

## Переработка отработанной ртутьсодержащей ионообменной смолы. I. Высокотемпературный плазменный пиролиз

*А. В. Артемов<sup>1</sup>✉, М. В. Дюбанов<sup>2,3</sup>, О. И. Седяров<sup>3</sup>, А. В. Переславцев<sup>1</sup>,  
С. А. Вощинин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия,  
e-mail: [arsenyart@icloud.com](mailto:arsenyart@icloud.com)

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Межведомственный центр  
аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме  
Российской академии наук, Москва, Россия,

<sup>3</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии.  
Дизайн. Искусство)», Москва, Россия

Поступила в редакцию: 10.08.2022 г.; после доработки: 17.08.2022 г.; принята к печати: 25.08.2022 г.

**Аннотация** – Одним из направлений эффективной утилизации отработанных ртутьсодержащих ионообменных смол является высокотемпературный плазменный пиролиз, широко применяемый для переработки отходов различного морфологического состава с получением тепловой и электрической энергии и базальтоподобного шлака. Приведены принципиальные технологические схемы унитарного плазменного блока и комплекса высокотемпературного плазменного конвертера для переработки указанных смол. Выполнен технико-экономический расчет плазменной переработки отходов. Комплекс позволяет нейтрализовать и купировать высокотоксичные ртутьсодержащие отходы в комбинации с медицинскими, биологическими и другими типами опасных отходов. Комплекс сможет обеспечивать регион своего расположения значительным количеством тепловой и электрической энергии, замещая углеводородные источники энергии. Согласно расчетам, прибыль от работы комплекса может составить до 200 млн. руб. в год.

**Ключевые слова:** ртутьсодержащие отходы, плазменная переработка, технико-экономический анализ.

---

### Utilization and biodegradation of wastes

## Processing of spent mercury-containing ion-exchange resins. I. High-temperature plasma pyrolysis

*Arseniy V. Artemov<sup>1</sup>✉, Mikhail V. Dyubanov<sup>2,3</sup>, Oleg I. Sedlyarov<sup>3</sup>,  
Alexander V. Pereslavitsev<sup>1</sup>, Sergey A. Voshchinin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia, e-mail: [arsenyart@icloud.com](mailto:arsenyart@icloud.com)

<sup>2</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Science Interdepartment Center of Analytical Research in Physics, Chemistry and Biology at the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Russian State University named after I.I. A.N. Kosygin (Technology. Design. Art)”, Moscow, Russia

Received: August 10, 2022; Revised: August 17, 2022; Accepted: August 25, 2022

**Abstract** – One of the approaches for the effective utilization of spent mercury-containing ion-exchange resins is high-temperature plasma pyrolysis, which is widely used to process wastes of various morphological compositions with the generation of thermal and electrical energy and production of basalt-like slag. The paper presents principal technological schemes of a unitary plasma block and a high-temperature plasma converter complex for the above mentioned waste type processing. A feasibility study for plasma waste processing has been carried out. The complex provides neutralization and detoxification of highly toxic mercury-containing waste in combination with medical, biological and other types of hazardous waste. The complex will be able to provide the region of its localization with a significant amount of heat and electricity, replacing hydrocarbon energy sources. According to calculations, the profit from the operation of the complex can be up to 200 million rubles/per year.

**Keywords:** mercury-containing waste, plasma processing, feasibility study.

---

## ВВЕДЕНИЕ

При производстве едкого натра, водорода и жидкого хлора ртутным методом [1] очистку ртутьсодержащих сточных вод проводят с использованием ионообменных смол. Отработанная ионообменная смола (ОИС) из адсорберов отделения очистки сточных вод от ртути складывается в контейнеры и периодически вывозится на захоронение автотранспортом. Количество ОИС только на одной установке составляет ~50 кг в сутки или около 20 т в год. Такое количество отходов ОИС, содержащих опасные токсиканты, не должно размещаться на открытых полигонах захоронения – их следует утилизировать, по возможности с получением полезной продукции. Таким методом утилизации является плазменный пиролиз, осуществляемый в высокотемпературном плазменном конвертере (ВТПК) [2], который, помимо переработки отходов, позволяет дополнительно получать тепловую и электрическую энергию и базальтоподобный шлак (сырье для производства базальтовых волокон [3]).

Метод высокотемпературного плазменного пиролиза позволяет проводить процесс с экономической эффективностью за счет средств, получаемых от переработки отходов и продажи на внешнем рынке тепловой и электрической энергии и базальтоподобного шлака (БПШ). Расчет процесса высокотемпературного плазменного пиролиза ОИС, реализуемого в Комплексе ВТПК проводили с помощью алгоритмов и программ расчета подробно описанных в [4]. В основе расчета лежит энергетический и материальный баланс унитарного плазменного блока (УПБ) (рис. 1). УПБ представляет собой плазменный реактор шахтного типа. Загрузка сырья – отходов производства и потребления (ОПП) происходит с помощью загрузочного устройства (системы шиберов), расположенного в верхней части реактора.

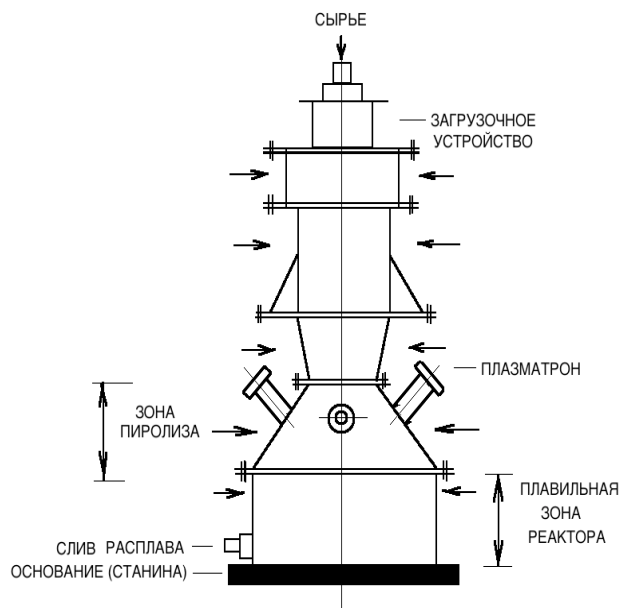


**Рис. 1.** Эскиз унитарного плазменного блока (Стрелками показано расположение датчиков измерения температуры).

**Fig. 1.** Sketch of a unitary plasma unit (Arrows show the location of temperature sensors)

В нижней части реактора находится зона пироллиза, в которую введены 4 плазматрона и в которую вводится определенное расчетное (в зависимости от морфологического состава ОПП) количество кислорода, необходимого для перевода неорганической части ОПП в БПШ.

УПБ имеет постоянную производительность по сырью – 12500 тонн в год. БПШ в расплавленном состоянии выгружается из плавильной зоны реактора, расположенной в нижней его части. БПШ является обязательным продуктом плазменной переработки отходов, его количество определяется, в основном, морфологическим составом отходов [4]. Расчет равновесного состава пирогаза проводили по методике [4] с использованием данных о среднем составе ОПП (табл. 1).

**Таблица 1.** Средний элементный состав ОПП

**Table 1.** Average elemental composition of production and consumption waste

| N | ОПП* | Элементный состав, % масс. |       |       |      |      |                  |                  |       |
|---|------|----------------------------|-------|-------|------|------|------------------|------------------|-------|
|   |      | C                          | H     | O     | N    | S    | H <sub>2</sub> O | SiO <sub>2</sub> | Зола  |
| 1 | ТКО  | 34,84                      | 3,38  | 28,45 | 0,15 | 0,14 | 14,87            | 15,45            | 2,71  |
| 2 | ТНО  | 59,10                      | 7,89  | 0,70  | 0,21 | 2,49 | 19,74            | -                | 9,86  |
| 3 | АБМ  | 35,50                      | 8,00  | 2,00  | 4,44 | -    | 50,00            | -                | 0,05  |
| 4 | ОИС  | 52,10                      | 7,89  | 28,70 | 0,21 | 0,49 | 8,74             | -                | 3,86  |
| 5 | АП   | 74,60                      | 12,40 | -     | -    | 1,00 | -                | -                | 12,00 |
| 6 | ОД   | 18,00                      | 3,00  | 24,00 | 0,10 | -    | 49,90            | -0               | 5,00  |
| 7 | БО   | 46,08                      | 7,78  | 17,03 | 4,00 | 0,09 | 20,20            | -                | 4,80  |
| 8 | МО   | 29,43                      | 4,20  | 29,43 | 0,13 | 0,20 | 16,18            | 20,22            | 0,21  |

\*Примечание: ТКО – твердые коммунальные отходы; ТНО – тяжелые нефтяные остатки; АБМ – алга-биомасса; ОИС – отработанная ионообменная смола; АП – автомобильные покрышки; ОД – отходы деревообработки; БО – биологические отходы; МО – медицинские отходы.

Поскольку ОИС, как это было показано выше, образуется в малом количестве, расчет проводили для ОПП, который, помимо ОИС, включает также (% масс.): ТКО – 70; ТНО – 5; ОИС – 5; АП – 7; ОД – 6; БО – 2; МО – 5.

### Результаты расчета Комплекса ВТПК

Расчет проводили в соответствии с принципиальной технологической схемой, приведенной на рисунке 2, согласно которой ОПП подавали в верхнюю часть УПБ, в нижней части которого расположены 4 плазматрона (ПЛ) ЭДП-600 (на рис. 2 один ПЛ). Рабочим газом в ПЛ является  $\text{CO}_2$ , подаваемый в ПЛ из хранилища  $\text{CO}_2$  ( $\text{ХРСО}_2$ ).

Электроэнергию (Е) ПЛ также получают от газо-турбинной установки (ГТУ). В зону пиролиза УПБ подают строго расчетное количество кислорода для обеспечения полного превращения неорганических компонентов ОПП в БПШ, который выводится из нижней части УПБ. Расчет этого количества  $\text{O}_2$  проводят таким образом, чтобы реальная электрическая мощность одного ПЛ равнялась 540 кВт (90% номинальной мощности плазматрона ЭДП-600). Пирогаз из УПБ поступает в котел-утилизатор (КУ), где отдает свое тепло с выработкой теплоносителя (Т) – пара. Охлажденный пирогаз из КУ направляют на стадию очистки пирогаза (ОПИР), а после стадии ОПИР очищенный пирогаз направляют на стадию абсорбционного выделения  $\text{CO}_2$  ( $\text{ВСО}_2$ ).

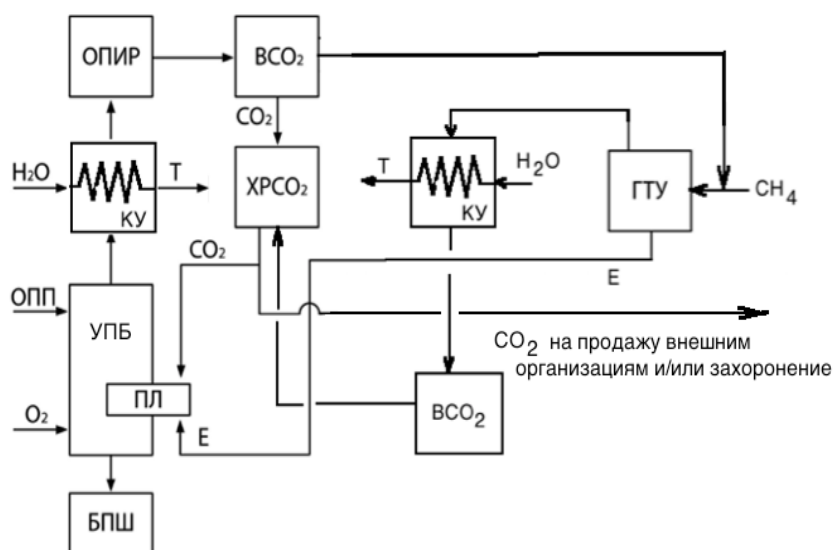


**Рис. 2.** Принципиальная технологическая схема Комплекса ВТПК плазменной переработки отходов. Обозначения в тексте.

**Fig. 2.** Principal technological scheme of the High Temperature Plasma Converter Complex for plasma waste processing. Designations in the text.

При использовании этой технологии УПБ производительностью 12500 т/год имеет следующие характеристики:

|                                                     |              |
|-----------------------------------------------------|--------------|
| – часовая производственная мощность                 | 1679 кг/час  |
| – номинальное время эксплуатации                    | 8760 час/год |
| – годовая загрузка по времени реальной эксплуатации | 85%          |
| – реальное время эксплуатации в году                | 7446 часов   |
| – время сервисного и технического обслуживания      | 1314 часов.  |

После выделения  $\text{CO}_2$  пирогаз, содержащий, в основном,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$ , направляется в ГТУ для смешивания с природным газом.  $\text{CO}_2$  выделяется также и из газообразных продуктов ГТУ. Из  $\text{XRCO}_2$  часть  $\text{CO}_2$  поступает в качестве плазмообразующего газа в ПЛ, а большая часть  $\text{CO}_2$  остается в  $\text{XRCO}_2$  и реализуется внешним потребителям или выводится на захоронение. Необходимость выделения  $\text{CO}_2$  отдельно и из пирогаза, и из газообразных продуктов ГТУ обусловлена двумя основными факторами:

1. Количество  $\text{CO}_2$ , выделяемое только из пирогаза, недостаточно для обеспечения всех плазматронов плазмообразующим газом.
2. Современными экологическими требованиями, предусматривающими снижение выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу, высокими эмиссионными квотами для  $\text{CO}_2$  и стратегией низко углеродного развития России.

В Комплексе ВТПК в качестве ГТУ (см. рис. 2) предусмотрено использование ГТЭС Урал-6000 производства ОАО «Авиадвигатель» со следующими основными характеристиками:

|                                                                      |      |
|----------------------------------------------------------------------|------|
| – номинальный расход природного газа, $\text{нм}^3/\text{ч}$         | 2448 |
| – номинальная мощность, кВт                                          | 6140 |
| – температура газа за силовой турбиной двигателя, $^{\circ}\text{C}$ | 474  |

Выделение  $\text{CO}_2$  проводят абсорбционным методом под давлением при температуре около  $30^{\circ}\text{C}$ . В качестве абсорбента используют метилдиэтаноламин (МДЭА), который зарекомендовал себя эффективным поглотителем  $\text{CO}_2$  – при взаимодействии  $\text{CO}_2$  с МДЭА происходит быстрая реакция образования карбоната диэтаноламмония. При снижении давления до 0,1 МПа и повышении температуры насыщенного абсорбента до  $120^{\circ}\text{C}$  происходит разложение образовавшегося карбоната и выделение из раствора  $\text{CO}_2$ . Основными этапами этой стадии процесса являются:

1. абсорбция  $\text{CO}_2$  из пирогаза под давлением 2,25 МПа водным раствором МДЭА;
2. отдувка  $\text{CO}_2$  и регенерация насыщенного  $\text{CO}_2$  раствора МДЭА при температуре около  $120^{\circ}\text{C}$ ;
3. циркуляция раствора МДЭА с использованием теплообменного, холодильного и насосного оборудования.

Степень извлечения  $\text{CO}_2$  составляет не менее 90% (обычно 91 – 95%). Абсорбцию  $\text{CO}_2$  с использованием в качестве абсорбента МЭДА проводят в насадочной колонне, заполненной насадочными контактными элементами – стальными кольцами Рашига размером  $25 \times 25 \times 0,8$  мм. Слой насадки опирается на опорно-распределительную решетку. В верхней части насадочная колонна оснащена распределителем регенерированного абсорбента (МДЭА). Используемая насадка имеет следующие основные характеристики:

|                                                 |       |
|-------------------------------------------------|-------|
| – удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{м}^3$ | 220   |
| – свободный объем, $\text{м}^3/\text{м}^3$      | 0,92  |
| – эквивалентный диаметр, м                      | 0,017 |
| – число элементов в $1 \text{ м}^3$             | 55000 |
| – насыпная плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$    | 640   |



доли МО в отходах с 5% до 25% (и, соответственно, сокращению доли ТКО с 70% до 50%) приводит к снижению срока окупаемости Комплекса ВТПК с 15,2 до 13,7 лет (рис. 4).

**Таблица 2.** Результаты расчета технологии плазменной переработки отходов, содержащих отработанные ионообменные смолы, в Комплексе ВТПК производительностью по отходам 12500 т/год

**Table 2.** The results of the calculation of the technology for plasma processing of waste containing spent ion-exchange resins in the High-Temperature Plasma Converter Complex with a waste capacity of 12500 t/year

| Показатель                                                                    | Состав отходов*, % масс |         |         |         |         |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|
|                                                                               | (1)                     | (2)     | (3)     | (4)     | (5)     |
| Дополнительное дутье O <sub>2</sub> в зону пиролиза, кг/час                   | 341                     | 340     | 328     | 337     | 336     |
| Поток плазмообразующего газа – CO <sub>2</sub> , кг/час                       | 871                     | 870     | 868     | 867     | 866     |
| Количество CO <sub>2</sub> , выделенное из пирогаза, кг/час                   | 733                     | 725     | 716     | 708     | 700     |
| Количество CO <sub>2</sub> , выделенное из газообразных продуктов ГТУ, кг/час | 18017                   | 18048   | 18079   | 18110   | 18141   |
| Степень внутрен. использования CO <sub>2</sub> , (w)                          | 0,05                    | 0,05    | 0,05    | 0,05    | 0,05    |
| Количество вырабатываемого синтез-газа, кг/час                                | 1002                    | 1020    | 1039    | 1057    | 1075    |
| Степень замещения природного газа синтез-газом, %                             | 6,06                    | 6,17    | 6,28    | 6,39    | 6,50    |
| Выработка базальтоподобного шлака на продажу, т/год                           | 1205                    | 1268    | 1331    | 1394    | 1457    |
| Выработка электроэнергии на продажу, тыс. кВт·ч/год                           | 154133                  | 154142  | 154125  | 154134  | 154133  |
| Выработка тепловой энергии на продажу, Гкал/год                               | 361102                  | 361056  | 361008  | 360962  | 360916  |
| Содержание СО в пирогазе, кг/час                                              | 830                     | 845     | 860     | 875     | 890     |
| Содержание Н <sub>2</sub> в пирогазе, кг/час                                  | 52                      | 52      | 51      | 51      | 51      |
| Мольное отношение Н <sub>2</sub> : СО                                         | 0,88                    | 0,86    | 0,83    | 0,82    | 0,80    |
| Простой срок окупаемости, лет                                                 | 15,2                    | 14,8    | 14,4    | 14,1    | 13,7    |
| Чистая прибыль, тыс.руб.                                                      | 161533                  | 173068  | 187058  | 201103  | 215126  |
| Рентабельность, %                                                             | 15,70                   | 16,53   | 21,97   | 23,23   | 24,45   |
| Суммарные капитальные затраты, тыс.руб.                                       | 5462101                 | 5462107 | 5462097 | 5462102 | 5462102 |

\*Состав отходов:

- (1): ТКО-70; ТНО-5; ОИС-5; АП-7; ОД-6; БО-2; МО-5
- (2): ТКО-65; ТНО-5; ОИС-5; АП-7; ОД-6; БО-2; МО-10
- (3): ТКО-60; ТНО-5; ОИС-5; АП-7; ОД-6; БО-2; МО-15
- (4): ТКО-55; ТНО-5; ОИС-5; АП-7; ОД-6; БО-2; МО-20
- (5): ТКО-50; ТНО-5; ОИС-5; АП-7; ОД-6; БО-2; МО-25

Более чем на 30% возрастает чистая прибыль Комплекса ВТПК – с 161,5 млн. руб. до 215,1 млн. руб. (рис. 4). В 1,5 раза возрастает рентабельность переработки отходов: с 15,70% до 24,45%. При этом суммарные капитальные затраты Комплекса ВТПК остаются на постоянном уровне ~ 5462 млн. руб.

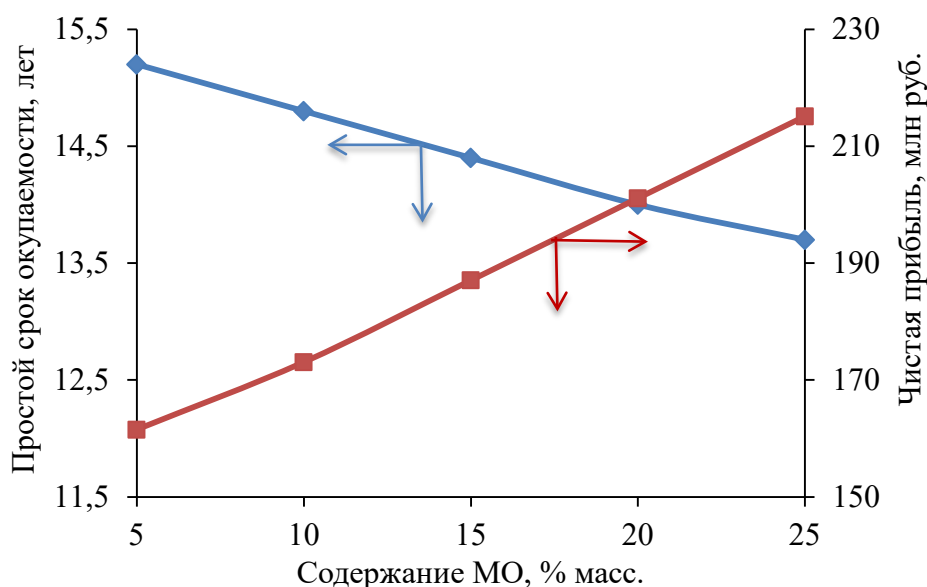


**Рис. 4.** Зависимость простого срока окупаемости и прибыли при работе Комплекса ВТПК по переработке отходов, содержащих отработанную ионообменную смолу, от содержания медицинских отходов (МО) в составе отходов. Производительность Комплекса ВТПК по отходам – 12500 т/год.

**Fig. 4.** Dependence of the simple payback period and profit during the operation of the High-Temperature Plasma Converter Complex (HTPC) for the processing of waste containing spent ion-exchange resin on the content of medical waste (MW) in the waste composition. The productivity of the TPCC Complex for waste is 12500 tons/year.

При увеличении содержания МО в отходах с 5% до 25% технологические показатели работы Комплекса ВТПК изменяются следующим образом:

- значительно возрастает выработка базальтоподобного шлака: с 1205 т/год до 1457 т/год (рис. 5);
- возрастает степень замещения природного газа синтез-газом с 6,06 до 6,50% (рис. 5);
- возрастает количество вырабатываемого синтез-газа: с 1007 кг/час до 1075 кг/час; увеличивается содержание СО в пирогазе с 830 кг/час до 890 кг/час и снижается мольное соотношение  $H_2 : CO$  с 0,88 до 0,80;
- снижается количество  $CO_2$ , выделенное из пирогаза, с 733 кг/час до 700 кг/час;
- другие технологические параметры остаются практически без изменения (табл. 2).

Поскольку МО являются наиболее «дорогими» в плане переработки отходов, то изменение содержания других, менее «дорогих» отходов (ТНО, ОИС, АП, ОД и БО) не приведет к значительному изменению технологических и экономических показателей.

Основным недостатком переработки отходов с использованием Комплекса ВТПК является низкая степень внутреннего использования  $CO_2$  –  $w=5\%$ . Степень внутреннего использования  $CO_2$  рассчитывали по формуле  $w=A/(C+D)$ , где А – количество плазмообразующего  $CO_2$ , кг/час; С – количество  $CO_2$ , выделенного из пирогаза, кг/час; D – количество  $CO_2$ ,

выделенного из газообразных продуктов ГТУ, кг/час. Малая величина  $w$  объясняется использованием  $\text{CO}_2$  в технологической схеме Комплекса ВТПК только в качестве плазмообразующего газа.

Помимо низкой степени использования  $\text{CO}_2$  ( $w$ ), Комплекс ВТПК, обеспечивая решение основной задачи – переработки высокотоксичных ртутьсодержащих отходов ОИС, не обладает достаточными экономическими преимуществами: имеет высокие капитальные затраты, большой (хотя и реальный) срок окупаемости и относительно низкую прибыль.

Кроме низкой степени использования  $\text{CO}_2$ , не высокое значение имеет степень замещения природного газа горючими компонентами синтез-газа (6,0 – 6,5%). Нерешенной остается проблема использования большого количества  $\text{CO}_2$ , выделенного из пирогаза и газообразных продуктов ГТУ.

Решить эти проблемы возможно с помощью более глубокой переработки газообразных продуктов пиролиза одновременно с выделением и переработкой  $\text{CO}_2$ .

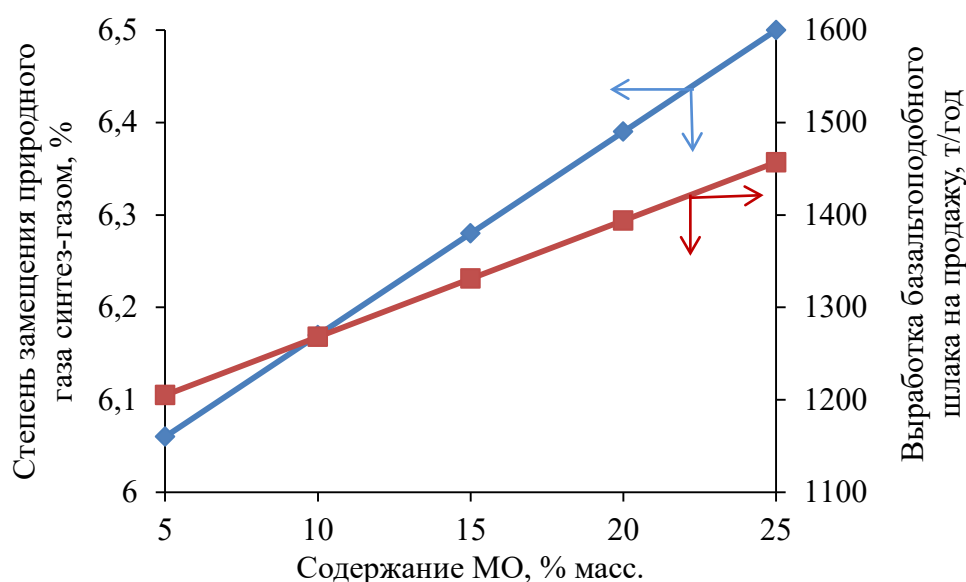


**Рис. 5.** Зависимость степени замещения природного газа синтез-газом и выработка базальтоподобного шлака (БПШ) при работе Комплекса ВТПК по переработке отходов, содержащих отработанную ионообменную смолу, от содержания медицинских отходов (МО) в составе отходов. Производительность Комплекса ВТПК по отходам 12500 т/год.

**Fig. 5.** Dependence of the degree of replacement of natural gas with synthesis gas and the production of basalt-like slag during the operation of the HTPC Complex for the processing of waste containing spent ion-exchange resin on the content of medical waste (MW) in the composition of the waste. The productivity of the HTPC Complex for waste is 12500 tons / year.

## ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. Использование Комплекса ВТПК для переработки высокотоксичных ртутьсодержащих отходов ОИС позволяет нейтрализовать и купировать эти отходы вместе с медицинскими, биологическими и другими опасными отходами.

2. Помимо переработки отходов Комплекс ВТПК обеспечивает регион своего расположения значительным количеством тепловой и электрической энергии, замещая углеводородные источники этой энергии.
3. В среднесрочной перспективе (14 – 15 лет) Комплекс ВТПК окупается и обеспечивает прибыль в размере около 200 млн. руб. в год.
4. Улучшение экономических показателей работы Комплекса ВТПК возможно с углублением переработки пирогаза и CO<sub>2</sub>.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

### CONFLICT OF INTERESTS:

*The authors declare no conflict of interests.*

### Список литературы:

1. Волков Г.И. (1968). *Производство хлора и каустической соды методом электролиза с ртутным катодом*. М.: Химия, 276 с.
2. Вощинин С.А., Артемов А.В., Переславцев А.В. Кулыгин В.М. (2017). Новые технологии высокотемпературной пиролитической переработки отходов. *Твердые бытовые отходы*, 8, 28–32.
3. Артемов А.В., Переславцев А.В., Вощинин С.А., Тресвятский С.С., Коробцев С.В. (2021). Получение базальтовых волокон из базальтоподобного шлака плазменной переработки отходов. *Химическая технология*. 22(7), 294–298.
4. Переславцев А., Вощинин С., Артемов А. (2020). *Плазменная переработка отходов производства и потребления*. Кишинев: Lambert Academic Publishing, – 361 с.

### References:

1. Volkov G.I. (1968). Production of chlorine and caustic soda by electrolysis with a mercury cathode. M.: Chemistry, 276 p. (in Russ.).
2. Voshchinin S.A., Artemov A.V., Pereslavitsev A.V. & Kulygin V.M. (2017). New technologies for high-temperature pyrolytic waste processing. *Solid domestic waste*, 8, 28–32. (in Russ.).
3. Artemov A.V., Pereslavitsev A.V., Voshchinin S.A. Tresvyatsky S.S., & Korobtsev S.V. (2021). Obtaining basalt fibers from basalt-like slag from plasma processing of waste. *Chemical Technology*. 22(7), 294–298. (in Russ.).
4. Pereslavitsev A., Voshchinin S., & Artemov A. (2020). Plasma processing of production and consumption waste. Chisinau: Lambert Academic Publishing, 361 p. (in Russ.).