



Оригинальная статья

УДК 504.06

DOI 10.17073/0368-0797-2022-5-365-373

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2311>



БЕЗОТХОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ: ФОРМИРОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ СТРУКТУР СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

А. К. Соколов

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина (Россия, 153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34)

Аннотация. Техническую и технологическую базу безотходных технологий в основном представляют системы защиты окружающей среды (СЗОС), которые позволяют организовать рециклинг отходов в техносферу, а не загрязнять ими окружающую среду. В статье дан краткий обзор работ, посвященных методам и технологиям утилизации отходов черной металлургии. Показано, что простые схемы, в которых не организованы взаимосвязи между устройствами защиты окружающей среды от твердых, жидких и газообразных отходов, не могут обеспечить необходимую степень безотходности производства. Высокую степень безотходности в общем случае могут создать только комплексные многостадийные, многоуровневые системы переработки сырья и утилизации отходов, включающие устройства и технологии обработки потоков отходов в различных фазовых состояниях. Проектирование таких систем должно начинаться со стадии описания выходных потоков веществ и энергии из технологических установок и формирования вариантов структур, принципов действия (технологий) и оборудования (устройств) элементов системы, из которых будет выбираться оптимальный вариант. Цель оптимизации системы защиты – минимизация массы отходов, направляемых в окружающую среду, обеспечивая экологическую и производственную безопасность с учетом технико-экономических ограничений на возможность реализации выбранной структуры СЗОС. Предложена процедура формирования структуры системы, включающей производство, устройства защиты окружающей среды, природную (окружающую) среду. Взаимосвязи между элементами системы представлены потоками энергии и масс веществ. Приведен пример организации структуры системы, включающей взаимосвязанные подсистемы обработки (очистки, обезвреживания и др.) газов, сточных вод и твердых отходов. Отмечено, что на выходе устройств СЗОС в общем случае могут сформироваться выходные потоки веществ, которые в зависимости от их свойств (опасности, полезности и фазового состояния) могут быть направлены в окружающую среду, в устройства защиты следующего уровня (ступени), а также в производство для замещения сырья или получения продукции. Рассмотрен пример организации структуры комплексной многоступенчатой и многоуровневой системы защиты окружающей среды от выбросов, включающей подсистемы отработки вторичных отходов в газообразном, жидком и твердом состояниях. Предложенная процедура формирования структур систем защиты окружающей среды может применяться для других отраслей производства.

Ключевые слова: безотходность производства, экологическая безопасность, комплексные системы защиты окружающей среды, системный анализ, формирование структуры, взаимосвязи, обработка потока веществ

Для цитирования: Соколов А.К. Безотходные технологии: формирование многоуровневых структур систем защиты окружающей среды // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 5. С. 365–373. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-365-373>

Original article

ZERO-WASTE TECHNOLOGIES: FORMATION OF MULTILEVEL STRUCTURES OF ENVIRONMENTAL PROTECTION SYSTEMS

A. K. Sokolov

Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin (34 Rabfakovskaya Str., Ivanovo 153003, Russian Federation)

Abstract. Zero-waste technologies are technically and technologically based mainly on environmental protection systems (EPS). Such systems help to arrange waste recycling into the technosphere rather than polluting the environment. The article gives a brief review of the methods and technologies of ferrous metallurgy waste recycling. Simple patterns in which the interrelations between devices for environmental protection against solid, liquid and gaseous wastes are not arranged, cannot provide the necessary level of zero-waste production. Only integrated multistage, multilevel systems of raw materials processing and waste recycling, including devices and technologies for processing of waste flows in various phase states, can create a high degree of zero-waste production. The design of such systems starts with the description of outgoing substances and energy flows from process plants, the formation of structural variants, operating principles (technologies) and equipment (devices) of system components. It is from these that the optimal variant will be chosen. The purpose of optimizing a protection system is to minimize the mass of waste sent into the environment. This

provides for environmental and industrial safety, and takes into account the technical and economic constraints on the possibility of implementing the selected EPS structure. The study proposes a procedure for forming the structure of the system, including production, environmental protection devices, and the natural environment. Interrelations between the system components are represented by energy flows and masses of substances. The study also proposes an example of arranging the system structure including interrelated subsystems for processing (treatment, decontamination, etc.) of gases, wastewater and solid waste. EPS devices in general can form outgoing flows of substances, which, depending on their properties (hazard, usefulness and phase state), can be directed to the environment, to the next level (stage) protection devices, as well as to production for replacing raw materials or obtaining products. An example of organizing the structure of an integrated multistage and multilevel system of environmental protection against emissions, including subsystems for treating secondary waste in gaseous, liquid and solid states, is considered. The proposed procedure for forming the environmental protection system structures can be applied to other industries.

Keywords: zero-waste production, environmental safety, integrated environmental protection system, system analysis, structure formation, relations, substance flow processing

For citation: Sokolov A.K. Zero-waste technologies: formation of multilevel structures of environmental protection systems. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 5, pp. 365–373. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-5-365-373>

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение экологической безопасности России и всего мирового сообщества считается одной из важнейших задач современности. Повышение уровня защиты окружающей среды позволит отдалить время наступления неизбежной экологической катастрофы. Одним из основных направлений работ по снижению воздействий на окружающую среду является проектирование, создание и использования безотходных (зеленых) технологий, которые позволяют возвращать часть отходов в сферу производства или потребления, снижая загрязнение окружающей среды и изъятие природных ресурсов.

Основу технической базы безотходных, энерго- и ресурсосберегающих технологий представляют системы защиты окружающей среды (СЗОС).

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ОТХОДОВ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Металлургическая отрасль относится к числу крупнейших потребителей ресурсов и источников отходов, загрязняющих окружающую (природную) среду. Поэтому работы по повышению уровня экологичности металлургических технологий особенно актуальны.

Общие характеристики негативных воздействий металлургических предприятий и анализ экологических проблем, вызванных воздействиями на природную среду и людей даны в работах [1 – 5]. Исследования и рекомендации по решению экологических проблем проводятся по нескольким направлениям.

Многообразие отходов черной металлургии и других отраслей не позволяет в рамках одной научной работы или статьи дать полный анализ методов глубокой утилизации отходов, которые обеспечили бы безотходность производств. Поэтому в значительной части известных научных работ рассматриваются частные случаи применения технологий для переработки, обезвреживания твердых отходов, очистки газов и сточных вод, а также мероприятий по ресурсо- и энергосбережению.

Все отходы черной металлургии по фазовому состоянию подразделяются на три группы: твердые, жидкие и газообразные.

Методы и технологии утилизации твердых отходов (в основном шлаков) предложены в работах [1, 5, 6 – 15].

В работах [6, 11, 15] приведены обзоры публикаций по оценке экологических проблем и методам переработки отходов. Технологии использования сталеплавильных шлаков для получения строительных растворов описаны в публикациях [7, 12, 13]. Вопросы утилизации шлаков черной металлургии при рекультивации промышленных отвалов отходов рассмотрены в работах [8, 9]. В статье [10] приведены результаты исследования по разработке циклической технологии утилизации твердых отходов доменного, конвертерного и мартеновского производств с попутным извлечением и регенерацией цинка. На возможность интегрирования отходов горнодобывающей и металлообрабатывающей промышленности в единое целое указано в статье [14].

Мероприятия по решению экологических проблем, вызванных организованными и неорганизованными выбросами, разработаны и описаны в работах [16 – 21].

Технологии утилизации и процессы очистки сточных вод металлургической промышленности рассмотрены в публикациях [22 – 24].

Простые схемы, в которых не организованы взаимосвязи между устройствами защиты окружающей среды от твердых, жидких и газообразных отходов, не могут обеспечить высокую степень безотходности. Например, при «мокрой» очистке выбросов от пыли образуется шлам, для которого требуется утилизация воды и осадка. Для соблюдения принципа безотходности производства, а на первых этапах малоотходного производства, необходима разработка комплексных систем утилизации отходов.

На актуальность комплексной переработки отходов и техногенных образований обращается внимание в работе [1]. В работе [25] указано на необходимость соблюдения системных принципов организации современных производств. Естественно, для системного решения экологических проблем требуется разработка и использование множества технологий [1].

Принцип комплексного подхода применяется для оценки экологических аспектов комплекса воздействий металлургических предприятий [22], комплексного предотвращения и контроля загрязнения [24] окружаю-

щей среды, а также для утилизации твердых отходов предприятий черной металлургии [6, 7, 10].

В общем случае комплексные безотходные системы переработки сырья и утилизации отходов должны разделять потоки веществ не только по составу, свойствам, фракциям и фазовому состоянию компонентов, но и осуществлять последующую их обработку. В устройствах для разделения потоков реализуются физико-химические, термические, механические, химические, биохимические и другие методы и технологии. В справочном документе Европейского союза [24] по наилучшим доступным технологиям для обработки отходов с различными физико-химическими свойствами (твердых и пастообразных, жидких и газовых) приведено их описание. Обзор некоторых технологий и области их применения в черной металлургии представлен в работах [2, 22, 26 – 28].

Оптимальное проектирование систем защиты окружающей среды с выбором наилучших технологий целесообразно выполнять с помощью программных средств. В статье [28] обоснована необходимость создания системы информационного обеспечения для применения наиболее эффективных технологий и предложена структура объединенной информационно-аналитической системы ОАИС с «Атласом наилучших природоохранных технологий».

Таким образом, принцип безотходности в общем случае может быть реализован только в комплексных многоуровневых системах переработки сырья и утилизации отходов, включающих устройства и технологии различного назначения.

В ГОСТ Р 57702–2017 [29] указано на необходимость соблюдения принципов системности и комплексности, а «конечной целью стоит считать оптимизацию производства одновременно по энерготехнологическим, экономическим и экологическим параметрам».

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ МНОГУРОВНЕВЫХ СТРУКТУР СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Ограничимся рассмотрением систем утилизации отходов производства, которые принято относить к системам защиты окружающей среды. Проектирование таких систем должно начинаться со стадии описания выходных потоков веществ и энергий технологических и теплоэнергетических установок. В зависимости от свойств потоков, которые могут оказать недопустимое воздействие на окружающую среду, должны формироваться варианты структур и принципов действия (технологий), оборудования (устройств) элементов системы, из которых будет найден оптимальный вариант. В качестве примера решения такой задачи может быть использован алгоритм пятиуровневой оптимизации структур, принципов действия, конструктивных и режимных параметров при оптимальном проектировании отделения нагревательных печей [30].

Системный подход к проектированию технологий обработки отходов позволит более эффективно решать задачи снижения опасности отходов и более широко использовать вторичные энергетические (ВЭР) и материальные ресурсы (ВМР). Комплексная, многоуровневая и более глубокая обработка потоков веществ с учетом изменения их фазового состояния в системах защиты окружающей среды позволит повысить степень безотходности производств. Известно, что чем шире постановка задачи оптимального проектирования, тем больший эффект может быть получен при реализации объекта. С другой стороны, наибольший ущерб природе и обществу доставляют системные ошибки, вызванные отсутствием целостного анализа системных взаимосвязей производства – систем защиты окружающей среды – природной среды.

Системное представление важно для общего понимания структур и функционального назначения элементов систем защиты окружающей среды и выявления возможностей более полной утилизации отходов.

В статье предлагается процедура формирования структуры системы, включающей: производство, устройства защиты окружающей среды, а также природную (окружающую) среду.

Сложную структуру такой системы целесообразно формировать по известному принципу «сверху – вниз» или от «общего к частному», представляя взаимосвязи между элементами системы потоками веществ и энергии.

Для удобства описания сложной структуры системы защиты окружающей среды будут использоваться следующие термины: «обработка», «ступень» и «уровень» обработки.

Под обработкой будем понимать любую технологическую операцию [24]: очистку, обжиг, осаждение веществ и т. п.

Ступенями обработки принято называть функции устройств, через которые последовательно проходит поток веществ, не изменяющий фазового состояния. Например, смеситель, аэротенк и отстойник, осуществляющие ступени обработки для сточных вод.

Уровнем обработки можно считать функции устройства, в которое попадает поток с другим фазовым состоянием вещества, чем основной поток, обрабатываемый в предыдущем устройстве. Например, обработка шлама после устройства «мокрой» очистки аэрозоль – это следующий уровень обработки потока.

Рассмотрим назначение основных материальных и энергетических потоков, связывающих подсистемы защиты окружающей среды с производством и природной средой (рис. 1). Каждая подсистема защиты может включать элементы, осуществляющие ступени или уровни обработки потоков. Подсистемы защиты атмосферы, гидросферы, литосферы обрабатывают потоки газов, жидкостей и твердых веществ соответственно.

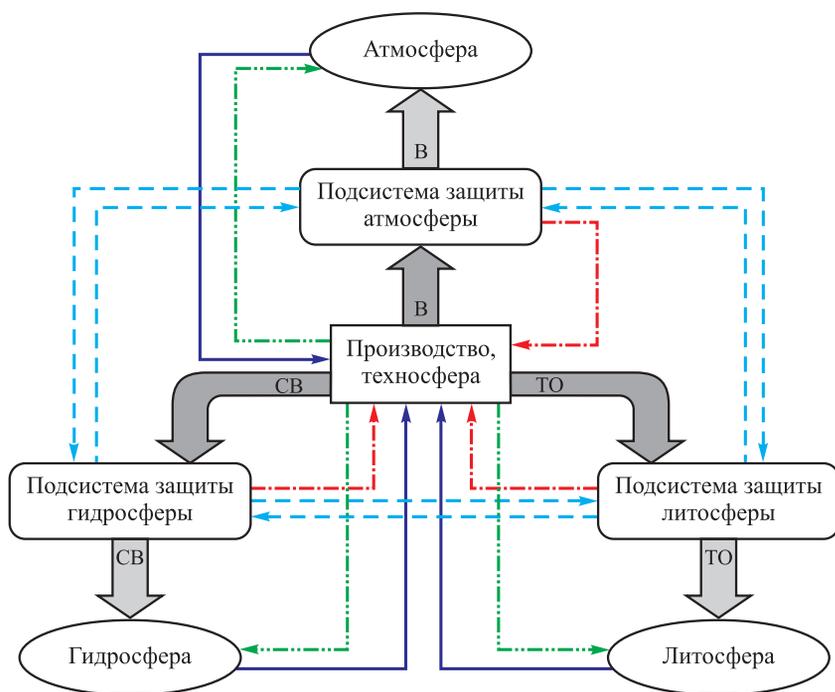


Рис. 1. Структура и взаимосвязи в системе производство – устройства защиты окружающей среды – природная среда:

В – выбросы; СВ – сточные воды; ТО – твердые отходы;

--- вторичные отходы; --- первичные безопасные отходы; — ресурсы; --- вторичные материальные и энергетические ресурсы; ← — очищенные и обезвреженные потоки СЗОС; ← — потоки отходов вредных и опасных веществ

Fig. 1. Structure and interrelations in the system production – environmental protection devices – natural environment:

B – emissions; CB – wastewater; TO – solid waste;

--- secondary waste; --- primary non-hazardous waste; — resources; --- secondary material and energy resources (SMR) and (SER); ← — purified neutralized streams of EPS; ← — streams of harmful and hazardous substances

Сфера производства и потребления (часть техносферы) использует природные ресурсы (сплошные линии) атмосферы, литосферы и гидросферы и возвращает в природную среду потоки первичных «безопасных» отходов (пунктирная линия с двумя точками), которые не требуют специальной обработки. Такие отходы рассеиваются в атмосферном воздухе, сбрасываются в водоемы, размещаются, например, в отвалах.

Потоки первичных отходов производства (выбросы, сточные воды, твердые отходы), которые требуют специальной обработки, направляются в соответствующие подсистемы защиты атмосферы, литосферы и гидросферы (входные потоки СЗОС, темные стрелки). Кроме первичных отходов в подсистемы защиты могут поступать вторичные отходы (второго уровня или ступени защиты), выделенные другими типами подсистем защиты (пунктирные линии). Например, в подсистему защиты атмосферы могут поступать газы из подсистем защиты литосферы и гидросферы, которые способны образоваться при термической обработке жидких и твердых отходов.

Выходные потоки подсистем защиты (см. рис. 1, светлые стрелки) включают потоки очищенных или обработанных отходов, направляемых соответственно в атмосферу, литосферу и гидросферу (основные потоки обработанных отходов), а также потоки вторичных

отходов, направляемых в производство в виде вторичных энергетических и материальных ресурсов (ВЭР и ВМР, штрихпунктирные линии) и (или) на следующий уровень обработки отходов (пунктирные линии).

На рис. 2 более детально изображены входные и выходные потоки подсистем защиты окружающей среды и дано описание их функционального назначения. Условно не показан поток в окружающую среду, который может миновать СЗОС. Этот поток может включать полезные и/или безопасные вещества, которые не целесообразно обрабатывать. На схеме показано, что структура выходных потоков СЗОС формируется в зависимости от количества и свойств веществ, входящих в состав первичных отходов (входной поток СЗОС – I).

Входные потоки подсистем защиты (первичные отходы в виде газов, жидкостей, твердых веществ металлургических предприятий или и других техносферных объектов) могут включать (см. рис. 2):

- опасные и вредные вещества;
- полезные вещества;
- безопасные вещества.

В подсистемах защиты окружающей среды должно произойти разделение веществ с учетом их свойств: степени опасности, количества и фазового состояния. После разделения потока первичных отходов в общем случае могут сформироваться четыре выходных потока

веществ из подсистем защиты первого уровня или ступени (СЗОС – I).

I – первый (основной) поток, прошедший очистку или обработку и не изменивший фазового состояния, направляется в окружающую среду. В состав этого потока могут входить экологически безопасные вещества:

- опасные и вредные вещества, но в безопасных количествах (например, выбросы, не превышающие предельно допустимых значений);
- полезные вещества;
- безопасные вещества, которые по техническим или экономическим причинам не целесообразно отделять от потока, направляемого в окружающую среду.

Вещества этого потока в зависимости от фазового состояния рассеиваются в атмосферном воздухе (газы), разбавляются водой водоемов (сбросы), направляются на свалки, в отвалы, накопители и другие объекты для хранения твердых отходов.

II – второй поток, в состав которого входят экологически безопасные вещества, уловленные подсистемами защиты первого уровня (СЗОС – I), может также направляться в окружающую среду. В отличие от первого потока, этот поток имеет другое фазовое состояние, например, твердые частицы из устройств очистки газов от пыли, или из устройств биохимической очистки сточных вод и т. п.

III – третий поток составляют опасные и вредные вещества, уловленные подсистемами защиты первого уровня (СЗОС – I). Этот поток или потоки должны направляться в подсистемы защиты второго уровня или второй ступени (СЗОС – II).

IV – четвертый поток формируют уловленные СЗОС – I опасные, вредные и полезные вещества, кото-

рые могут быть использованы для получения продукции в производстве, в котором образовались первичные отходы (например, металлическая или цементная пыль), или ином производстве (например, осадок или при очистке сточных вод от органики, красный шлам – отход цветной металлургии, который используется как сырье в черной металлургии).

Обратим внимание, что вторичные отходы СЗОС в общем случае могут иметь другое фазовое состояние по сравнению с первичными отходами. Таким образом, подсистемы защиты окружающей среды от газообразных, жидких и твердых отходов в общем случае должны быть взаимосвязаны, т. е. представлять единую систему, включающую несколько уровней защиты. Пример структуры такой комплексной подсистемы защиты приведен на рис. 3, где показана схема организации многоступенчатой и многоуровневой защиты окружающей среды только от выбросов (первичных отходов).

Загрязненные выбросы направляются в подсистему защиты атмосферного воздуха, в которой производится очистка газового потока из технологических установок (агломерационных машин, кислородных конвертеров и др.) с использованием энергии, химических реагентов, воды или других ресурсов (входные потоки СЗОС). На выходе подсистемы защиты атмосферы в общем случае возможно образование еще четырех потоков (вторичных отходов и вторичных материальных и энергетических ресурсов), краткое описание которых дано выше (см. рис. 2).

Удаляемые из смеси газов вещества могут быть в газообразном (продукты термической обработки (дожигания)), твердом (пыль), жидком (растворы) состоя-

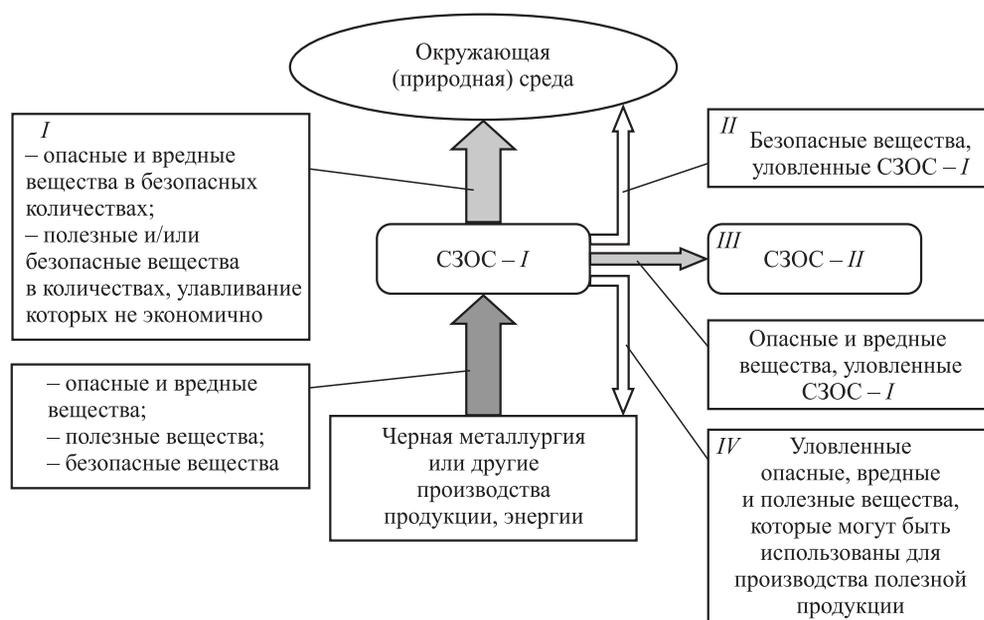


Рис. 2. Входные и выходные потоки подсистем защиты окружающей среды и их свойства, определяющие направление их использования

Fig. 2. Input and output flows of environmental protection subsystems and their properties determining the direction of their use

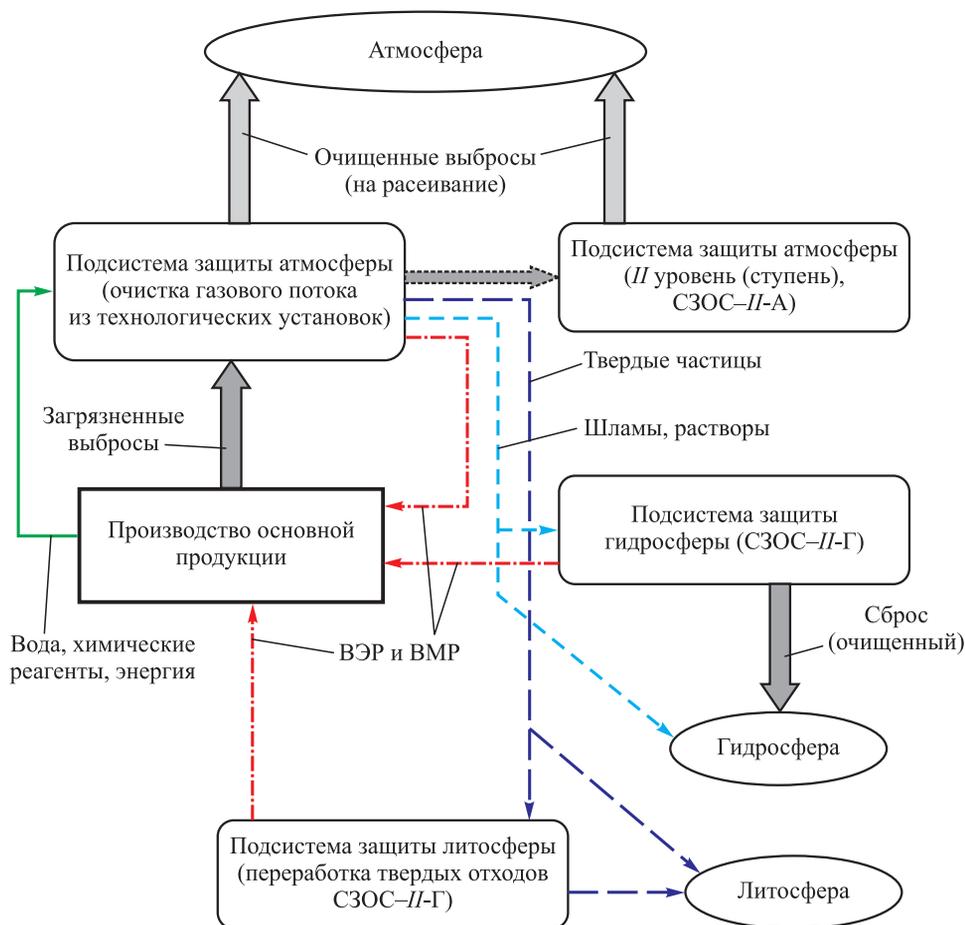


Рис. 3. Структура и взаимосвязи в многоступенчатых и многоуровневых подсистемах защиты окружающей среды (первичный отход – выбросы)

Fig. 3. Structure and interrelations in multistage and multilevel environmental protection subsystems (primary waste – emissions)

нии или в виде шлама (концентрированная взвесь твердых частиц в жидкости).

Газообразные вторичные отходы, не соответствующие требованиям безопасности, передаются на II ступень подсистемы защиты атмосферы от вредных газов (СЗОС-II-A).

Уловленные твердые и жидкие отходы, если они соответствуют требованиям экологической безопасности и не относятся к ВМР и ВЭР, направляются (штриховая линия) непосредственно в гидросферу или литосферу. В противном случае они должны направляться в устройства обработки (очистки, переработки) твердых и жидких отходов, т. е. в подсистемы защиты литосферы и гидросферы второго уровня (СЗОС-II-Г и СЗОС-II-Л).

В общем случае в подсистемах защиты атмосферы, литосферы и гидросферы, показанных на рис. 3, могут образоваться отходы, для которых потребуются соответствующие подсистемы защиты третьего, четвертого и более уровней. Из этих подсистем возможен выход четырех видов потоков (см. рис. 2). Важно отметить, что для реализации средств защиты должны рассматриваться различные варианты технологий, описанных,

например, в [24]. Многообразие сформированных вариантов систем защиты позволит повысить эффективность оптимального проектирования.

Объем (масса) отходов, переходящих на последующий уровень или ступень обработки, как правило, уменьшается. При этом в некоторых случаях последующие ступени очистки могут потребовать более сложных устройств. Например, крупные частицы в аэрозолях хорошо улавливаются простыми устройствами очистки, а для улавливания мелких частиц в СЗОС-II (вторая ступень) потребуются более сложные конструкции устройств с более высокими скоростями газов и распылением воды (например, скоростные газопромыватели с трубами Вентури).

В общем случае подсистема защиты атмосферы (см. рис. 1) может использоваться как следующий уровень очистки газов, поступающих из подсистем защиты гидросферы и литосферы, в которых в качестве вторичных отходов возможно образование газов.

Процессы очистки сточных вод могут сопровождаться не только образованием очищенных сбросов, но и образованием вторичных твердых отходов и газов (например, при термическом обезвреживании).

Обработка и утилизация твердых отходов в подсистемах защиты литосферы (см. рис. 1) также может привести к образованию вторичных отходов в виде газов (продуктов сгорания или разложения) или сточных вод.

Таким образом, в подсистему очистки выбросов возможно поступление потоков газов из подсистем обработки сбросов и твердых отходов (на рис. 3 они не показаны).

Обратим внимание, что подсистемы защиты гидросферы и литосферы, показанные на рис. 1, могут иметь в принципе аналогичные многоуровневые и многоступенчатые структуры, которые приведены на рис. 3 для выбросов.

Комплексные СЗОС могут включать несколько производственных отраслей. Например, шлаки черной металлургии используются в производстве строительных материалов и даже изделий из хрусталя. Поиск потребителей отходов целесообразно выполнять с помощью информационных подсистем, которые сопоставят информацию об отходах производства и потребления с данными о свойствах сырья и материалов потребителей ресурсов.

В идеальном оптимальном варианте системы защиты должны минимизировать массу отходов, направляемых в окружающую среду, обеспечивая экологическую и производственную безопасность. Естественно, при выборе вариантов структур СЗОС необходимо учитывать следующие ограничения:

- технические возможности реализации выбранной структуры системы защиты окружающей среды (наличие технологий и устройств переработки отходов на рынке);
- технико-экономическую целесообразность принятой системы защиты окружающей среды.

В заключение отметим, что формирование структур и оптимальное проектирование СЗОС являются лишь

частью более общей задачи. В ГОСТ Р 57702 – 2017 (п. 5.4.1) [29] указано, что «принцип системности, лежащий в основе создания безотходных производств, должен учитывать существующую и усиливающуюся взаимосвязь и взаимозависимость производственных, социальных и природных процессов».

Выводы

Простые схемы, в которых не организованы взаимосвязи между устройствами защиты окружающей среды от твердых, жидких и газообразных отходов, не могут обеспечить высокую степень безотходности производства. В общем случае принцип безотходности может быть реализован только в комплексных многоуровневых системах переработки сырья и утилизации отходов, включающих устройства и технологии различного назначения. Необходимым этапом решения задачи оптимального проектирования безотходных систем является формирование вариантов структур СЗОС. Предложено общее описание структуры системы, включающей: производство, подсистемы устройства защиты окружающей среды, природную (окружающую) среду и их взаимосвязь в виде потоков веществ и энергии. Отмечено, что на выходе устройств СЗОС в общем случае могут сформироваться потоки веществ, которые в зависимости от их свойств будут направлены в окружающую среду, в устройства защиты следующего уровня (ступени), а также в производство для замещения сырья или получения продукции. Системный подход к формированию вариантов реализации систем защиты окружающей среды позволит повысить эффективность их оптимального проектирования и степень безотходности производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Леонтьев Л.И., Дюбанов В.Г. Техногенные отходы черной и цветной металлургии и проблемы окружающей среды // Экология и промышленность России. 2011. № 4. С. 32–35.
2. Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Ходоровская И.Ю. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии / Под редакцией Ю.Г. Ярошенко. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. 670 с.
3. Рогожников Д.А., Шопперт А.А., Логинова И.В. Экологические проблемы металлургического производства. Часть 1: Учебное пособие. Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2017. 224 с.
4. Глушакова О.В., Черникова О.П. Влияние предприятий черной металлургии на качество атмосферного воздуха как экологической составляющей устойчивого развития территорий. Сообщение 2 // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 8. С. 561–571. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-561-571>
5. Большая Е.П. Экология металлургического производства: Курс лекций. Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2012. 155 с.
6. Ferronato N., Torretta V. Waste mismanagement in developing countries: A Review of Global Issues // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019. Vol. 16. No. 6. Article 1060. <http://doi.org/10.3390/ijerph16061060>
7. Шешуков О.Ю., Егизарьян Д.К., Лобанов Д.А. Безотходная переработка ковшевого и электропечного шлака // Известия вузов.
1. Leont'ev L.I., Dyubanov V.G. Technogenic waste of ferrous and non-ferrous metallurgy and environmental problems. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2011, no. 4, pp. 32–35. (In Russ.).
2. Yaroshenko Yu.G., Gordon Ya.M., Khodorovskaya I.Yu. *Energy-Efficient and Resource-Saving Technologies of Ferrous Metallurgy*. Yaroshenko Yu.G. ed. Yekaterinburg: Izdatel'stvo UIPTs, 2012, 670 p. (In Russ.).
3. Rogozhnikov D.A., Shoppert A.A., Loginova I.V. *Environmental Problems of Metallurgical Production. Part 1: Manual*. Yekaterinburg: Izdatel'stvo UMTs UPI, 2017, 224 p. (In Russ.).
4. Glushakova O.V., Chernikova O.P. Influence of ferrous metallurgy enterprises on atmospheric air quality as an ecological component of territories sustainable development. Report 2. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 8, pp. 561–571. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-561-571>
5. Bol'shina E.P. *Ecology of Metallurgical Production: Lectures*. Novotroitsk: NUST MISiS, 2012, 155 p. (In Russ.).
6. Ferronato N., Torretta V. Waste mismanagement in developing countries: A Review of global issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019, vol. 16, no. 6, article 1060. <http://doi.org/10.3390/ijerph16061060>
7. Sheshukov O.Yu., Egiazar'yan D.K., Lobanov D.A. Wasteless processing of ladle furnace and electric arc furnace slag. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 8, pp. 561–571. (In Russ.).

- Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 3. С. 192–199.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-192-199>
8. Беланов И.П., Наумова Н.Б., Семина И.С., Савенков О.А. Шлаки металлургического производства – перспективный материал для рекультивации техногенных отходов // Известия вузов. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 12. С. 987–992.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-12-987-992>
 9. Водолеев А.С., Андроханов В.А., Бердова О.В., Юмашева Н.А., Черданцева Е.С. Экологически безопасная консервация отходов железорудного обогащения // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 10. С. 792–797.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-10-792-797>
 10. Баркан М.Ш., Березовский П.В. Технологические и эколого-экономические аспекты утилизации твердых отходов предприятий черной металлургии // Экология и промышленность России. 2011. № 7. С. 48–51.
 11. Skaf M., Manso M.J., Aragon A., Fuente-Alonso J.A., Ortega-López V. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use // Resources, Conservation and Recycling. 2017. Vol. 120. P. 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.009>
 12. Tsakiridis P.E., Papadimitriou G.D., Tsvivilis S., Koroneos C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production // Journal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 152. No. 2. P. 805–811.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.093>
 13. Santamaría A., Rojí E., Skaf M., Marcos I., Gonzalez J.J. The use of steelmaking slags and fly ash in structural mortars // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 106. P. 364–373.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.121>
 14. Duan W., Yu Q., Wang Z. Comprehensive analysis of the coal particle in molten blast furnace slag to recover waste heat. Energy and Fuels. 2017. Vol. 31. No. 8. P. 8813–8819.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b01610>
 15. Matinde E., Simate G.S., Ndlovu S. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018. Vol. 118. No. 8. P. 825–844. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5>
 16. Горбатюк С.М., Макаров П.С., Сухорукова М.А. К вопросу об экологической эффективности газоочистки и золоулавливания в горно-металлургической отрасли РФ // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Том 63. № 6. С. 451–457.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-6-451-457>
 17. Глушакова О.В., Черникова О.П. Влияние предприятий черной металлургии на качество атмосферного воздуха как экологической составляющей устойчивого развития территорий. Сообщение 1 // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 292–301. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-292-301>
 18. Симонян Л.М., Демидова Н.В. Изучение поведения диоксинов и фуранов в процессе удаления цинка и свинца из пыли ДСП // Известия вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 11. С. 840–845. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-11-840-845>
 19. Huang Y., Su W., Wang R., Zhao T. Removal of typical industrial gaseous pollutants: From carbon, zeolite, and metal-organic frameworks to molecularly imprinted adsorbents // Aerosol and Air Quality Research. 2019. Vol. 19. No. 9. P. 2130–2150.
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.04.0215>
 20. Liu J., Zhu F., Ma X. Industrial application of a deep purification technology for flue gas involving phase-transition agglomeration and dehumidification // Engineering. 2018. Vol. 4. No. 3. P. 416–420. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.009>
 21. Kurella S., Bhukya P.K., Meikap B.C. Removal of H₂S pollutant from gasifier syngas by a multistage dual-flow sieve plate column wet scrubber // Journal of Environmental Science and Health – Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering. 2017. Vol. 52. No. 6. P. 515–523.
<https://doi.org/10.1080/10934529.2017.1281690>
 22. Gajdzik B., Wyciślik A. Assessment of environmental aspects in a metallurgical enterprise // Metalurgija. 2012. Vol. 51. No. 4. P. 537–540.
 - rous Metallurgy. 2021, vol. 64, no. 3, pp. 192–199. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-192-199>
 8. Belanov I.P., Naumova N.B., Semina I.S., Savenkov O.A. Metallurgical production slags – promising material for technological waste reclamation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 12, pp. 987–992. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-12-987-992>
 9. Vodoleev A.S., Androkanov V.A., Berdova O.V., Yumasheva N.A., Cherdantseva E.S. Environmentally safe storage of wastes from iron-ore enrichment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 10, pp. 792–797. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-10-792-797>
 10. Barkan M.Sh., Berezovskii P.V. Technological and ecological-economic aspects of solid waste disposal of ferrous metallurgy enterprises. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2011, no. 7, pp. 48–51. (In Russ.).
 11. Skaf M., Manso M.J., Aragon A., Fuente-Alonso J.A., Ortega-López V. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. *Resources, Conservation and Recycling*. 2017, vol. 120, pp. 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.12.009>
 12. Tsakiridis P.E., Papadimitriou G.D., Tsvivilis S., Koroneos C. Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *Journal of Hazardous Materials*. 2008, vol. 152, no. 2, pp. 805–811.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.093>
 13. Santamaría A., Rojí E., Skaf M., Marcos I., Gonzalez J.J. The use of steelmaking slags and fly ash in structural mortars. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 106, pp. 364–373.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.121>
 14. Duan W., Yu Q., Wang Z. Comprehensive analysis of the coal particle in molten blast furnace slag to recover waste heat. *Energy and Fuels*. 2017, vol. 31, no. 8, pp. 8813–8819.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b01610>
 15. Matinde E., Simate G.S., Ndlovu S. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018, vol. 118, no. 8, pp. 825–844. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5>
 16. Gorbatiyuk S.M., Makarov P.S., Sukhorukova M.A. Environmental efficiency of gas purification and ash collection in Russian mining and metallurgical industry. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 6, pp. 451–457. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-6-451-457>
 17. Glushakova O.V., Chernikova O.P. Influence of ferrous metallurgy enterprises on atmospheric air quality as an ecological component of territories sustainable development. Report 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 292–301. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-292-301>
 18. Simonyan L.M., Demidova N.V. Dioxins and furans' behavior in the process of zinc and lead removing from EAF dust. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 11, pp. 840–845. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-11-840-845>
 19. Huang Y., Su W., Wang R., Zhao T. Removal of typical industrial gaseous pollutants: From carbon, zeolite, and metal-organic frameworks to molecularly imprinted adsorbents. *Aerosol and Air Quality Research*. 2019, vol. 19, no. 9, pp. 2130–2150.
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.04.0215>
 20. Liu J., Zhu F., Ma X. Industrial application of a deep purification technology for flue gas involving phase-transition agglomeration and dehumidification. *Engineering*. 2018, vol. 4, no. 3, pp. 416–420.
<https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.009>
 21. Kurella S., Bhukya P.K., Meikap B.C. Removal of H₂S pollutant from gasifier syngas by a multistage dual-flow sieve plate column wet scrubber. *Journal of Environmental Science and Health – Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*. 2017, vol. 52, no. 6, pp. 515–523.
<https://doi.org/10.1080/10934529.2017.1281690>
 22. Gajdzik B., Wyciślik A. Assessment of environmental aspects in a metallurgical enterprise. *Metalurgija*. 2012, vol. 51, no. 4, pp. 537–540.

23. Peng Wu, Lan Ying Jiang. Treatment of metallurgical industry wastewater for organic removal in China: Status, challenges, and perspectives // *Environmental Science: Water Research & Technology*. 2017. Vol. 3. No. 6. P. 1015–1031. <https://doi.org/10.1039/C7EW00097A>
24. Pinasseau A., Zerger B., Roth J., Canova M., Roudier S. Best available techniques (BAT) reference document for waste treatment // *Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)*. <https://doi.org/10.2760/407967>
25. Каракеян В.И. Экономика природопользования: Учебник для академического бакалавриата. Москва: Издательство Юрайт, 2016. 478 с. URL:http://urait.ru/uploads/pdf_review/5857A386-8AA5-4AA8-A539-6FD08DD53884.pdf
26. Хорошавин Л.Б., Беляков В.А., Свалов Е.А. Основы технологии переработки промышленных и твердых коммунальных отходов. Екатеринбург: УрФУ, 2016. 220 с.
27. Подгородецкий Г.С., Шульц Л.А. Современные направления развития и повышения энерго-экологической эффективности черной металлургии // *Экология и промышленность России*. 2016. Т. 20. № 4. С. 46–52.
28. Мещеряков С.В., Музафаров Е.Н., Шувалов Ю.А., Марьев В.А. О задачах объединенной информационноаналитической системы наилучших доступных технологий // *Экология и промышленность России*. 2012. № 10. С. 44–46.
29. ГОСТ Р 57702–2017. РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ. Обращение с отходами. Требования к малоотходным технологиям. Издание официальное. Москва: Стандартинформ, 2017.
30. Соколов А.К. Совершенствование и оптимизация нагрева металла в газовых печах методом математического моделирования. Иваново: ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2012. 256 с.
23. Peng Wu, Lan Ying Jiang. Treatment of metallurgical industry wastewater for organic removal in China: status, challenges, and perspectives. *Environmental Science: Water Research & Technology*. 2017, vol. 3, no. 6, pp. 1015–1031. <https://doi.org/10.1039/C7EW00097A>
24. Pinasseau A., Zerger B., Roth J., Canova M., Roudier S. Best available techniques (BAT) reference document for waste treatment. *Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)*. <https://doi.org/10.2760/407967>
25. Karakeyan V.I. *Economics of Environmental Management: Textbook*. Moscow, 2016, 478 p. Available at URL: http://urait.ru/uploads/pdf_review/5857A386-8AA5-4AA8-A539-6FD08DD53884.pdf (In Russ.).
26. Khoroshavin L.B., Belyakov V.A., Svalov E.A. *Fundamentals of Technology of Industrial and Municipal Solid Waste Processing*. Yekaterinburg: UrFU, 2016, 220 p. (In Russ.).
27. Podgorodetskii G.S., Shul'ts L.A. Modern directions in development and improvement of energy-ecological efficiency of ferrous metallurgy. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2016, vol. 20, no. 4, pp. 46–52. (In Russ.).
28. Meshcheryakov S.V., Muzafarov E.N. Shuvalov Yu.A. Mar'ev V.A. On integrated information and analytical system of the best available technologies. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2012, no. 10, pp. 44–46. (In Russ.).
29. *GOST R 57702-2017. Resource saving. Waste management. Requirements for low-waste technologies*. Moscow: Standartinform, 2017. (In Russ.).
30. Sokolov A.K. *Improvement and Optimization of Metal Heating in Gas Furnaces by Mathematical Modeling*. Ivanovo: Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet imeni V.I. Lenina, 2012, 256 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Анатолий Константинович Соколов, д.т.н., профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
ORCID: 0000-0001-5956-567X
E-mail: sokolov@bjd.ispu.ru

Anatolii K. Sokolov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Life Safety, Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin
ORCID: 0000-0001-5956-567X
E-mail: sokolov@bjd.ispu.ru

Поступила в редакцию 26.01.2022
 После доработки 22.03.2022
 Принята к публикации 25.04.2022

Received 26.01.2022
 Revised 22.03.2022
 Accepted 25.04.2022