

## О МЕТОДАХ ПЛАЗМЕННОЙ ИНСИНЕРАЦИИ В ТЕХНОЛОГИЯХ УТИЛИЗАЦИИ И ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ОТХОДОВ

С. В. АНАХОВ,

кандидат физико-математических наук, доцент, член-корреспондент Международной академии наук экологии, безопасности человека и природы, заведующий кафедрой,  
Российский государственный профессионально-педагогический университет

(620012, г. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, д. 11)

Ю. А. ПЫКИН,

доктор технических наук, профессор,  
Уральский государственный лесотехнический университет

(620038, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, д. 37)

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, утилизация отходов, обезвреживание, обеззараживание, инсинерация, плазмотрон.

Основным достоинством плазменной утилизации и плазменного обезвреживания отходов (по сравнению с физико-химическими и биологическими) является универсальность, позволяющая подвергать переработке практически любые отходы – твердые, растворимые, жидкие и газообразные. Другим ее преимуществом является то, что обезвреживание происходит в окислительной или восстановительной среде с подачей воздуха, кислорода и других газов, за счет чего возникает возможность регулирования параметров среды с целью эффективного воздействия на конкретное утилизируемое вещество (диоксины, пестициды, гербициды и т. д.). Высокие температуры плазменной струи (до 20 тыс. К), быстрота процесса, малое влияние атмосферного кислорода – необходимые условия, обеспечивающие обезвреживание практически любых токсичных, а при определенных условиях – и радиоактивных газов. Рассмотрены возможности внедрения плазменных технологий в экологические проекты различных производств. Представлены материально-энергетические схемы таких технологий. Исследована и разработана технология и оборудование обезвреживания органических отходов высокого класса опасности. Данная технология предусматривает сжигание твердой массы отходов в расплаве солей нитрита натрия в термохимическом реакторе. Дожигание отходящих газов происходит в плазмотермическом реакторе при температурах распада диоксинов. На выходе образуются газы, не требующие дополнительной очистки, и шлаковый остаток. В статье обсуждаются вопросы экологической и экономической эффективности внедрения плазменных технологий. Рассмотрены также вопросы внедрения полномасштабной технологии плазменной инсинерации и возможность ее применения на отдельных стадиях высокотемпературной утилизации и обезвреживания отходов.

## ON METHODS OF PLASMA INCINERATION IN WASTE RECYCLING AND DECONTAMINATION TECHNOLOGIES

S. V. ANAKHOV,

candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, corresponding member of International Academy of Sciences on Ecology and Environmental Safety, head of the department,  
Russian State Professional and Pedagogical University

(11 Mashinostroiteley Str., 620012, Ekaterinburg)

Yu. A. PYKIN,

doctor of engineering, professor,  
Ural State Forest Engineering University

(37 Sibirskiy tract Str., 620038, Ekaterinburg)

**Keywords:** ecological safety, waste recycling, waste treatment, decontamination, incineration, plasmatron.

Methods of plasma recycling and plasma decontamination of waste are presented. Their place in the general strategy of a waste management is shown. The basic advantage of such technologies (in comparison with physical, chemical and biological) is the universality, allowing to process practically any waste – firm, soluble, liquid and gaseous. Another advantage is the fact that neutralization occurs in the oxidizing or regenerative environment with air, oxygen and other gases supply due to which there is an opportunity of environmental parameters regulation with the purpose of effective influence on concrete utilized substance (dioxins, pesticides, herbicides, etc.). High temperatures of plasma jet (up to 20 thousand), speed of process, small influence of atmospheric oxygen – the necessary conditions providing neutralization practically any toxic and radioactive gases (under certain conditions). Opportunities of plasma technologies introduction in ecological projects of various manufactures are considered. The material-power schemes of such technologies are presented. The technology and the equipment of decontamination of high class of danger organic waste are investigated and elaborated. Such technology provides incineration of solid waste in melted salts of nitrite of sodium in a thermochemical reactor. Afterburning of departing gases occurs in plasma thermal reactor at temperatures of dioxins disintegration. On an output the gases which are not demanding additional clearing and the slag are formed. Questions of ecological and economic efficiency of plasma technologies are discussed. Questions of introduction as full-scale technology of plasma incineration, and an opportunity of its application at separate stages of technologies of high-temperature recycling and neutralization of waste are considered too.

Положительная рецензия представлена Н. М. Барбиным, доктором технических наук, заведующим кафедрой химии Уральского государственного аграрного университета.

**Цель и методика исследований.** Масштабное загрязнение окружающей среды – одна из наиболее актуальных и приоритетных проблем, стоящих не только перед российским обществом, но и человечеством в целом. В рамках решения данной проблемы за последние годы учеными и инженерами разных стран были предприняты активные усилия, направленные на поиск новых эффективных технологических решений, улучшающих экологическую обстановку окружающей среды. В широком ряду таких задач одной из наиболее актуальных является проблема переработки и обезвреживания отходов. Свидетельством этого является, в частности, введение с 2017 года экологического сбора за утилизацию отходов, что ставит перед производителями задачу выбора наименее затратной, но эффективной политики в сфере утилизации производимой продукции.

Присуждение в 2011 году премии «Глобальная энергия» академику Филиппу Рутбергу за разработку различных видов электроплазменной техники и ее внедрение в проектах экологической направленности существенным образом повысило интерес общества к данному направлению научно-технической деятельности. Под электроплазменными технологиями принято понимать процессы широкого класса направленности, в основе которых лежит применение генератора низкотемпературной плазмы – плазмотрона [1]. При температурах плазменной струи  $T_{пл} > 5000 \text{ K}$  возникает эффект высокоэнергетичного воздействия на материалы, позволяющий подвергнуть глубокому разложению соединения, входящие в состав данного вещества, – плазменная инсинерация («сжигание») [2]. Тем самым, становится очевидной сфера применения таких технологий – переработка отходов, являющаяся на данный момент одной из самых актуальных задач в сфере экологии. Эффективное внедрение плазменных технологий в производства по переработке отходов требует оптимальных решений с учетом критериев производительности, себестоимости и безопасности процесса, а также качества достигаемого результата [3, 4].

К настоящему времени разработано большое число методов и способов утилизации отходов, которые можно разделить по технологическому принципу на биологические, термические, химические, механические и смешанные. Основным достоинством термических технологий (по сравнению с физико-химическими и биологическими) является универсальность, позволяющая подвергать переработке практически любые отходы – твердые, растворимые, жидкие и газообразные. В основе таких технологий лежит контактная или бесконтактная обработка утилизируемого вещества высокотемпературным теплоносителем, в зависимости от свойств которого их можно разделить на плазмохимический [5], пиро-

лизный, окислительно-огневой, газификационный, паротермический и т. д. Другим их преимуществом является то, что обезвреживание происходит в окислительной или восстановительной среде с подачей воздуха, кислорода и других газов, за счет чего возникает возможность регулирования параметров среды с целью эффективного воздействия на конкретное утилизируемое вещество (диоксины, пестициды, гербициды и т. д.) [6].

Полный технологический цикл термической утилизации, как правило, состоит из нескольких стадий.

1. Предварительный этап, который может включать в себя сбор, сортировку, реагентную обработку и даже низкотемпературное воздействие для получения необходимых для высокотемпературной переработки характеристик.

2. Высокотемпературная обработка и обезвреживание.

3. Многоступенчатая очистка газов.

4. Вторичное использование продуктов переработки (тепла, синтез-газа, минеральных солей, строительных смесей и т. д.).

Широкий интерес к термическим методам переработки отходов проявляется в принимаемых в последнее время стратегических планах развития российских городов, в связи с чем активизируется деятельность по строительству мусоросжигательных комплексов и заводов, а также внедрению компактных установок термической утилизации для решения локальных задач (уничтожение инфицированных отходов, кремация трупов животных и т. д.). Запуск больших мусоросжигательных заводов осложняется необходимостью тщательного анализа и выбора технологии термического воздействия, так как многие подобные предприятия, построенные ранее, в том числе и в других странах, не отвечают современным экологическим требованиям по концентрациям супертоксикантов (диоксины и фураны, тяжелые металлы и их соединения) в токсичных летучих золах. На таких заводах, как правило, используются технологии паро-воздушной газификации и слоевого сжигания на колосниковых решетках. В большинстве случаев, сжигание мусора происходит после радиологического контроля, но без предварительной сортировки, что зачастую может приводить к появлению токсичных газовых выбросов и повышению концентрации вредных веществ во вторичных продуктах переработки (саже, металлизированных отходах и т. д.). Из-за невозможности быстрого мониторинга, как правило, отсутствует контроль по наличию канцерогенных компонент в газовых выбросах. При этом основные затраты при строительстве таких дорогостоящих заводов приходится, в основном, на систему очистки газов, включающую в себя несколько стадий пропускания газовых выбросов через

циклоны, скрубберы, адсорберы, электромагнитные и механические фильтры. Эти системы достаточно громоздки и, в свою очередь, требуют обслуживания и периодической утилизации после сильного загрязнения путем сжигания или захоронения на переполненных полигонах. Технологии, обеспечивающие необходимые уровни выбросов, известны, но достаточно дороги и требуют высокой культуры производства и постоянного контроля на всех стадиях процесса. Очевидно также, что рентабельность такого производства должна обеспечиваться в том числе и мерами административного регулирования на всех этапах общей стратегии управления отходами.

Установки термической утилизации, также широко внедряемые в России, в свою очередь, не лишены определенных недостатков. В настоящее время муниципалитеты закупают в основном продукцию трех производителей (российские «ЭЧУТО» и «Турмалин» и французские «Мюллер»), использующих метод пиролизического сжигания отходов. В зависимости от объема и специфики утилизации эти фирмы предлагают несколько типов установок различной стоимости, но основным элементом, сильно удорожающим и усложняющим их внедрение, опять же является система очистки. На малогабаритных установках, как правило, применяется одностадийная очистка с выбросом неконтролируемого по составу переработанного газа в атмосферу, а предлагаемые технологии многостадийной очистки по размерам и стоимости сопоставимы с мусоросжигательным заводом.

**Результаты исследований.** Учет вышеупомянутых недостатков заставляет обратить внимание на наиболее эффективный метод высокотемпературной утилизации – плазмохимический [5], в котором основным плазмообразующим веществом является как раз газ, который может содержать различные токсичные компоненты. В этом случае высокие температуры плазменной струи (5–20 тыс. К), быстрота процес-

са, малое влияние атмосферного кислорода – необходимые условия, обеспечивающие обезвреживание практически любых токсичных, а при определенных условиях – и радиоактивных газов. Разумеется, высокие температуры, генерируемые плазмотроном, пригодны и для непосредственного сжигания или остекловывания нелетучих продуктов предварительного пиролиза, однако высокая энергозатратность плазменных процессов (потребляемые мощности плазмотронов – от 1 до 100 кВт) ограничивает сферу внедрения таких технологий [7]. Следует упомянуть также плазмохимические технологии, в которых образующиеся после термического разложения газы проходят через ванну расплава металла или оксида. Такие установки достаточно эффективны по энергетическим и массогабаритным показателям, но их экологическая безопасность пока уступает установкам, использующим традиционные плазменные методы.

Принцип работы таких установок состоит в следующем [8]. В струю низкотемпературной плазмы подается вещество в жидком, пастообразном или порошковом виде, либо непосредственно утилизируемый плазмообразующий газ. В плазмохимическом реакторе при высоких температурах вещества разлагается до молекулярного, атомарного и ионизированного состояния с последующим образованием нетоксичного газа (рис. 1), состав которого определяется термодинамическими параметрами процесса. Возможность регулирования состава плазмообразующего газа, давления и высоких температур, позволяет достигать эффективности переработки в 99,9 %. Такими методами можно обезвреживать органические, фтор-, хлор-, фосфор- и сероорганические вещества, металлоорганику, неорганические материалы. Особенно полезны эти методы при утилизации трудногорючих и негорючих соединений.

1. Одним из необходимых условий любой высокотемпературной технологии, включая плазменную, является процесс закалки газа, обеспечивающий

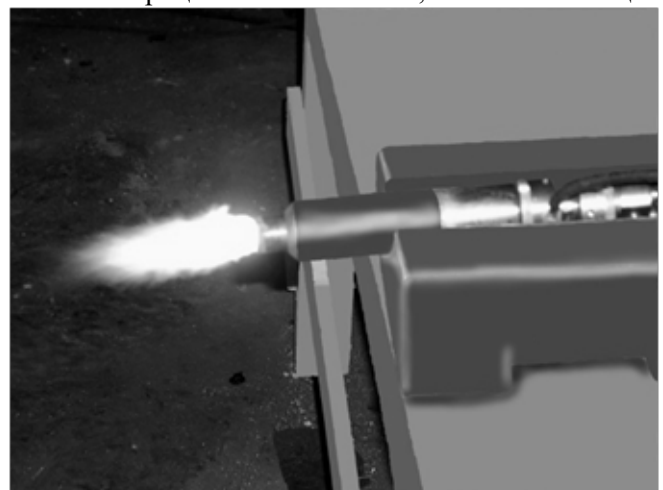


Рис. 1. Плазменное обезвреживание токсичного газа  
Fig. 1. Plasma neutralization of toxic gas

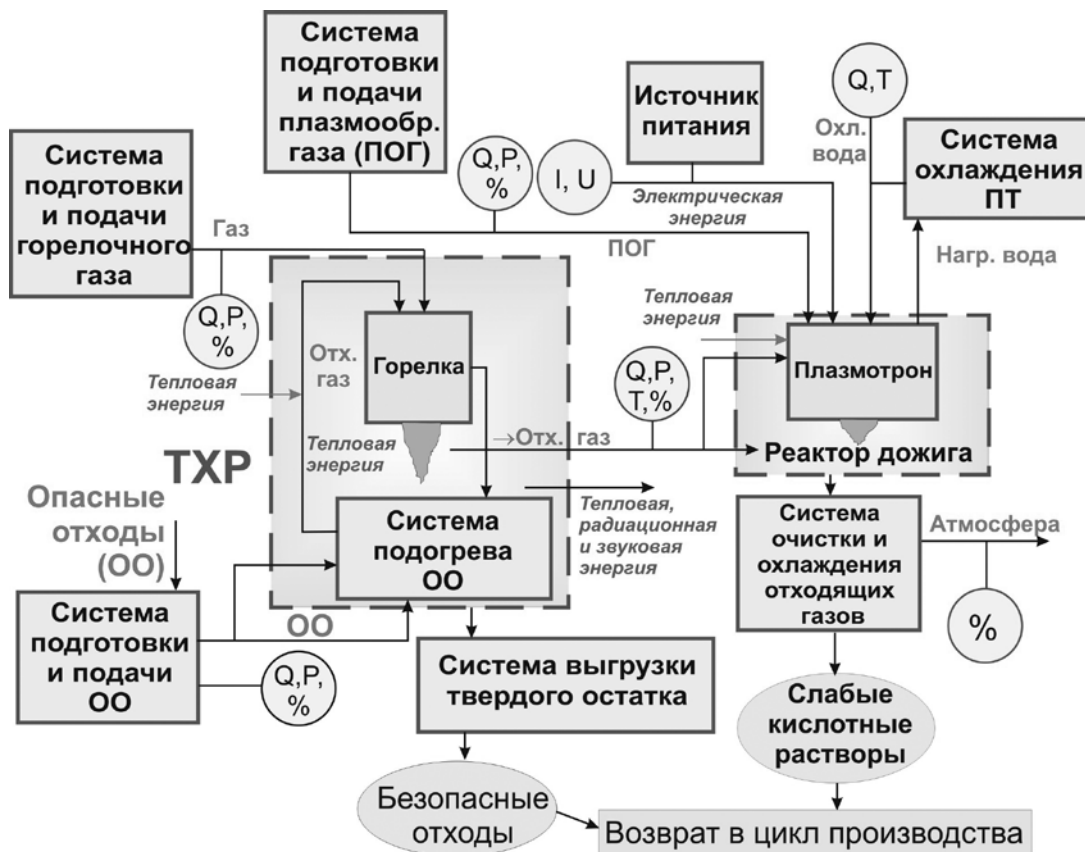


Рис. 2. Материально-энергетическая схема технологии обезвреживания опасных бытовых отходов с плазменным дожиганием отходящих газов (ТХР – термохимический реактор, ПТ – плазмотрон, ОО – опасные отходы, ПОГ – плазмообразующий газ; I, U, Q, P, % – датчики контроля тока, напряжения, расхода, давления, состава)

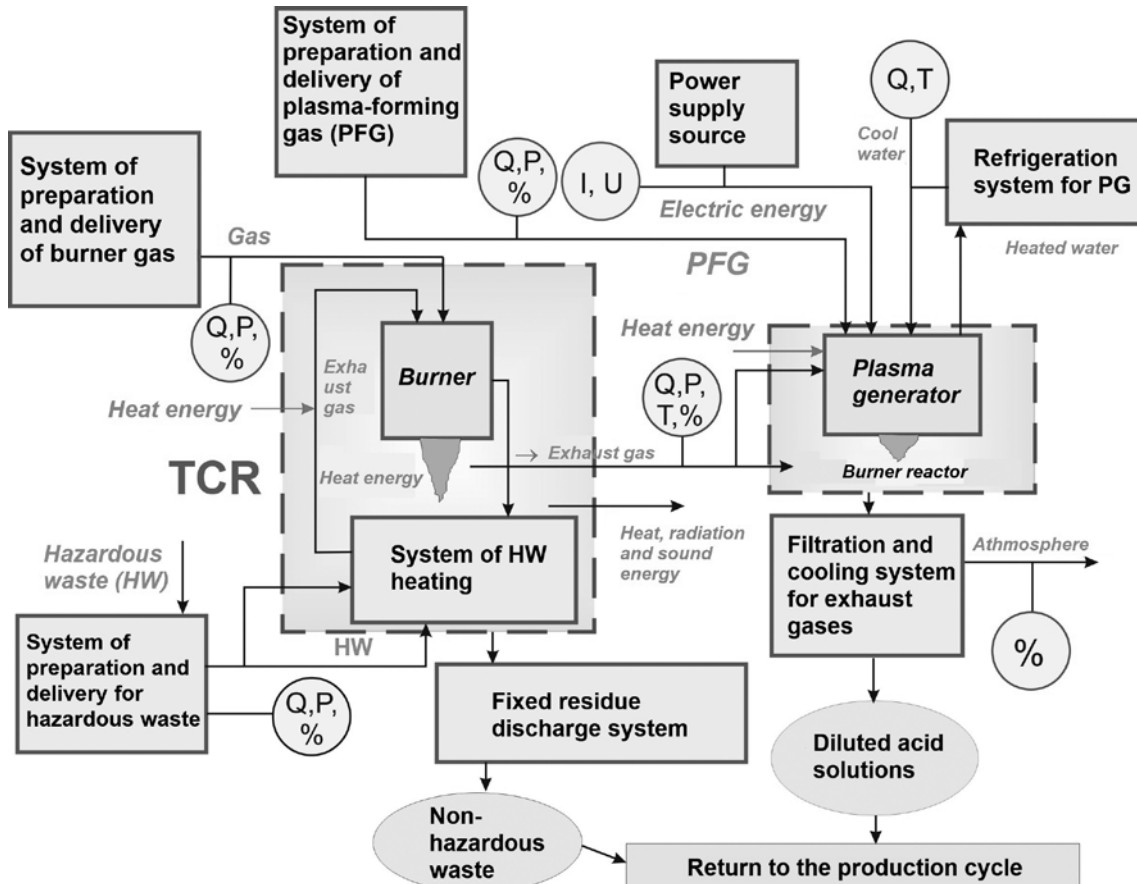


Fig. 2. The material and power scheme of technology of neutralization of hazardous waste with plasma reburning of flue gases (TCR – the thermochemical reactor, PG – plasma generator, HW – hazardous waste, PFG – plasma-forming gas; I, U, Q, P, % – sensors of control of current, tension, an expense, pressure, structure)

быстрое охлаждение газа во избежание образования нежелательных вторичных соединений. Для этого любая такая технология должна оснащаться системами закалки, нейтрализации, регенерации и фильтрации, что обеспечивает их максимальную экологическую эффективность. В этой связи использование исключительно плазменных методов обезвреживания становится достаточно энергозатратным (для обезвреживания 1 кг вещества надо потребить 0,5–3 кВтЧ). Процесс обезвреживания медицинских отходов термическим способом сопровождается образованием газовой смеси с высокой концентрацией вредных веществ, для удаления которых требуется дополнительная система очистки (дожигание в высокотемпературной плазме).

2. Расход образующихся газов напрямую зависит от состава обезвреживаемых образцов, поэтому перед сжиганием требуется проводить сортировку отходов.

3. Процесс обезвреживания органических отходов происходит в очень короткий временной интервал, что позволяет обезвреживать большие объемы отходов в минимальные сроки.

4. Образующийся шлак в дальнейшем требуется направлять на утилизацию по востребованию.

5. Дожигание образующихся газов может происходить в плазме при минимальных давлениях, что исключает необходимость внедрения дополнительных элементов установки (ресивер), необходимых для поддержания определенного давления;

6. Процесс обезвреживания может проводиться при напряжении в 220 В, что важно при внедрении установки в лечебно-профилактические учреждения.

7. Предложенная технологическая схема обеспечивает соответствующий экологическим требованиям физико-химический состав продуктов обезвреживания при себестоимости утилизации 1 м<sup>3</sup> медицинских отходов порядка 30–50 руб.

8. Внедряемые плазмотроны должны отвечать предъявляемым к ним современным нормам охраны труда (по шуму [11, 12], излучению, электробезопасности) и энергоэффективности.

Потенциальными потребителями разработки являются учреждения и центры по переработке отходов, мусоросортировочные комплексы в крупных городах, структурные подразделения МЧС (министерства по чрезвычайным ситуациям) – в местах техногенных аварий, сельскохозяйственные и животноводческие комплексы – для захоронений инфицированной органики и т. д.

### Литература

1. Чередниченко В. С., Аньшаков А. С., Кузьмин М. Г. Плазменные электротехнологические установки. Новосибирск, 2011. 602 с.
2. Chernets I., Nirenberg G., Fridman A., Rabinovich A. Development of high-power plasma reformer and power supply for large scale applications. URL : <http://www.ispc-conference.org/ispcproc/ispc20/638.pdf>.
3. Анахов С. В., Пыкин Ю. А. Экологическое проектирование: стратегии и технологии. Saarbrücken, 2012. 125 с.
4. Анахов С. В., Пыкин Ю. А., Шакуров С. А. Системные принципы в решении задач экологической безопасности с применением плазменных технологий // Экология и промышленность России. 2014. № 1. С. 4–9.
5. Fridman A. Plasma Chemistry. Cambridge : Cambridge University Press, 2008. 978 p.
6. Анахов С. В., Пыкин Ю. А. Плазменные технологии для экологизации производств // Безопасность в техносфере. 2011. № 5. С. 45–53.
7. Пыкин Ю. А., Анахов С. В. Эффективность и экологичность – факторы преимущества современных электроплазменных технологий // УрФО: Строительство. ЖКК. 2013. № 1. С. 16–18.
8. Пыкин Ю. А., Анахов С. В. Перспективы использования электроплазменных процессов в решении технологических и экологических задач // Башкирский экологический вестник. 2013. № 2. С. 36–41.
9. Xiuquan C., Deping Yu, Meng X., Jin Y. Design and Characteristics of a Laminar Plasma Torch for Materials Processing // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2015. № 2. P. 1–18.
10. Пыкин Ю. А., Анахов С. В. Технология плазменного обезвреживания органических отходов // Безопасность в техносфере. 2010. № 4. С. 26–32.
11. Анахов С. В. Электроплазменный шум: диагноз и рецепты лечения // Сборник научно-популярных статей – победителей конкурса РФФИ 2011 года. 2012. Вып. 15. С. 331–345.
12. Анахов С. В., Пыкин Ю. А. Плазмотроны: проблема акустической безопасности. Екатеринбург, 2012. 224 с.

### References

1. Cherednichenko V. S., Anshakov A. S., Kuzmin M. G. Plasma electric and technological installations. Novosibirsk, 2011. 602 p.
2. Chernets I., Nirenberg G., Fridman A., Rabinovich A. Development of high-power plasma reformer and power supply for large scale applications. URL: <http://www.ispc-conference.org/ispcproc/ispc20/638.pdf>.
3. Anakhov S. V., Pykin Yu. A. Ecological design: strategy and technologies. Saarbruecken, 2012. 125 p.

4. Anakhov S. V., Pykin Yu. A., Shakurov S.A. The system principles in the solution of problems of ecological safety with use of plasma technologies // Ecology and the industry of Russia. 2014. № 1. P. 4–9.
5. Fridman A. Plasma Chemistry. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 978 p.
6. Anakhov S. V., Pykin Yu. A. Plasma technologies for greening of productions // Safety in technosphere. 2011. № 5. P. 45–53.
7. Pykin Yu. A., Anakhov S.V. Efficiency and environmental friendliness – factors of advantage of modern electric and plasmic technologies // Ural Federal District: Construction. 2013. № 1. P. 16–18.
8. Pykin Yu. A., Anakhov S. V. The prospects of use of electroplasma processes in the solution of technological and ecological tasks // Bashkir Ecological Messenger. 2013. № 2. P. 36–41.
9. Xiuquan C., Deping Yu, Meng X., Jin Y. Design and Characteristics of a Laminar Plasma Torch for Materials Processing // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2015. № 2. P. 1–18.
10. Pykin Yu. A., Anakhov S.V. Technology of plasma neutralization of organic waste // Safety in a technosphere. 2010. № 4. P. 26–32.
11. Anakhov S. V. Electroplasma noise: the diagnosis and recipes of treatment // Collection of popular scientific articles – winners of competition of the Russian Federal Property Fund of 2011. 2012. Iss. 15. P. 331–345.
12. Anakhov S. V., Pykin Yu. A. Plasmatrons: problem of acoustic safety. Ekaterinburg, 2012. 224 p.