

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.04.033>

УДК 517.58/.5892

**А.Ф. Булат, Л.Т. Холявченко, С.Л. Давыдов, С.А. Опарин**

Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепр

E-mail: oparinsa@mail.ru

## **Оценка экономической и экологической эффективности замещения технологии прямого сжигания твердого топлива пароплазменной газификацией**

*Представлено академиком НАН Украины А.Ф. Булатом*

*Установлены зоны экономической эффективности применения технологии предварительной подготовки твердого топлива переводом его в газообразное состояние пароплазменной газификацией и традиционной технологии прямого сжигания, пределы и динамика их расширения в зависимости от степени утилизации тепла генерируемых газов, цен на топливо и электроэнергию. Сравнительной оценкой установленных параметров показано, что технология подготовки угля пароплазменной газификацией дает экономию в потреблении и переработке первичного сырьевого ресурса на 40–45 %. Прямой экономический эффект от применения этой технологии может быть достигнут при определенном уровне цен на электроэнергию, уголь и степени утилизации вторичного тепла. При этом вредные выбросы в окружающую среду станут на порядок ниже допустимых европейских стандартов. Приведен ряд дополнительных преимуществ «новой» технологии.*

**Ключевые слова:** *твердое топливо, прямое сжигание, пароплазменная газификация, теплопроизводительность, себестоимость, утилизация, экология.*

Украина импортирует 60–70 млрд м<sup>3</sup> природного газа, практически весь необходимый объем нефти и нефтепродуктов, попадая таким образом в энергозависимость от условий поставок и цен на эти продукты на мировом рынке. Не менее важная проблема – низкая энергоэффективность предприятий, особенно ориентированных на экспорт (металлургическая и химическая отрасли). По оценкам Международной экономической ассоциации (МЭА) экономика Украины относится к одной из наиболее энергозатратных в Европе, где энергоемкость ВВП выше, чем в богатой энергоресурсами России в 1,5–2 раза и в 3 раза, чем в ЕС. В этих условиях разработка источников энергии альтернативных нефти и газу для Украины, где их запасы практически исчерпаны или же добыча ограничена геологией залегания, имеет актуальный характер.

Наиболее близкой альтернативой нефти и газу является уголь. В недрах Украины находится около 34 млрд т. доказанных его запасов, размещенных практически равномерно во всех регионах и рассматривается в качестве одного из основных и перспективных энер-

© А.Ф. Булат, Л.Т. Холявченко, С.Л. Давыдов, С.А. Опарин, 2017

ISSN 1025-6415. Допов. Нац. акад. наук Укр. 2017. № 4

горесурсов. При нынешних темпах потребления его достаточно на 200–250 лет, в то время как природного газа и нефти в мире едва ли хватит на ближайшие 40–60 лет. Но уголь, при прямом его сжигании, из-за высокого уровня загрязнения окружающей среды и высокой эмиссии  $\text{CO}_2$  является «грязным» энергетическим сырьем [1]. В этом случае в полезный продукт вовлекается всего 20–30% природного вещества (углерода), остальное выбрасывается в окружающую среду в виде пыли, неиспользованной энергии отходящих газов, золы, нанося ей непоправимый ущерб. Построенная на принципе одноцелевого его использования, технология прямого сжигания изначально обречена на многие недостатки, которые заключаются в: использовании громоздких и дорогостоящих систем обогащения топливоподготовки и подачи; неизбежном механическом «недожоге» (10–20%) углерода; необходимости обустройства систем золо- и шлакоудаления, дорогих и небезопасных мест захоронения миллионов тонн твердых и жидких отходов; строительстве дорогостоящих систем газоочистки от пыли, оксидов и токсичных соединений [1]. Все это связано с большими материальными и трудовыми затратами. Технологии прямого сжигания экологически вредны из-за выбросов в окружающую среду токсичных веществ и газа, превышающих установленные нормы. Очевидно, что на их смену должны прийти новые многоцелевые, безотходные, энергосберегающие, экологически чистые технологии перевода «грязного» энергетического сырья в газ.

Одним из путей замещения технологии прямого сжигания является предварительная подготовка твердого топлива переводом его в газообразное состояние пароплазменным способом с последующим использованием газа в теплоэнергетике без изменения существующей ее инфраструктуры. Способ характерный протеканием процессов в режиме  $2-5 \cdot 10^3$  К температур, что обеспечивает высокую скорость и производительность химического процесса в непрерывном потоке, широкий диапазон регулирования параметров и глубокую степень его автоматизации. Пароплазменная газификация позволяет довести степень переработки углерода в конденсированной фазе до 98–99%, снизить объемы добычи и переработки топлива на 40–45%, избежать процессов специального производства окислителя (кислорода), совмещая его производство из воды в едином процессе газификации; сократить капитальные затраты, связанные с дорогостоящим функциональным оборудованием его производства [2, 3]. Технология («новая») универсальна к исходной среде и селективна по выходу конечного продукта, который при обоснованных режимах термохимических превращений, на 98–99% представлен синтез-газом [3, 4]. Исходя из этого, следует установить экономическую и экологическую эффективность замещения технологии прямого сжигания твердого топлива на технологию предварительного перевода его в газообразное состояние пароплазменным способом в зависимости от степени утилизации тепла генерируемых газов, цены на топливо и энергию, вводимую в процессах термопревращений.

Оценка экономической эффективности выполнена на базе угля марки АШ-1, как наиболее распространенного в промышленной теплоэнергетике, результатах термодинамического и физического моделирования процессов пароплазменной газификации [2, 3].

В качестве базы сравнения принята традиционная технология производства тепла прямым сжиганием углей («базовая») указанной марки в котлах ТПП-210 общей теплопроизводительностью  $Q = 540$  Гкал/ч. Котел состоит из двух автономных блоков  $Q_6 = 270$  Гкал/ч, расход угля каждого  $G_y^6 = 62,4$  т/ч [5]. В дальнейших расчетах воспользуемся показателями

для одного блока. Исходя из стоимости угля ( $\Pi_y$ ) (на момент расчета 1365 грн/т), определяем «базовую» стоимость 1 Гкал тепла при прямом его сжигании без капитальных и операционных затрат

$$C^6 = \frac{G_y^6 \cdot \Pi_y}{Q_6} = \frac{62,4 \cdot 1365}{270} = 315,5 \text{ грн/Гкал.}$$

Удельная базовая теплопроизводительность 1 тонны угля ( $Q_{уд}^6$ ):

$$Q_{уд}^6 = \frac{Q_6}{G_y^6} = \frac{270}{62,4} = 4,33 \text{ Гкал/т.}$$

Определим стоимость 1 Гкал тепла, полученного по «новой» технологии. Допускаем, что газ, произведенный таким способом, будет использован в энергетических целях для получения единицы тепла (Гкал) на том же оборудовании (котле), не предполагающем каких-либо затрат на его модернизацию. Установлено [2], что оптимальная температура процесса паровой газификации угля составляет  $(1,8-2) \cdot 10^3$  К, при которой наблюдаются максимальный выход газа  $V_k = 2,86 \text{ Н} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$  угля и наибольшая его калорийность  $Q_{с.г.} = 11,6 \text{ МДж/м}^3$ , а удельные энергозатраты процесса пароплазменной газификации составляют  $\omega_{уд}^m = 3,16 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$  угля [6].

Общее тепло пароплазменной газификации угля (конверсии) ( $Q_k^{п-п}$ ) состоит из количества тепла, содержащегося в генерируемых (отходящих) газах ( $Q_k^{o.г.}$ ) при  $T_r = (1,7 \div 1,8) \times 10^3$  К, и тепла от сжигания этих газов ( $Q_{гор}$ ):

$$Q_k^{п-п} = Q_k^{o.г.} + Q_{гор}, \quad (1)$$

$$Q_k^{o.г.} = \omega_{уд}^{o.г.} G_y^6, \quad (2)$$

$$Q_{гор} = Q_{с.г.} G_y^6 V_k, \quad (3)$$

где  $\omega_{уд}^{o.г.}$  – удельный показатель количества тепла в отходящих газах при пароплазменной газификации 1 кг угля. Значение  $\omega_{уд}^{o.г.}$  рассчитано, исходя из энтальпии элементов, составляющих отходящие газы, при температуре 2000 К,  $\omega_{уд}^{o.г.} = 2,1 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг}$  угля =  $2,1 \cdot 3,6 \text{ МДж/кг}$  угля =  $7,56 \text{ МДж/кг}$  угля [6].

При термопревращениях «базового» количества угля  $G_y^6 = 62,4 \text{ т/ч}/Q_k^{o.г.}$  равно

$$Q_k^{o.г.} = 7,56 \cdot 10^6 \cdot 62,4 \cdot 10^3 = 471,7 \cdot 10^9 \text{ Дж/ч} = \frac{471,7}{4,19} \cdot 10^9 = 112,6 \text{ Гкал/ч.}$$

Получаем  $Q_{гор} = 11,6 \cdot 10^6 \cdot 62,4 \cdot 10^3 \cdot 2,86 = 2070 \cdot 10^9 \text{ Дж/ч} = 494,1 \text{ Гкал/ч.}$

Тогда, согласно формуле (1), теплопроизводительность продуктов пароплазменной газификации 62,4 т/ч угля  $Q_k^{п-п} = 112,6 + 494,1 = 606,7 \text{ Гкал/ч}$ . Удельная теплопроизводительность составит:

$$Q_{уд}^{п-п} = \frac{Q_k^{п-п}}{G_y^6} = \frac{606,7}{62,4} = 9,72 \text{ Гкал/т.}$$

При прямом сжигании угля этот показатель равен  $Q_{уд}^6 = 4,33 \text{ Гкал/т}$ , что в 2,24 раза меньше и объясняется механическим недожогом угля, составляющем 20–22 %, использованием воздуха в качестве окислителя и низкой температурой превращений угля при прямом

его сжигании. Для достижения базовой теплопроизводительности ( $Q_6 = 270$  Гкал/ч) по «новой» технологии угля достаточно в количестве:  $G_y^{п-п} = Q_6 / Q_{уд}^{п-п} = 270 / 9,72 = 27,8$  т/ч.

Тогда экономия угля составит:  $G_{э,у}^{п-п} = (G_y^6 - G_y^{п-п}) = 34,6$  т/ч, или в денежном выражении за год 283,9 млн грн при указанной цене на уголь. Однако процесс газификации сопровождается затратами в потреблении электроэнергии для поддержания реакций в аллотермических процессах газификации и на получение окислителя из воды. С учетом этих затрат стоимость 1 Гкал ( $C_{т-ла}^{п-п}$ ) будет состоять из двух составляющих: стоимости угля, переведенного в газовое состояние, ( $C_y^{п-п}$ ) и затрат на электроэнергию:

$$(C_{эл.э}^{п-п}): C_{т-ла}^{п-п} = C_y^{п-п} + C_{эл.э}^{п-п}. \quad (4)$$

Стоимость 1 Гкал тепла по углю

$$C_y^{п-п} = \frac{G_y \cdot \Pi_y}{Q_6} = \frac{27,8 \cdot 1365}{270} = 140,5 \text{ грн/Гкал.}$$

Расход электроэнергии (Эл.<sup>п-п</sup>) на газификацию 27,8 т/ч угля составит:

$$\text{Эл.}^{п-п} = \omega_{уд}^T \cdot G_y^{п-п} = 3,16 \cdot 27,8 \cdot 10^3 = 87,8 \cdot 10^3 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

Тогда, стоимость 1 Гкал по электроэнергии

$$C_{эл.э}^{п-п} = \frac{\text{Эл.}^{п-п} \cdot \Pi_{эл.э}}{Q_6} = \frac{87,8 \cdot 10^3 \cdot 0,9}{270} = 292,7 \text{ грн/Гкал,}$$

где  $\Pi_{эл.э}$  — цена электроэнергии,  $\Pi_{эл.э} = 0,9$  грн/кВт·ч.

Согласно формуле (4), стоимость 1 Гкал тепла в целом составит  $C_{т-ла}^{п-п} = 140,5 + 292,7 = 433,16$  грн/Гкал, что на 37–38 % выше базовой.

Таким образом, производство 1 Гкал тепла с подготовкой угля пароплазменной газификацией, может обеспечить 45–50 % экономию первичного сырьевого ресурса (угля). Однако потребление электроэнергии на газификацию и получение окислителя поглощает эту экономию, а итоговая стоимость 1 Гкал на 37–38 % выше, чем при прямом сжигании угля.

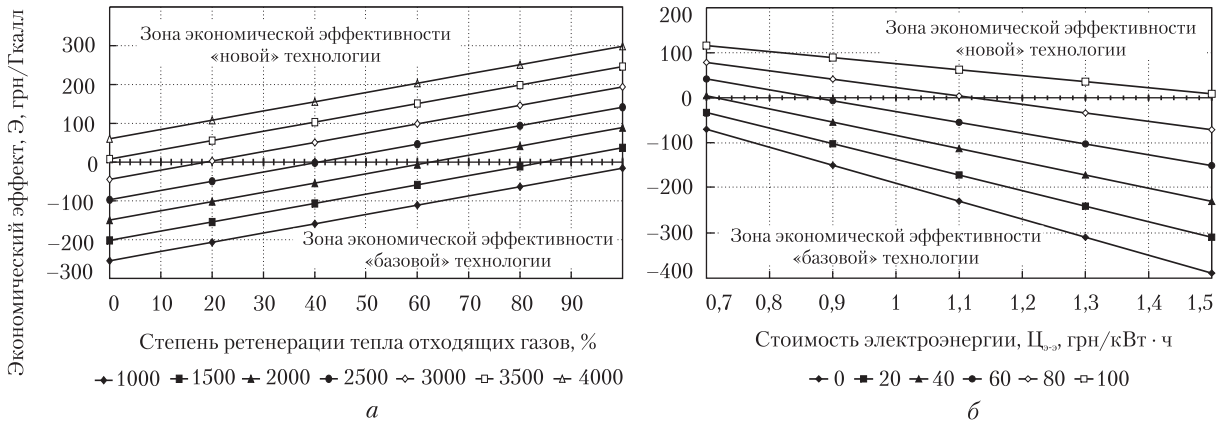
Рассмотрим некоторые пути снижения стоимостных показателей процесса пароплазменной подготовки угля. Так если тепло отходящих газов  $Q_k^{0,г}$  максимально утилизируется (регенерируется) в процесс газификации путем подогрева твердого топлива и окислителя или утилизируется другим способом. В этом случае учитываем теплопроизводительность только от сжигания газа ( $Q_{гор}$ ) генерируемого из 62,4 т угля ( $Q_{гор} = 494,1$  Гкал/ч (см. формулу (3))). С регенерацией тепла отходящих газов удельная теплопроизводительность

$$Q_{(уд)}^{п-п(р)} = \frac{Q_{гор}}{G_y^6} = \frac{494,1}{62,4} = 7,92 \text{ Гкал/т.}$$

В этом случае количество угля, необходимого для обеспечения базовой теплопроизводительности  $Q_6 = 270$  Гкал/ч, будет:

$$Q_y^{п-п(р)} = \frac{Q_6}{Q_{(уд)}^{п-п(р)}} = \frac{270}{7,92} = 34,1 \text{ т/ч.}$$

Экономия угля составит 28,3 т/ч, что на 45 % меньше базовых расходов.



Экономическая эффективность замещения технологии прямого сжигания угля технологией подготовки топлива пароплазменной газификацией: а —  $\Pi_{э-э} = 0,9$  грн/кВт·ч; б —  $\Pi_y = 2000$  грн/т

Если утилизировать тепло отходящих газов  $Q_{к}^{0,г}$  в процессе газификации, удельные массовые ( $\omega_{уд}^{т(р)}$ ) и удельные объемные ( $\omega_{уд}^{V(р)}$ ) энергозатраты можно определить по формуле:

$$\omega_{уд}^{т(р)} = \omega_{уд}^т - (\omega_{уд}^{0,г} \Delta\omega_p); \quad \omega_{уд}^{V(р)} = \omega_{уд}^{т(р)} / V_k, \quad (5)$$

где  $\omega_{уд}^{0,г}$  — удельная массовая энергия отходящих газов при газификации угля (см. формулу (2));  $\Delta\omega_p$  — степень утилизации тепла или доля энергии отходящих газов, возвращенная в процесс газификации (задается в %).

Определяем стоимость 1 Гкал, полученной по «новой» технологии с учетом регенерированного тепла ( $C_{т-ла}^{п-п}$ ). Для этого необходимо определить стоимость генерируемого газа ( $C_{с,г}^{п-п(р)}$ ), которая состоит из затрат на энергию для термических превращений массы угля и стоимости этой массы угля:

$$C_{с,г}^{п-п(р)} = G_y^{п-п(р)} \Pi_{э-э} \omega_{уд}^{т(р)} + G_y^{п-п(р)} \Pi_y.$$

Тогда

$$C_{т-ла}^{п-п} = \frac{C_{с,г}^{п-п(р)}}{Q_6},$$

а эффективность (Э, грн/Гкал) от замещения технологий определится по формуле:

$$\mathcal{E} = C_{т-ла}^б - C_{т-ла}^{п-п}.$$

Экономический анализ замещения технологии прямого сжигания углей иллюстрируется зонами экономической эффективности использования сравниваемых технологий в зависимости от степени утилизации вторичного тепла, динамики цен на уголь и электроэнергию (см. рис. а и б).

Очевидно (рис., а), что зона экономической эффективности применения «новой» технологии расширяется с увеличением цены твердого топлива, степени утилизации вторичного тепла и заметно снижается с увеличением цены на электроэнергию (рис., б).

Так, при стоимости угля 1500 грн/т (рис., а) стоимость 1Гкал будет меньше «базовой» при  $\Delta\omega_p > 86\%$ , а, например, при 4000 грн/т экономическая эффективность «новой» технологии будет равна 60 грн/Гкал даже без учета степени утилизации. Более динамично на колебани-

ях эффективности «новой» технологии сказывается изменение стоимости электроэнергии. При стоимости угля 2000 грн/т и электроэнергии 0,7 грн/кВт·ч (рис., б) экономический эффект «новой» технологии возможен при  $\Delta\omega_p \geq 40\%$ , при 1,1 грн/кВт·ч — когда  $\Delta\omega_p > 80\%$ . При стоимости электроэнергии 1,5 грн/кВт·ч, даже при 100% утилизации вторичного тепла (рис., б), экономический эффект совсем отсутствует.

Таким образом, установлены зоны экономической эффективности применения технологии прямого сжигания и технологии предварительной подготовки твердого топлива переводом его в газообразное состояние пароплазменной газификацией. Показана динамика изменения этих зон в зависимости от степени утилизации тепла отходящих газов, цен на топливо и электроэнергию. Установлено, что в теплоэнергетике пароплазменная подготовка угля может дать экономию в переработке первичного сырьевого ресурса на 40–45%, но экономическая ее эффективность в значительной степени зависит от стоимости окислителя, энергии, вводимой в процессах аллотермических превращений и степени утилизации тепла генерируемых газов.

Однако, рассматривая проблему в аспекте энергетической и экологической безопасности, экономическая целесообразность сравниваемых технологий может стать не определяющей, когда дополнительно решаются определенные проблемы. Применением пароплазменных технологий в полной мере решаются проблемы экологической безопасности,

**Концентрация газов, в том числе вредных выбросов, в технологиях термопревращений твердого топлива**

Показатель		Технология термических превращений					
		Сжигание [7]		Автотермическая [8]		Аллотермическая плазменная [2]	
Окислитель		воздух		O <sub>2</sub> + пар		воздух	
Выход газа, V <sub>к</sub> , м <sup>3</sup>		—		1,8–2,1		3,0–4,0	
						пар	
						2,6–3,2	
Газовая фаза							
Вредн. выброс, мг/м <sup>3</sup>			Продукты термопревращений, %				Выбросы
химические соединения	нормы ЕС	фактические значения	химические соединения	V <sub>к</sub> , %	% от V <sub>к</sub>		мг/м <sup>3</sup>
Пыль	<10	16	H <sub>2</sub>	35–45	30–31	54–60	6
HCl	<10	35	CO	20–40	34,1	35–40	0,3
NO <sub>x</sub>	<400	362	C H <sub>4</sub>	0–10	0	0	0–110
CO <sub>2</sub>	<50	48	CO <sub>2</sub>	13–27	28	0,3	2–10
SO <sub>2</sub>	<50	65	N <sub>2</sub>	—	20–30	0	20
Pb	<0,1	0,19	H <sub>2</sub> + CO	57–85	65,1	95–99	0,02
Тяжелые металлы	<0,1	0,1	Пыль, смолы	—	Пыль	—	0,01
Диоксин, фураны	<0,1	0,5	—	—	—	—	0,001
Зольный остаток		Высоко-реакционный	Малореакционный		Нейтральный	Нейтральный	
Атмосферные выбросы		Высокие	Средние		Низкие	Очень низкие	

остро стоящие при прямом сжигании твердого топлива. Уголь, твердые бытовые отходы в экологическом плане являются «грязным» источником энергии и прямое их сжигание неизбежно сопровождается выбросами в окружающую среду большого количества токсичных и вредных соединений (сернистые соединения, оксиды азота, диоксины, фураны, зола). Концентрации их выбросов в окружающую среду значительно превышают допустимые нормы (таблица). Полная замена газа и нефти в мировой экономике прямым сжиганием угля усугубляет проблему и может угрожать человечеству тяжелыми экологическими последствиями. Приведение окружающей среды к требованиям европейских стандартов трудоемкое и дорогостоящее мероприятие.

Широкоизвестные автотермические технологии перевода твердого топлива в газовое состояние [1, 8], в определенной мере, решают экологические проблемы, снижая вредные выбросы в окружающую среду. Однако 13–30 % газовой фазы (см. таблицу) составляет  $\text{CO}_2$ , что вытекает из основы автотермических технологий – сжигания части газифицируемого топлива для поддержания реакций термопревращений.

Из-за сравнительно низкой температуры термопревращений (800–1800 К), недостаточной для полной деструкции вредных и токсичных соединений, в окружающую среду могут попадать смолы, мазут, пыль, ароматические углеводороды, высокореакционные зольные остатки. Применение воздуха в качестве окислительной среды на 50–60 % наполняют газовую фазу балластным азотом.

Высокотемпературные третьего поколения аллотермические пароплазменные технологии подготовки угля, отличающиеся большой концентрацией энергии в единице объема реакционного пространства ( $10^2$ – $10^3$ ) Вт/см<sup>2</sup> и высокой температурой  $(2$ – $5) \cdot 10^3$  К, могут на порядок и больше снизить концентрацию вредных соединений (см. таблицу) и привести их в нормы, ниже европейских стандартов. В условиях этих технологий среды различных физико-химических характеристик перерабатываются путем деструкции их химических элементов.

Сюда могут относиться угли различной степени метаморфизма, твердые бытовые отходы, токсичные и вредные органические соединения. Побочные составляющие, двуокись углерода, сероводород и другие вредные соединения в газовой фазе при оптимальном соотношении углерода и окислителя не превышают 1,5–2 % объема газовой фазы или проявляются в следах.

Зольные остатки, химически нейтральные из-за отсутствия в них углерода, пригодны к использованию в строительной индустрии или подлежат безвредному захоронению (см. таблицу). Высокотемпературные пароплазменные превращения органических сред универсальны к составляющим исходного сырья, реагируя только на углерод и остро селективны к ингредиентам выходного (полезного) продукта. Газовая фаза здесь на 98–99 % состоит из синтез-газа ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ). Универсальные свойства к исходному сырью, строгая селективность по выходному продукту «новой» технологии, позволяют полностью решить проблему дебаланса разведанных, добываемых и используемых углей в энергетике, химическом синтезе и в металлургии прямого восстановления железа. Применение пароплазменной технологии термопревращений перспективно экономией исходного сырья за счет перехода в конечный продукт высокоэнтальпийного водорода из состава окислительной среды. За счет этого объемный выход газовой фазы повышается на 40–45 % и ее калорийность в 2–2,5 раза (доходя

до 11,5–12 МДж/м<sup>3</sup>). При реализации плазмохимических процессов в потоке, где в реакционном пространстве температура составляет 2000–5000 К, а скорость термопревращений возрастает на несколько порядков и где генерация окислительной среды совмещена во времени и пространстве с термопревращениями углерода, оборудование отличается малыми габаритами и металлоемкостью. Это снижает капитальные затраты, которые в автотермических технологиях служат сдерживающим фактором их дальнейшего распространения. Плазмохимический реактор (модуль) является независимым источником тепловой энергии, что позволяет в широком диапазоне управлять процессом, максимально автоматизировать его и заметно снизить операционные затраты технологии теплопроизводства.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков М.Ф., Калинин Р.А., Левицкий А.А., Полак Л.С. Плазмо-химическая переработка угля. Москва: Наука, 1990. 200 с.
2. Булат А.Ф., Алымов Б.Д., Холявченко Л.Т., Давыдов С.Л. Комплексная переработка водоугольного топлива при его плазменной газификации. *Геотехн. механика*. 2010. Вып. 81. С. 20–27.
3. Давыдов С.Л. Пароплазменная переработка дисперсной системы вода-уголь. *Геотехн. механика*. 2012. Вып. 98. С. 10–18.
4. Рутберг Ф. Плазменные технологии для возобновляемой энергетики. *Балтийский горизонт*. 2013. № 4 (12). С. 6–9.
5. Плазменная газификация отходов с использованием пароводяной плазмы. URL: <http://plazarium.com>.
6. Шагелова С.Л., Шницер И.Н. Сжигание твердого топлива в топках парогенераторов. Ленинград: Энергия, 1976. 172 с.
7. Опарин С.А., Холявченко Л.Т., Давыдов С.Л. Критерии оценки и методика расчета технико-экономических показателей плазменной газификации углеродсодержащих сред. *Вопросы химии и хим. технологии*. 2016. 3 (107). С. 70–76.
8. Тютюнников Ю.Б., Шептовицкий М.С., Шульга И.В. Газификация твердых топлив. Харьков : ХИЭИ, 1994. 64 с.

Поступило в редакцию 30.12.2016

#### REFERENCES

1. Zhukov, M. F., Kalinenko, R. A., Levitskiy, A. A. & Polak, L. S. (1990). Plasma-chemical processing of coal. Moscow: Nauka (in Russian).
2. Bulat, A. F., Alymov, B. D., Holyavchenko, L. T. & Davydov, S. L. (2009). Complex Recycling of Cool-Water Fuel in the Course of Plasma Gasification, Iss. 81, pp. 20-27 (in Russian).
3. Davydov, S. L. (2012). Steam-plasma conversion of water coal dispersion system, Iss. 98, pp. 10-18 (in Russian).
4. Rutberg, F. (2013). Plasma technology for renewable energy. *Baltiskiy gorizont*, No. 4 (12), pp. 6-9 (in Russian).
5. Plasma gasification of wastes with the use of steam-water plasma. Available at <http://plazarium.com/>.
6. Shagelova, S. L. & Shnitser, I. N. (1976). Combustion of solid fuel in the furnaces of steam generators. Leningrad: Energiya (in Russian).
7. Oparin, S. A., Holyavchenko, L. T. & Davydov, S. L. (2016). Performance characteristics of plasma gasification of carbon-containing media: evaluation criteria and computational procedure. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, 3 (107), pp. 70-76 (in Russian).
8. Tyutyunnikov, Yu. B., Sheptovitskiy, M. S. & Shulga, I. V. (1994). Gasification of solid fuels. Kharkov: KhIEI (in Russian).

Received 30.12.2016

*А.Ф. Булат, Л.Т. Холявченко, С.Л. Давидов, С.О. Опарін*

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро

E-mail: oparinsa@mail.ru

#### ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАМІЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПРЯМОГО СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДОГО ПАЛИВА ПАРОПЛАЗМОВОЮ ГАЗИФІКАЦІЄЮ

Встановлені зони економічної ефективності застосування технології попередньої підготовки твердого палива переведенням його в газоподібний стан пароплазмозомою газифікацією і традиційної технології прямого спалювання, межі та динаміка їх розширення в залежності від ступеня утилізації тепла генеруючих газів, цін на паливо і електроенергію. При порівняльній оцінці встановлених параметрів показано, що технологія підготовки вугілля пароплазмозомою газифікацією дає економію у споживанні та переробці первинного сировинного ресурсу на 40–45%. Прямого економічного ефекту від застосування цієї технології можна досягнути при певних рівнях цін на електроенергію, вугілля і ступені утилізації вторинного тепла. При цьому шкідливі викиди в навколишнє середовище стануть на порядок нижчими від допустимих європейських стандартів. Наведено ряд додаткових переваг «нової» технології.

**Ключові слова:** *тверде паливо, пряме спалювання, пароплазмозома газифікація, теплопродуктивність, собівартість, утилізація, екологія.*

*A.F. Bulat, L.T. Holiavchenko, S.L. Davydov, S.A. Oparin*

M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics of the NAS of Ukraine, Dnipro

E-mail: oparinsa@mail.ru

#### EVALUATION OF THE ECONOMIC ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF THE REPLACEMENT OF TECHNOLOGIES OF DIRECT COMBUSTION OF A SOLID FUEL BY THE STEAM-PLASMA GASIFICATION

We establish the zones of economic efficiency of the application of the technology of preliminary preparation of solid fuel with its transfer into the gaseous state by the steam-plasma gasification and traditional technologies of direct combustion, the boundaries and the dynamics of their expansion depending on the degree of heat recovery gas generation and the prices of fuel and electricity. By a comparative evaluation of the established parameters, it is shown that the preparation technology of coal by the steam-plasma gasification provides savings in the consumption and processing of a primary raw resource by 40–45%. The direct economic effect from the use of this technology can be achieved at certain levels of prices of electricity and coal and waste heat recycling. The harmful emissions will be well below acceptable European standards. A number of additional benefits of the "new" technology are given.

**Keywords:** *solid fuel, direct combustion, steam-plasma gasification, heat production, prime cost, recycling, ecology.*