentstvo po Tekhnicheskomu Regulirovaniyu i Metrologii, 2015. (in Russian).
3. **Dygan M.M.** Ekologicheskaya Bezopasnost' Mусoroszhigatel'nykh Zavodov pri Peremennoy Moshchnosti po Szhiganiyu Tverdyykh Bytovyykh Otkhodov: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M., 2012. (in Russian).
4. **Tugov A.N.** Issledovanie Protssessov i Tekhnologiy Energeticheskoy Utilizatsii Bytovyykh Otkhodov dlya Razrabotki Otechestvennoy TES na TBO: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M., 2012. (in Russian).
5. **Tugov A.N., Tumanovskiy A.G., Moskvichev V.F.** Opyt VTI po Szhiganiyu Tverdyykh Bytovyykh Otkhodov v Sloevyykh Topkakh. Gorenije Tverdogo Topliva: Materialy

лы VIII Всеросс. конф. М.: Институт теплофизики СО РАН, 2012. С. 98.1—98.86.

6. **Wood S. e. a.** Review of State-of-the-Art Waste-to-Energy Technologies. Stage Two — Case Studies. Perth: Waste Management Branch, 2013.

7. **Warren K. e. a.** Waste to Energy Background Paper. Morrison Hershfield Ltd, 2013.

8. **Neuwahl F.G.C.** Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration. Joint Research Centre, 2019.

9. **Тугов А.Г.** Предварительная оценка содержания серы и хлора в исходном ТБО (ТЛ-1 спецзавод № 4 «Руднево»). М.: ОАО «ВТИ», 2004.

10. **Kushiro** Association of Waste Incineration Facilities. Mitsubishi HI, Kushiro, 2017

11. **Waste to energy.** Necessity and Expected effects of Waste to Energy Business. Busan: Posco Energy, 2015.

VIII Vseross. Konf. M.: Institut Teplofiziki SO RAN, 2012:98.1—98.86. (in Russian).

6. **Wood S. e. a.** Review of State-of-the-Art Waste-to-Energy Technologies. Stage Two — Case Studies. Perth: Waste Management Branch, 2013.

7. **Warren K. e. a.** Waste to Energy Background Paper. Morrison Hershfield Ltd, 2013.

8. **Neuwahl F.G.C.** Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration. Joint Research Centre, 2019.

9. **Tugov A.G.** Predvaritel'naya Otsenka Soderzhaniya Sery i Khlora v Iskhodnom TBO (TL-1 Spetszavod № 4 «Rudnevo»). M.: ОАО «ВТИ», 2004. (in Russian).

10. **Kushiro** Association of Waste Incineration Facilities. Mitsubishi HI, Kushiro, 2017

11. **Waste to energy.** Necessity and Expected effects of Waste to Energy Business. Busan: Posco Energy, 2015.

Сведения об авторах:

Ефремов Антон Николаевич — аспирант кафедры тепловых электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: anefremow@mail.ru

Дудолин Алексей Анатольевич — кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой тепловых электрических станций НИУ «МЭИ», e-mail: DudolinAA@mpei.ru

Information about authors:

Efremov Anton N. — Ph.D.-student of Thermal Power Plants Dept., NRU MPEI, e-mail: anefremow@mail.ru

Dudolin Aleksey A. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor, Deputy Head of Thermal Power Plants Dept., NRU MPEI, e-mail: DudolinAA@mpei.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 21.09.2020

The article received to the editor: 21.09.2020