

DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-4-122-139

УДК: 66.021.4.046

ГРНТИ: 47.13.07

EDN: CHBQDD



## Производство металлов, неметаллов, энергии и энергоносителей методом плазменно-дугового электролитического центробежного конвертирования

А.Е. Волков<sup>1</sup> ©, А.А. Волков<sup>2, а</sup> ©

<sup>1</sup> ООО «АдиРУТ»,  
г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет  
имени первого президента России Б.Н. Ельцина,  
г. Екатеринбург, Российская Федерация

<sup>а</sup> E-mail: aa.volkov@urfu.ru

**Аннотация.** Новая технология плазменно-дугового электролитического центробежного конвертирования (ПДЭЦК) предназначена для снижения материалоемкости, времени и энергозатрат при производстве различных продуктов, в виде металлов, неметаллов и энергоносителей. Поставленная задача решается путем объединения металлургического, химического и энергетического производства в единый производственный комплекс. Все вредные выбросы, которые сегодня сопровождают металлургическое, химическое и энергетическое производство для новой технологии выступают в качестве реагентов, из которых производят полезные продукты, направляемые на рынок. Для энергоэффективного разделения вещества требуется концентрация максимально возможного количества различных химических элементов в месте плавления, которые служат катализаторами, снижающими энергозатраты на проведение реакций. Процессы производства и потребления энергии заключаются в замкнутое пространство контуров, где образующиеся реагенты перераспределяются между участками производства, повторно возвращаясь на переработку, что позволяет удерживать низкопотенциальное тепло от потерь в окружающую среду. На сегодня, тепловые и атомные электростанции, а также металлургические и нефтехимические заводы сбрасывают в окружающую среду около двух третей вырабатываемой тепловой энергии. В процессе ПДЭЦК эта энергия перенаправляется с одного производства на другое, позволяя в несколько раз больше перерабатывать рудоуглеродородного сырья. Для устранения вредных выбросов в атмосферу требуется энергия, которая высвобождается за счет системы объединяющей производство энергии с горно-металлургическим и химическим производством. Переработка вещества производится под действием энергии, вырабатываемой путем сжигания водорода, извлекаемого из углеводородного сырья, в кислороде, извлекаемом из руды. Вся энергия, которая производится и не расходуется на внешнее потребление, переводится в метанол, который служит накопителем водорода и соответственно энергии. Передача энергии на большие расстояния производится за счет транспортировки метанола по трубопроводам с возвращением на место переработки вещества углекислого газа, который идет на образование плазмы.

**Ключевые слова:** центробежное конвертирование, плазма, электролиз, энергоэффективность, сепарация, фотокатализ, плавление, испарение, диссоциация, энергосбережение

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ: Волков А.Е., Волоков А.А. Производство металлов, неметаллов, энергии и энергоносителей методом плазменно-дугового электролитического центробежного конвертирования // Computational Nanotechnology. 2023. Т. 10. № 4. С. 122–139. DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-4-122-139. EDN: CHBQDD

# Metal, Nonmetal, Energy and Energy Carrier Production by Plasma Arc Electrolytic Centrifugal Conversion

A.E. Volkov<sup>1</sup> ©, A.A. Volkov<sup>2, a</sup> ©

<sup>1</sup> AdiRUT LLC,  
Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Yekaterinburg, Russian Federation.

<sup>a</sup> E-mail: aa.volkov@urfu.ru

**Abstract.** The new plasma arc electrolytic centrifugal conversion process is intended to reduce material consumption, time and energy costs when producing various products represented by metals, nonmetals and energy carriers. The task is accomplished through combining the metallurgical, chemical and energy production into an integral production facility. All polluting emissions associated today with the metallurgical, chemical and energy sectors serve as reagents for the new process and are used for manufacture of useful products sent to the market. Energy saving substance separation requires concentration of the maximum possible amount of various chemical elements in the melting area; they serve as catalysts reducing the reaction energy consumption. The energy production and consumption processes are closed loop with the generated reagents redistributed among the production areas and reversed for recycling what allows low potential heat retaining from losses to the environment. As of today, thermal and nuclear power stations as well as metallurgical and petrochemical plants discharge about two thirds of the produced heat energy to the environment. In the plasma arc electrolytic centrifugal conversion process the energy is diverted from one production process to another allowing several times higher hydrocarbon processing. Elimination of harmful emissions into the atmosphere requires energy released due to the system combining the energy production with the mining, metallurgical and chemical industries. The substance processing is induced by the energy produced when burning hydrogen derived from hydrocarbon materials in oxygen recovered from ore. All energy produced but not consumed for external energy demand, is transferred into methanol serving as hydrogen, and therefore energy, accumulator. Energy is transferred over large distances by methanol transportation over pipelines with the return to the processing area of carbon dioxide gas, required for plasma initiation.

**Key words:** centrifugal conversion, plasma, electrolysis, energy performance, separation, photocatalysis, melting, evaporation, dissociating, energy saving

FOR CITATION: Volkov A.E., Volkov A.A. Metal, Nonmetal, Energy and Energy Carrier Production by Plasma Arc Electrolytic Centrifugal Conversion. *Computational Nanotechnology*. 2023. Vol. 10. No. 4. Pp. 122–139. (In Rus.) DOI: 10.33693/2313-223X-2023-10-4-122-139. EDN: CHBQDD

## ВВЕДЕНИЕ

Эффективность любого производства связана с энергопотреблением, количеством технологических переходов, сложностью оборудования и количеством различных веществ, необходимых для реализации этого производства. Поэтому для повышения энергоэффективности целесообразно выстраивать такую схему, где создается единый комплекс оборудования, обеспечивающий одновременно различные виды производства, в котором между производственными участками перераспределяются потоки вещества и энергии.

Предлагаемый процесс ПДЭЦК в качестве сырья использует смесь руды и углеводородов, включая стадии восстановления, рафинирования и разделения химических веществ, используя плазмохимические реакции, фотокатализ, электролиз, крекинг, облучение потоком элементарных частиц вещества с термодина-

мическим воздействием, что позволяет при меньших затратах энергии разрушать атомно-молекулярные связи сложных соединений. В результате разрушения связей на выходе синтезируется метанол, через газовую фазу от исходных реагентов отделяются летучие примеси, а из нелетучих примесей формируется дисковый слиток, где по его объему металлы и неметаллы разделяются по плотностям. Произведенный слиток в основной своей массе содержит восстановленные металлы, где в первую очередь восстанавливаются платиноиды, драгметаллы, медь, железо, никель, кобальт. Слиток за счет присутствия восстановленных металлов приобретает электропроводность, поэтому используется в качестве анода для проведения электролиза, что позволяет из него извлекать в первую очередь драгметаллы, медь, никель, редкоземельные и только потом слиток идет на производство железа, алюминия, магния, кальция и других металлов (заявка на патент РФ

№ 2023107433 «Способ и устройство плазменно-дугового электролитического центробежного конвертирования для производства металлов, неметаллов и энергоносителей», 28.03.2023).

Процесс ПДЭЦК протекает в замкнутом объеме производственного контура с минимальными потерями тепловой энергии в окружающую среду, что позволяет снижать энергозатраты при производстве продукции. Промышленные продукты остаются внутри контура и служат аккумуляторами тепловой энергии, а при транспортировке за его пределы принимают температуру окружающей среды. Выделяемый, в ходе реакций синтез-газ, идет на синтез метанола, который в свою очередь направляется на производство электроэнергии и выработку тепла, за счет извлечения и сжигания водорода. При выработке энергии охлаждение энергоустановок обеспечивается потоком воды, предварительно охлажденной реагентами шихты, и возвращаемым углекислым газом. Облучение электронами, ионами, фотонами и другими элементарными частицами плазмы в присутствии катализаторов способствует значительному снижению энергозатрат при делении межмолекулярных связей исходного вещества. Процесс каталитического разделения и синтеза углеводородов протекает более энергоэффективно за счет использования руды, в качестве постоянно возобновляемого катализатора. Одновременно протекающие металлургические процессы становятся более эффективными за счет использования углеводородов в качестве восстановителей металлов. Объединенный химикометаллургический процесс, включающий производство энергии за счет сжигания водорода, позволяет значительно снизить общее потребление энергии, по сравнению с энергией необходимой на проведение этих процессов раздельно.

*Цель исследования* – определить техническую возможность энергоэффективного устранения углеродных выбросов с получением различных веществ и энергоносителей, за счет производства энергии путем сжигания водорода, полученного паровой конверсией метанола, синтезированного из рудоуглеводородной шихты.

#### **ПЕРСПЕКТИВА ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ ЗА СЧЕТ СЖИГАНИЯ ВОДОРОДА**

Как известно при сжигании углеводородного топлива по объективным причинам, связанным с конструкцией электростанций, на нагрев воды выделяемой энергии не расходуется. Так же известно, что при сжигании по отдельности углерода и водорода, содержащихся в углеводородном соединении, выделяется большее количество энергии.

Согласно расчетам на самых современных ТЭС при сжигании топлива в топках минимальные потери энергии для природного газа составляют 9,5%, сернистого мазута 10,3% и угля 14% [1]. Помимо этих потерь необ-

ходимо учитывать потери энергии, которая не выделяется при сгорании по отдельности водорода и углерода, входящих в состав топлива [2; 3]. Например, удельная теплота сгорания природного газа в среднем составляет 45 МДж/кг, который содержит  $\text{CH}_4$  – 94,9%;  $\text{C}_n\text{H}_n$  – 3,8%;  $\text{CO}_2$  – 0,4%;  $\text{N}_2$  – 0,9%. При сжигании водорода и углерода по отдельности выделяется 59 МДж/кг, что на 26,55% больше, чем при сжигании природного газа. Устраняя потери на тепловом котле и сжигая отдельно водород и углерод природного газа, возможно, извлекать на 33,5% больше энергии. Соответственно сжигая углерод и водород, получаемый из мазута, возможно, больше извлекать на 21,1%, а используя бурый уголь – на 26,04%. Особенно много потерь энергии происходит при сжигании торфа и пиролизного газа, где для торфа извлечение энергии может быть больше на 74,7%, а для пиролизного газа – на 90%. Потери энергии при сжигании увеличиваются с добавлением в углеводородных других химических элементов.

Водород по сравнению с углеродом вносит основной вклад в выработку энергии, выделяя 142 МДж/кг, а при сжигании углерода выделяется только 33 МДж/кг, при этом на водородных энергоустановках не используются топки, где идут энергетические потери. Качественным отличием сжигания водорода от других топлив является производство воды, которая служит одновременно реагентом, энергоносителем, хладагентом и конечным продуктом производства. Поэтому работа процесса ПДЭЦК направлена на энергоэффективное разделение исходной шихты на составляющие, откуда из смеси руды и углеводородов извлекается водород и кислород, которые сжигаются на энергоустановках, позволяя вырабатывать максимально возможную энергию с получением воды. Данная особенность, позволяет размещать производство в местах скопления руд и углеводородов, где нет воды.

#### **МЕТАНОЛ, КАК НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНЫЙ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЬ**

Жидкое топливо, такое как нефть, бензин, керосин, включая аммиак и метанол, является не только наиболее ценным топливом для хранения, перемещения и использования, но и наиболее удобным для хранения водорода.

На сегодня, в мире для хранения водорода в соединениях жидкой фазы все больше используют метанол и аммиак [4]. При извлечении водорода из этих соединений, требуются меньшие энергозатраты, чем при его извлечении из углеводородов. Аммиак проигрывает метанолу при использовании в процессе ПДЭЦК тем, что содержит в своем составе в большом количестве азот, который необходимо извлекать из воздуха. Метанол в своем составе содержит водород углерод и кислород, которые входят в состав руды и углеводородов.

Основное количество производства водорода осуществляется за счет паровой конверсии метана по реакции  $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$ , где энергозатраты

составляют 1,684 (кВт · ч)/кг. Паровая конверсия метанола, для извлечения водорода, производится в присутствии катализатора по эндотермической реакции  $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$ , где затраты энергии составляют 0,275 (кВт · ч)/кг (<https://www.techairs.ru/tekhnicheskie-vozmozhnosti/proizvodstvo-vodoroda/vodorod-iz-metanola/>). Поэтому для осуществления процесса ПДЭЦК метанол выбран в качестве наиболее эффективного энергонсителя, который синтезируется из продуктов реакций и используется для накопления, хранения и выработки энергии. Произведенный из метанола паровой конверсией водород имеет высокую чистоту и может применяться для сжигания на турбинах и любых топливных элементах.

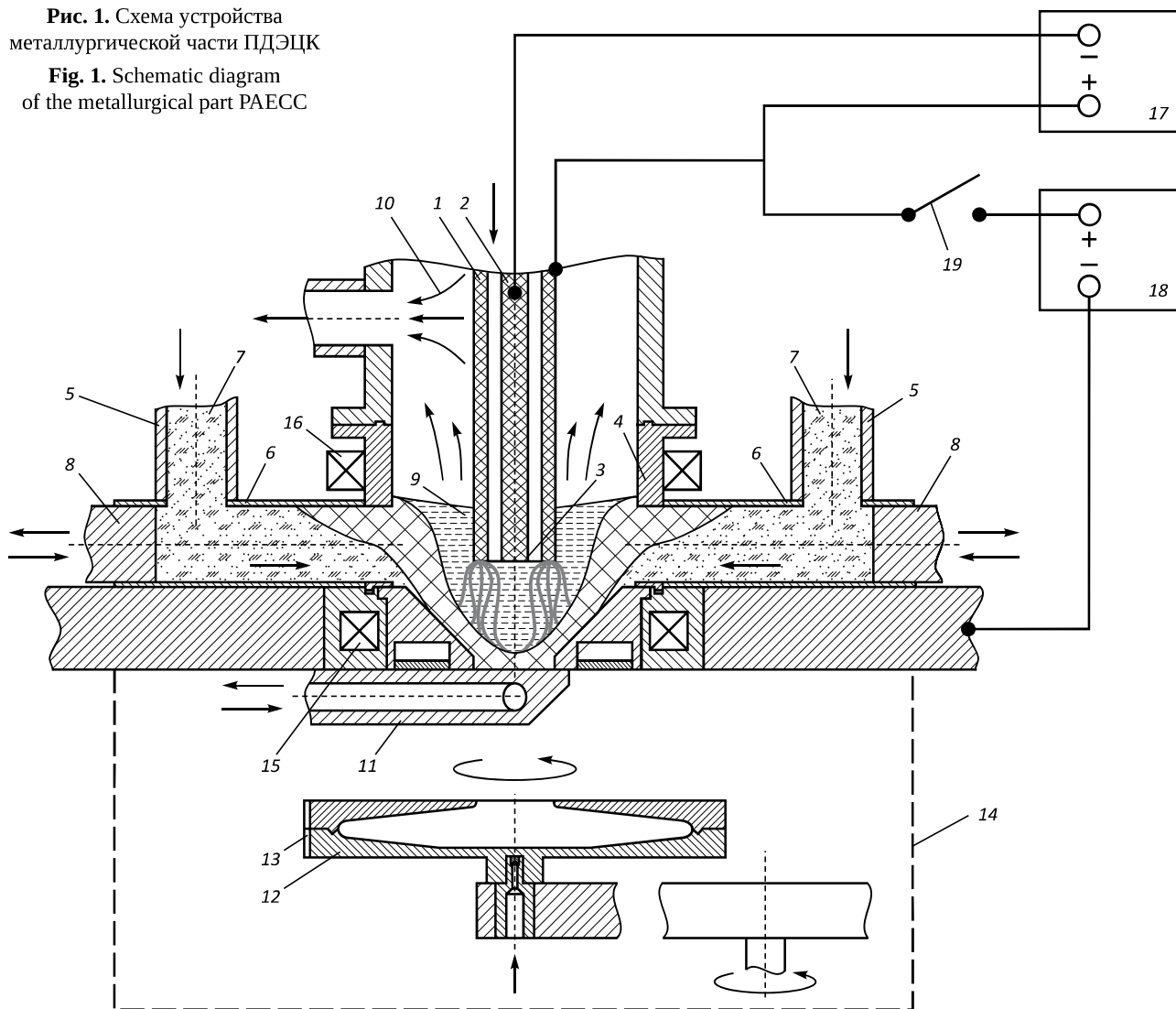
Метанол, по мнению авторитетных ученых, в будущем составит основу экономики, как основной энергоноситель [5].

### УСТРОЙСТВО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ПРОЦЕССА ПДЭЦК

Представленное на рис. 1 устройство включает плазмотрон, состоящий из двух графитовых электродов, трубчатого анода 1 и стержневого катода 2, между которыми горит электродуга 3, выдуваемая плазмообразующим газом, в качестве которого используется природный газ (метан) и углекислый газ. Плазмотрон установлен в камеру плавления 4, в которую по вертикальным шахтам 5 и по горизонтальным шахтам 6 подается шихта 7 под давлением обратно поступательного перемещения поршней 8. Шихта под действием нагрева в камере плавления образует ванну расплава 9. Над зеркалом ванны расплава испаряются летучие и газовые примеси 10, которые удаляются за счет вакуумного насоса.

**Рис. 1.** Схема устройства металлургической части ПДЭЦК

**Fig. 1.** Schematic diagram of the metallurgical part PAECC



Ванна расплава удерживается охлаждаемой задвижкой 11, при открытии которой расплав сливается в турбину 12, вращающуюся под действием струи газа, подаваемой на ее лопатки 13 [6]. Турбина и механизмы перемещения защищены от атмосферы нижней камерой 14.

Для сжатия электродуги применяется электромагнитное поле, создаваемое нижним соленоидом 15 и верхним соленоидом 16, установленным

вокруг камеры плавления. Источник питания плазмотрона 17 подключен к аноду и катоду плазмотрона, а источник питания 18 основной дуги подключен отрицательной клеммой к ванне расплава, а положительной клеммой к аноду плазмотрона за счет переключателя 19.

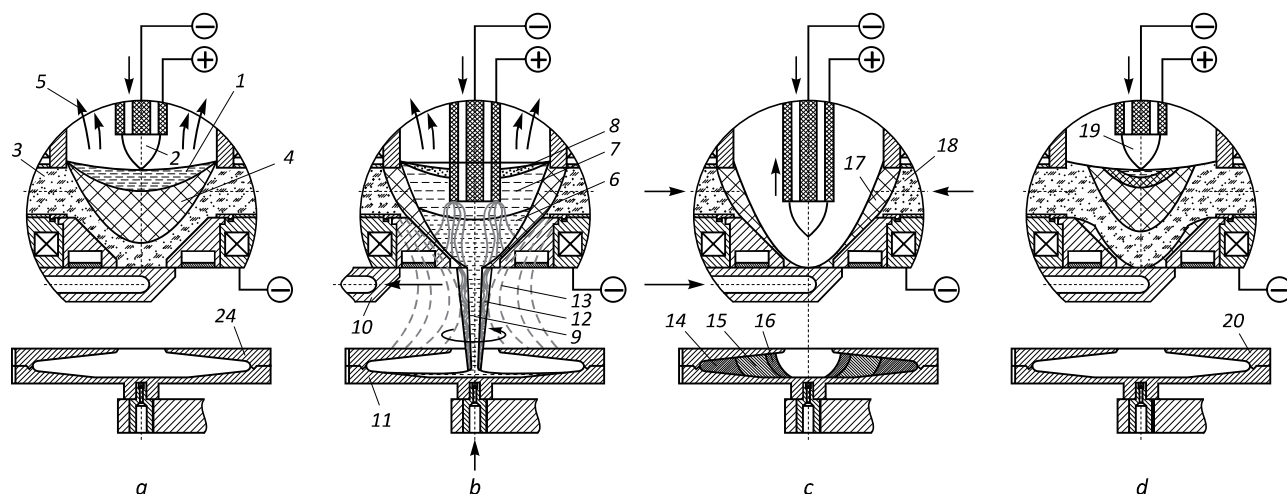
На рис. 1 показан момент проведения электролиза в расплаве перед его выпуском во вращающуюся турбину, где производится разделение вещества по плотностям под действием центробежных сил вращения.

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА  
ТВЕРДОГО ОСТАТКА ВЕЩЕСТВА**

Сепарация исходной шихты при осуществлении процесса ПДЭЦК производится во время ее нагрева, плавления, испарения, восстановления и слива расплава во вращающуюся турбину. Часть вещества шихты отделяется от основной массы за счет испарения газовых и летучих примесей, а оставшийся расплав, при его восстановлении до отдельных металлов и сливе,

поступая во вращающуюся турбину, разделяется под действием центробежных сил на различные по плотности соединения, образуя слитки.

На рис. 2 показаны этапы плавления шихты, восстановления металла из руды и разделение расплава по плотности вещества. На рис. 2, а показан момент плавления ванны расплава 1 факелом плазмы 2, который сверху расплавляет шихту 3. В результате нагрева образуется ванна расплава 1 и переходная зона нагрева 4, где выделяются газообразные вещества 5, удаляемые вакуумным насосом. Плазма может разогревать ванну расплава до 2000 °С и более, где основным восстановителем металлов в расплаве является углерод, а водород работает в качестве защитной среды. При температурах ниже 700 °С водород и угарный газ выступают более активными восстановителями металлов. Поэтому обрабатывая шихту различными восстановителями с участием электролиза в широком температурном диапазоне можно восстанавливать практически все известные металлы.



**Рис. 2.** Этапы переработки вещества в металлургической части устройства ПДЭЦК:

a – начало плавления; b – электролиз и слив расплава; c – набор объема шихты для плавления; d – последующее плавление

**Fig. 2.** Stages of substance processing in the metallurgical part of the device PAECC:

a – beginning of melting; b – electrolysis and melt drain; c – charge volume set for melting; d – subsequent melting

На рис. 2, b изображен момент проведения электролиза в ванне расплава, куда погружен плазмотрон, выполняющий роль анода, а расплав исполняет роль катода. В нижней части ванны расплава скапливаются восстановленные тяжелые металлы 6, в средней – их соединения и более легкие металлы 7, а на поверхности ванны – наиболее стойкие шлаки 8. Протекающий процесс восстановления металлов из соединений руды за счет химических реакций ускоряется под действием электролиза.

На рис. 2, b также показан момент выпуска струи расплава 9 за счет открытия задвижки 10 во вращающуюся турбину 11. Сливаемый поток расплава облучается элементарными частицами плазмы 12, сжатой под действием электромагнитного поля 13 соленоидов.

Облучение расплава позволяет с наименьшими энергозатратами разрушать межатомномолекулярные связи вещества, что дополнительно ускоряет процесс восстановления металлов.

Эффект разрыва межатомномолекулярных связей усиливается за счет значительного повышения температуры при сжатии струи расплава и потока плазмы электромагнитным полем, созданным соленоидами [7]. Температура в расплаве за счет обжаривания потока плазмы может повышаться до 10 000 °С и более, что переводит вещество в сверхкритическое высокотемпературное состояние. При воздействии столь высоких температур любое вещество начинает интенсивно испаряться, но за счет малого времени воздействия температуры на вещество в пределах 0,001–0,1 с и обжаривания

вещества электромагнитным полем, сохраняется ближний порядок между атомами и молекулами, не позволяя им уходить в газовую фазу и испаряться. Вещество, в сверхкритическом высокотемпературном состоянии, попадая на плоскость вращающейся турбины, начинает расширяться и быстро терять температуру, одновременно разделяясь по плотности, что создает эффект высокоскоростной сепарации.

По аналогии, на сегодня, в подобных установках применяется эффект Ранка, где используется вращение и различное охлаждение по объему частиц вещества, позволяя разделять углеводороды с энергозатратами на порядок меньшими, чем при обычных термических способах (<https://scienceforum.ru/2020/article/2018018579>).

Для деления межатоомнолекулярных связей вещества в последнее время все больше используют облучение лазером, электронным лучом и плазмой. Например, к такому методу относится апгрейдинг, где используют поток электронов без использования дорогих катализаторов, «Радиационно-волновой крекинг» (РВК), где энергозатраты, при разделении тяжелых нефтей и различных углеводородов, могут снижаться на порядок по сравнению с обычными технологиями.

К данным методам облучения относится и процесс получения метанола из природного газа под действием лазерного излучения, где работают фотохимические процессы [8]. Стадия активации метана кислородом с последующей диссоциацией связи углерод-водород составляет 230 кДж/моль, а конверсия метана с гидроксильным радикалом составляет всего 23 кДж/моль.

Снижение энергозатрат при облучении потоком элементарных частиц, происходит не только при разделении углеводородного сырья, но и при облучении потоком плазмы рудных соединений [9]. Например, процесс электролитического восстановления алюминия требует 15 (кВт · ч)/кг, а при электротермическом восстановлении плазмой затраты составляют всего 6 (кВт · ч)/кг.

Направленный поток облучения элементарными частицами вызывает ионизацию любой среды, включая газы, жидкости или минералы, что приводит к изменению структуры и свойств вещества, где связи обрываются из-за резонансных колебаний, образуя облегченные молекулы. Далее расплав, попадая во вращающуюся турбину, разделяется по плотности, формируя слиток.

На рис. 2, с показан момент, когда, после слива ванны расплава, задвижка возвращается назад, плазматрон отводится вверх в исходное положение, а во внутренней полости турбины под действием центробежных сил вращения формируется кольцевой слиток, где на внешнем диаметре слитка скапливаются тяжелые металлы 14, в середине – легкие металлы и шлаки 15, а ближе к центру вращения – шлаки 16, содержащие углерод. Сразу после слива и закрытия задвижки внутрь камеры плавания поступает шихта, включая

подогретую шихту 17, которая движется в центр под действием поршней и холодной шихты 18 до заполнения внутреннего пространства камеры плавания.

На рис. 2, d показан момент, где факел плазмы 19, который не выключался, начинает плавить подогретую шихту, а под задвижку устанавливается новая турбина и процесс повторяется. Катод и анод плазматрона постепенно расходуются, поэтому в определенный момент времени он заменяется на новый без остановки процесса.

В электродуговых печах расход графитовых электродов составляет 1,2 кг на одну тонну расплава, соответственно подобный расход графитовых электродов плазматрона будет во время плавания [10].

### **ВОДОРОДНЫЕ ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ПРОЦЕССА ПДЭЦК**

Для производства энергии процесса ПДЭЦК используется несколько типов электростанций, работающих на водороде. Включение в систему двух и более различных типов электростанций необходимо для регулирования объема выработки электроэнергии по отношению к объему вырабатываемого тепла.

Для запуска процесса ПДЭЦК и наработки необходимого объема водородного топлива могут использоваться электростанции типа ГЭС, ТЭС, ВЭС и СЭС, но наиболее перспективно использование атомных электростанций, где вырабатываемая тепловая энергия в объеме до 70% практически полностью будет расходоваться на нагрев реагентов, а не на обогрев окружающей среды, как это обычно происходит. Для повышения доли по выработке электроэнергии турбины АЭС совмещаются с водородными камерами сгорания (КС), работая по типу водородных тепловых электростанций (ВТЭС), где имеется общая турбоустановка, на которой размещены пароперегреватели, а цилиндры высокого и среднего давления снабжены КС. Специализированные АЭС, где паровые турбины дополнены камерами сгорания для сжигания водорода, повышают КПД по выработке электроэнергии до 37%. ВТЭС по КПД достигает 69%, следовательно, при объединении АЭС и ВТЭС средний КПД будет достигать 53%. Энергосистема, созданная на базе АЭС и ВТЭС для увеличения КПД по выработке электроэнергии, дополняется высокотемпературными топливными элементами (ВТЭ), имеющими КПД по выработке электроэнергии до 85%. В результате объединения различных типов электростанций на базе АЭС-ВТЭС-ВТЭ, КПД по выработке электроэнергии может достигать 69%. Преимуществом этой энергосистемы является гибкая настройка по объему выработки электроэнергии по отношению к вырабатываемому теплу. При осуществлении процесса ПДЭЦК необходимо в любой момент времени между производственными участками перераспределять различное количество электроэнергии и тепла. Атомный реактор

наиболее эффективно и безопасно работает с постоянной нагрузкой, поэтому его мощность подбирается в пределах от 1 до 50% от общей мощности, а колебания нагрузки гасятся или восполняются за счет агрегатов созданных на базе ВТЭС и ВТЭ<sup>1</sup>.

**ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ПЕРЕРАБОТКИ ВЕЩЕСТВА И ЭНЕРГИИ ПРОЦЕССА ПДЭЦК**

Для энергоэффективного разделения вещества требуется концентрация максимально возможного количества химических элементов в месте плавления,

которые служат катализаторами, снижающими энергозатраты на проведение реакций. Производственный процесс переработки вещества объединен с процессом потребления энергии, что позволяет использовать повторно образующиеся реагенты и сохранять энергию. Процессы производства и потребления энергии заключаются в замкнутое пространство контура, что позволяет удерживать низкопотенциальное тепло от потерь в окружающую среду. Производственный контур и контур потребления связываются трубопроводами поставки энергоносителя и возврата хладагента, что условно изображено на рис. 3.

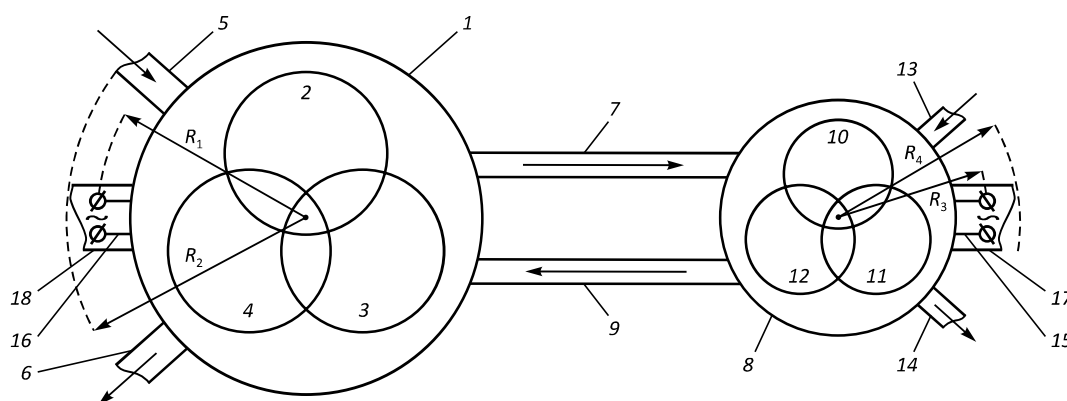


Рис. 3. Принципиальная схема устройства производственного контура и контура потребления

Fig. 3. Schematic diagram of the production and consumption circuit design

Для переработки вещества и выработки энергии используется производственный контур 1, внутри которого размещены участки производства энергии 2, металлургии 3 и синтеза метанола 4, которые за счет пересечения объединены в единую систему, где оборудование одного участка, является частью оборудования другого участка. В производственный контур реагенты для переработки поступают через шлюз 5, а готовые продукты покидают его пространство через шлюз 6 при температуре окружающей среды. Из производственного контура энергоноситель, которым служит метанол, по трубопроводу 7 поступает в контур потребления 8, откуда по трубопроводу 9 обратно возвращается углекислый газ, который в производственном контуре сначала работает хладагентом, а затем применяется в качестве реагента. Внутри контура потребления создана объединенная система из участка паровой конверсии метана 10, участка выработки энергии 11 и участка подготовки и перемещения реагентов 12. По шлюзу 13 внутрь контура потребления поступает воздух при температуре окружающей среды, а по шлюзу 14 удаляется азот и вода при температуре окружающей среды. Через клеммы 15 и 16 вырабатываемая энергия поступает за пределы контуров на рас-

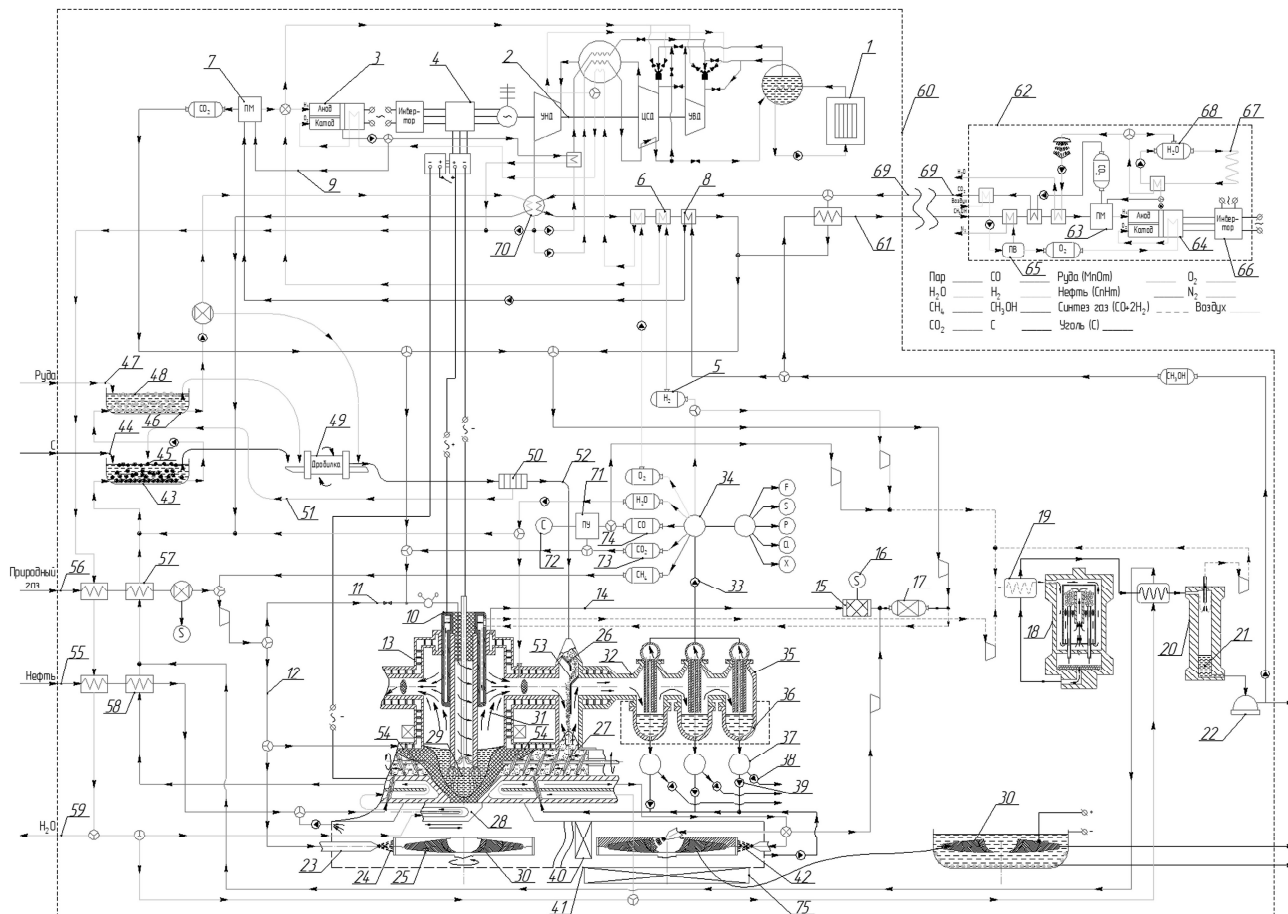
стояние  $R_1$  и  $R_3$ , оптимальное для избегания потерь электроэнергии, а через трубопроводы 17 и 18 во вне, передается тепло на оптимальное расстояние  $R_2$  и  $R_4$ . Принципиальная схема процесса ПДЭЦК показывает взаимодействие участков внутри контуров, без потерь тепловой энергии во вне и выбросов углеродсодержащих газов.

**РАБОЧАЯ СХЕМА ПРОЦЕССА ПДЭЦК**

Процесс ПДЭЦК изображен на рис. 4, где производство металлов, неметаллов, энергоносителя и выработка энергии объединены с процессом потребления энергии.

Энергоустановка включает атомный реактор 1, водородную турбину 2 и топливные элементы 3, откуда вырабатываемая мощность передается через трансформатор 4 на различные производственные участки [11]. На энергоустановку выделяемый водород поступает из накопительной емкости 5, подогреваясь в теплообменнике 6. При нехватке водорода недостающий объем поступает из процессора метанола 7, куда поступает метанол, подогреваясь в теплообменнике 8. Вода для конверсии метанола поступает по трубопроводу 9 после ее образования в ходе реакции на энергоустановке. В результате взаимодействия метанола и воды образуется необходимый водород, сжигаемый на энергоустановке и углекислый газ, который идет на переработку.

<sup>1</sup> Гаранин И.В. Высокотемпературные технологии производства электроэнергии на угольно-водородных энергетических комплексах и способы их практической реализации: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. С. 19–22, 38.



**Рис. 4.** Общая схема устройства процесса ПДЭЦК

**Fig. 4.** General schematic diagram of the PAECC process device

Углекислый газ поступает внутрь плазмотрона 10, куда в регулируемом объеме по трубопроводу 11 поступает природный газ (метан). Другая часть метана, охлаждая корпус камеры плавления 13, проходит по внутренним змеевикам, подогревается и выходит по трубопроводу 14, поступая на фильтр 15, сбрасывая примеси в емкость 16, и далее поступающая в смеситель (предрифформинг) 17. Выходя через трубопровод и далее в реактор метанола 18, часть метана, проходя через теплообменник 19, поступает в сепаратор 20, где образуется ванна метанола 21, сливаемого в сборную емкость 22. Синтез-газ, не превращенный в метанол, снова поступает в теплообменник 19. Метан, углекислый газ или пар в определенный момент времени подается через сопло 23, создавая струю 24, раскручивающую турбину 25 и одновременно охлаждая ее. Шихту 26 толкает и перемешивает шнек 27, замешивая во внутренний объем шихты вместе с метаном нефть или другие жидкотекучие смеси углеводородов. После открытия задвижки 28 и слива расплава 29 в турбине 25 формируется дисковый слиток 30, состоящий в отдельных частях из различного по плотности вещества. Во время работы плазмы образуется поток газов 31, куда поступают угарный, углекислый газ, водород, кислород, пары воды и частицы углерода, а также пары металлов

и неметаллов, находящихся в переплавляемых реагентах, которые выкачиваясь по трубопроводу 32 насосом 33, поступают в сепаратор 34. Перед этим поток газа, проходя ректификационные колонны 35, освобождается от наиболее тугоплавких металлов и неметаллов, скапливающихся в виде расплава в емкостях 36, где расплавы подогреваются и затем сливаются в сепараторы 37. Из этих сепараторов восстановленные металлы и неметаллы насосами 38 откачиваются к месту хранения, а шлаки насосами 39 подаются на повторную переработку и замешиваются в шихту. Турбина 25 со слитком 30 через шлюзовую затвор 40 поступает в камеру 41, где наружная и внутренняя плоскость турбины обрабатываются струей пара 42, вращая и охлаждая ее. При взаимодействии с паром нагретый углерод образуют водяной газ, который выступает в качестве восстановителя, смешиваясь с шихтой 26, под действием шнека 27. В сепараторе 34 отделяются друг от друга различные химические соединения, синтезируются в метанол, из которого путем паровой конверсии выделяется водород, который с отсепарированным кислородом идет в качестве реагентов для выработки энергии. На рынок за пределы производственного контура направляется сера, фосфор, фтор, хлор и т.п. химические элементы или их соединения.



На синтез метанола направляются угарный и углекислый газ, кислород, водород, метан и пары воды. Из сепаратора 34 часть воды поступает внутрь корпуса камеры плавления печи 13, влияя на концентрацию газовых реагентов потока 31, где регулируя объем подачи пара и других газовых реагентов, возможно, образование максимального количества синтез-газа при протекании автотермической реакции. Другая часть образующегося объема воды в ходе сжигания и восстановления металлов, направляется в ванну 43, куда сверху по линии 44 поступают углеродсодержащие вещества 45, включая уголь, торф, опилки, картон, где вода охлаждается и далее поступает в ванну 46, куда сверху по линии 47 поступает руда 48, так же охлаждая воду. В качестве руды могут использоваться обычные руды, любые отходы обогащения руды, речной песок, галька, глина и другие подобные вещества, так как для процесса ПДЭЦК, они все являются промышленными рудами. В дробилке 49 создается смесь измельченной руды и углеводородного вещества, которая идет на отжим прессом 50 для удаления части воды, которая по трубопроводу 51 возвращается в ванну 43, а смесь твердых частиц шихты по трубопроводу 52 поступает в вертикальную шахту 26 корпуса печи. Шихта создает поток падающих частиц 53, через который проходит поток газа 31, передавая тепло шихте, удаляя из нее влагу и осаживая на частицах шихты углерод, являющийся восстановителем. Далее шихта, проходя по горизонтальной шахте 54, перед плавлением дополняется жидкими углеводородными компонентами, к которым относится, например, тяжелая нефть, поступающая по трубопроводу 55 и газовыми углеводородами к которым относится природный газ, поступающий по трубопроводу 56. Нефть и газ подогреваются оборотной водой в теплообменниках 57 и 58. Весь объем воды для проведения процесса образуется за счет сжигания и восстановления металлов.

Образующаяся вода используется для работы турбин, синтеза метанола, на подогрев реагентов и охлаждение оборудования, а излишки воды, для того чтобы устранить потери энергии из системы по трубопроводу 59, направляются во вне, при температуре окружающей среды. Метанол, который производится внутри производственного контура 60, из накопительной емкости направляется во вне, при температуре окружающей среды по трубопроводу 61 и далее пересекает границу контура потребления 62, где производится выработка энергии. Метанол в контуре потребления подогревается и попадает в процессор метанола 63, где извлекаемый водород идет на топливный элемент 64, куда подается кислород из процессора воздуха 65. Вырабатываемая электроэнергия поступает на инвертор для внутреннего и внешнего потребления, а вырабатываемое тепло поступает на водяной нагреватель 67. Вода, образующаяся при выработке энергии, накапливается в емкости 68, откуда ее часть используется для конверсии метанола, а большая часть идет во вне, покидая

контур при температуре окружающей среды. Образующийся углекислый газ при конверсии метанола покидает контур потребления 62 по трубопроводу 69, при температуре окружающей среды и далее возвращаясь в производственный контур 60, охлаждает метанол в трубопроводе 61 и воду в конденсаторе 70. Нагретый углекислый газ поступает на синтез метанола через плазму, где разделяется на кислород и угарный газ, который так же восстанавливает металлы, проходя поток подающих частиц руды, и далее его часть входит в состав метанола. Излишки угарного газа накапливаются в емкости 74, откуда поступают в процессор углерода 71, где выделяется твердый углерод, поступающий на рынок через накопитель 72, и где снова образуется углекислый газ, поступающий в накопитель 73. Полученный дисковый слиток 30 через шлюз 75 направляется в электролизную ванну, которая выступает в роли катода, а слиток в роли анода. В ванне после проведения электролиза слитка скапливаются драгметаллы, медь и редкоземельные металлы, которые поставляются на рынок. Слиток, по внешней части содержащий железо, а по внутренней части окислы кремния, алюминия, кальцит и других металлов, которые не сразу восстанавливаются, направляется на обычную металлургическую и химическую переработку.

#### ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ПДЭЦК

Предлагаемый способ ПДЭЦК позволяет снижать энергозатраты при производстве готовой продукции, за счет объединения энергетических, металлургических и химических процессов, включая процесс потребления энергии, где образующиеся реагенты перераспределяются между участками производства, повторно возвращаясь на переработку. На сегодня, тепловые и атомные электростанции, а также металлургические и нефтехимические заводы сбрасывают в окружающую среду около двух третей вырабатываемой тепловой энергии. В процессе ПДЭЦК эта энергия перенаправляется с одного производства на другое, позволяя в несколько раз больше перерабатывать исходного вещества. Атомные и тепловые электростанции, имеющие КПД 30%, при передаче электроэнергии на расстояние до потребителя в среднем теряют половину энергии. При включении электростанций в схему ПДЭЦК появляется возможность переводить всю вырабатываемую энергию в переработку вещества, позволяя увеличить объем его переработки в 6,5 раз. Энергоэффективность нового процесса повышается за счет объединения химического и металлургического производства, где реакции ускоряются за счет электролиза и фотокатализа. Катализаторы в процессе переработки образуются из руды и углеводородов, которые постоянно обновляются. Одновременное проведение различных процессов на одном оборудовании, значительно повышает скорость производства и снижает энергозатраты. Например, при производстве

железа не требуется проведения агломерации, сушки и коксования. Вместо этого железосодержащая руда смешивается с углеводородным сырьем в виде нефти, угля, сланцев, торфа или других углеводородсодержащих природных веществ, включая бытовые отходы, и направляется на плазмохимическое восстановление с одновременным синтезом метанола и выработкой энергии.

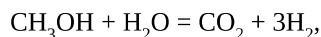
Новый способ кардинально меняет схему переработки тяжелой нефти, сланцев и нефтяных песков, которые сегодня очень сложно переработать на нефтеперерабатывающем заводе (НПЗ). Например, при переработке тяжелой нефти на НПЗ обычно удается извлекать не более 30% топливных фракций. Это связано с низкой температурой перегонки, которая не превышает 580 °С, а также с выделением хлора, серы и других веществ, снижающих эффективность работы катализаторов. При использовании способа ПДЭЦК нагрев вещества может достигать более 2000 °С, что позволяет разделять по составу любые углеводородные соединения, при этом катализаторы не выходят из строя, так как они образуются из постоянно обновляемой шихты (<https://scienceforum.ru/2020/article/2018018579>).

#### **ЭНЕРГОЗАТРАТЫ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССА ПДЭЦК**

На сегодня, для восстановления металлов все больше используется плазменная металлургия, где удельный расход энергии зависит от мощности плазматрона [12]. Для плавки руды при мощности плазматрона 0,1 МВт потребление энергии составляет 5 (МВт · ч)/т, при мощности 1 МВт, соответственно 2,7 (МВт · ч)/т, при 10 МВт – 0,55 (МВт · ч)/т, а при 20 МВт энергопотребление снижается до 0,5 (МВт · ч)/т.

Тенденция к увеличению мощности электродуговых печей при производстве металлов так же связана со снижением общих энергозатрат, где при мощности 175 МВт, расход энергии снижается до 0,34 (МВт · ч)/т. Поэтому, используя на установке ПДЭЦК плазматрон мощностью 175 МВт, возможно, при энергозатратах 0,34 (МВт · ч)/т, переплавлять 515 т/ч, соответственно в сутки 12 350 т, а в год 4,5 млн т шихты.

Для расчета баланса реагентов и вырабатываемой энергии принимаем, что внутри производственного контура сжигается водород, полученный из метанола за счет паровой конверсии [13; 14]. Допустим в час, на установке ПДЭЦК производится одна тонна метанола для выработки энергии, половина которого направляется в контур потребления. На паровую конверсию теоретически затрачивается 0,275 (кВт · ч)/кг реагентов:



В реакции помимо тонны метанола участвует 562,5 кг воды, следовательно общие затраты энергии на проведение реакции составляют 0,43 МВт · ч [15; 16].

Сжигая полученный водород массой 187,5 кг в кислороде массой 1500 кг по реакции:

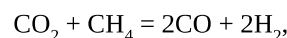


где на 1 кг водорода выделяется 39,78 кВт · ч, будет получено 7,46 МВт · ч энергии (<https://neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/142374-vodorodnoe-toplivo/>).

Для перемещения реагентов внутри контуров и между контурами затраты энергии принимаются равными паровой конверсии метанола, то есть 0,43 МВт · ч. В результате реакции горения образуется вода массой 1687,5 кг, из которой 562,5 кг воды повторно используется на паровую конверсию метанола. После проведения реакций 1687,5 кг воды отправляется на Рынок. Произведенный углекислый газ массой 1375 кг направляется на переработку, 687,5 кг которого возвращается из контура потребления.

Углекислый газ для металлургического процесса используется в качестве плазмообразующего газа и одновременно, как источник сырья для образования синтез-газа [17]. Реакция:  $\text{CO}_2 = \text{CO} + 1/2\text{O}_2$ , протекающая в плазме, теоретически потребляет энергии 1,77 кВт · ч/кг. Для переработки 1375 кг углекислого газа требуется затратить 2,434 МВт · ч.

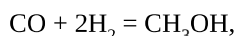
Более выгодная реакция для использования в металлургии, это «сухая» конверсия углекислого газа:



при затратах энергии 1,37 (кВт · ч)/кг реагентов. Углекислый газ совместно с метаном может прокачиваться через плазматрон, образуя плазму, где протекает реакция. Учитывая, что плазма воздействует на химические элементы, находящиеся в шихте, можно принять, что в этой среде протекает фотокаталитическая реакция, где энергозатраты могут снижаться примерно на порядок по сравнению с обычной «сухой» конверсией. Энергозатраты при диссоциации углекислого газа и метана могут снижаться за счет продувки газов через расплавы металлов, находящихся в ванне расплава. Общее ускорение реакционных процессов также будет связано с элеткролизом, протекающем в ванне расплава. Практический интерес представляет схема конверсии углекислого газа с алифатическими углеводородами, которые находятся в составе переплавляемой шихты, где в состав руды может добавляться мазут, уголь или торф. Нефтеносные пески и сланцы для новой схемы переработки являются готовой шихтой. Для реализации «сухой» конверсии углекислый газ прокачивается через плазматрон, а алифатические углеводы вступают с ним в реакцию в зоне горения плазмы. Данная переработка вещества значительно снижает себестоимость продуктов реакции, позволяя перерабатывать углеводороды, которые непригодны для современной переработки или являются отходами для НПЗ. При проведении реакции к 1375 кг углекислого газа добавляется 500 кг природного газа или

алифатических углеводородов. В результате на 1875 кг реагентов теоретически затрачивается 2,57 МВт · ч. Следовательно, на переработку 1375 кг углекислого газа затрачивается 1,88 МВт · ч, что на 23% меньше, чем на отдельную диссоциацию. При этом образуется 125 кг водорода и 1750 кг угарного газа.

На последующем цикле переработки вещества снова синтезируется одна тонна метанола из 875 кг угарного газа и 125 кг водорода по реакции [18]:



где при синтезе выделяется 0,79 кВт · ч/кг энергии в объеме 0,79 МВт · ч. В результате цикл воспроизводства метанола замыкается и далее снова полтонны метанола направляется в контур потребления, а другие полтонны перерабатываются в производственном контуре.

Для синтеза метанола при каждом цикле 125 кг водорода извлекается из шихты, который находится в углеводородах. Для паровой конверсии углеводородов, где содержится 125 кг водорода, необходимо добавить 562,5 кг воды, где содержится 62,5 кг водорода и 500 кг кислорода. Следовательно, для проведения реакции формируется исходная шихта, состоящая из смеси руды, воды и углеводородов, включающая определенный объем неметаллов. Как известно, среднее содержание кислорода в руде составляет 47%, где примерно 10% приходится на неметаллы и соответственно 43% на металлы. Следовательно, если руда содержит 1000 кг кислорода (O<sub>2</sub>), то соответственно в ней содержится 915 кг металлов (Me) и 213 кг неметаллов (Ne).

В мировом производстве энергии за счет сжигания на долю нефти, приходится 36%, на уголь 34%, на газ 30%, где в среднем содержится углерода 77%, водорода 13,24% и 9,76% приходится на примеси, то есть на единицу массы водорода приходится – 5,82 массы углерода (<https://energystats.enerdata.net/total-energy/world-energy-production.html>). Следовательно, в общей массе углеводородов на 125 кг водорода приходится 728 кг углерода и 85 кг примесей, где принимаем, что одна половина металлов 42,5 кг, а другая неметаллов 42,5 кг. Поэтому для синтеза одной тонны метанола в час через плазменный нагрев проходит 3628,5 кг шихты, состоящей из руды, углеводородов и воды, где расход энергии на плавление составляет 1,23 МВт · ч из расчета 0,34 (кВт · ч)/кг.

В ходе реакций, производимый угарный газ массой 875 кг преобразуется по реакции Будуара  $2\text{CO} = \text{CO}_2 + \text{C}$ , с выделением тепла 0,86 (кВт · ч)/кг, в общем 0,75 МВт · ч, где содержится 500 кг кислорода и 375 кг углерода, а входе реакции на выходе образуется 687,5 кг углекислого газа и 187,5 кг углерода [19]. Далее углекислый газ пропускается через плазмотрон, потребляя на диссоциацию по реакции  $\text{CO}_2 = \text{CO} + 1/2\text{O}_2$  1,77 (кВт · ч)/кг, что, в общем, требует дополнительно 1,2 МВт · ч энергии. В ходе реакции образуется 250 кг кислорода и 437,5 кг угарного газа. Далее циклы

по этим двум реакциям повторяются до полного распада молекулы на углерод и кислород, что потребует 2,79 МВт · ч, за вычетом 0,75 МВт · ч энергии выделяемой при реакции Будуара, в общем, энергозатраты составят 2,04 МВт · ч.

В итоге принятых расчетов для производства одной тонны метанола в шихту входит руда массой 2128 кг, углеводороды 938 кг и вода 562,5 кг. В руде содержится 1000 кг кислорода, 915 кг металлов и 213 кг неметаллов. В углеводородах содержится 728 кг углерода, 125 кг водорода, 42,5 кг металлов и 42,5 кг неметаллов. Общая масса шихты, поступающая на переработку, равна 3628,5 кг. При затратах энергии 0,34 (кВт · ч)/кг для этой массы шихты на плавление требуется 1,23 МВт · ч, на паровую конверсию – метанола 0,43 МВт · ч, перемещение реагентов – 0,43 МВт · ч, диссоциацию – 1375 кг CO<sub>2</sub> 1,88 МВт · ч и на полную диссоциацию – 2,04 МВт · ч, что составляет 6,01 МВт · ч. При сжигании произведенного водорода выделяется 7,46 МВт · ч, при синтезе метанола 0,79 МВт · ч и при проведении реакции Будуара 0,75 МВт · ч, в сумме достигая 9 МВт · ч. Следовательно, при теоретических затратах энергии на проведение реакций для внешнего потребления будет вырабатываться 2,99 МВт · ч с получением 1687,5 кг воды, где 1125 кг воды образуется из углеводородов и руды, 957,5 кг металлов, 255,5 кг неметаллов и 728 кг углерода.

Общее распределение компонентов шихты с указанием масс реагентов в производственном контуре (ПК) и контуре потребления (КП) представлено на рис. 5.

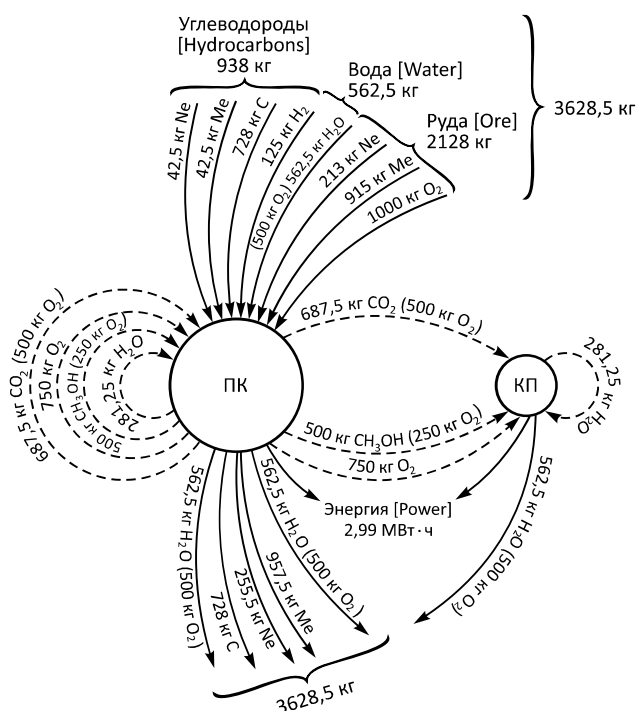
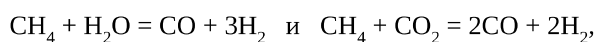


Рис. 5. Общее распределение компонентов шихты в производственном контуре потребления

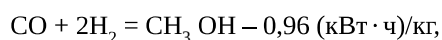
Fig. 5. General distribution of charge components in the production consumption circuit

При работе оборудования, где в год перерабатывается 4,5 млн т шихты, будет произведено 2,1 млн т чистой воды, где 1,4 млн т образуется из кислорода руды и водорода содержащегося в углеводородах, 1,2 млн т металлов, 0,3 млн т неметаллов и 0,9 млн т строительного-конструкционного углерода. При плавлении шихты с расходом электродов 1,2 кг/т будет потрачено 5400 т углерода, что составляет 0,6% от произведенного углерода, из которого будут спрессованы электроды для плазмотрона. Оставшийся углерод при производстве из него графита при стоимости на Рынке 500 руб./кг, позволит получить 450 млрд руб. с данного продукта. [20] При среднем содержании золота в земной коре, равном 0,005 г/т, а серебра 0,1 г/т, из 4,5 млн т шихты будет извлечено 22,5 кг золота и 450 кг серебра на сумму 135 и 35 млн. руб. соответственно. Энергии, поставляемой потребителю, в год будет произведено 3,7 ТВт · ч, которая на небольшие расстояния будет передаваться в виде тепла и электричества, а на большие – в виде метанола.

Сегодня на практике энергозатраты на проведение реакций в несколько раз превышают теоретические затраты [21; 22]. Например, для диссоциации углекислого газа требуется в 3,1 раза больше энергии, на паровую конверсию метана в 2,9 раза, а на синтез метанола в 15,2 раза больше энергии. Особенно большие затраты энергии связаны с производством метанола. Расчет произведен для углекислотного реформинга метанола, где в реакции участвует на 1 кг метана – 3,3 кг воды и 0,24 кг углекислого газа, при этом общие затраты на производство одного кг метанола составляют 8,2 кВт · ч. Для производства метанола необходим синтез-газ, который образуется с участием двух реакций:



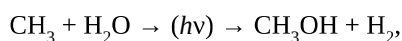
при энергозатратах 1,5 (кВт · ч)/кг. Учитывая выделяющуюся энергию от синтеза метанола:



общие теоретические затраты на производство метанола составляют 0,54 (кВт · ч)/кг, что в 15,2 раза меньше от сегодняшних затрат.

Несмотря на большое отличие теоретических затрат от практических при осуществлении способа ПДЭЦК необходимо учитывать, что потери энергии в окружающую среду значительно снижаются, а при участии электролиза, облучения вещества плазмой с участием катализаторов идет дополнительное снижение энергозатрат.

Новым способом под действием излучения плазмы, возможно, реализовать фотохимическую паровую конверсию метана или алифатических углеводородов, непосредственно в метанол и водород по реакции:



где выделяется 0,955 (кВт · ч)/кг энергии, соответственно осуществление фотохимической реакции при-

ближает энергозатраты к теоретически возможным. В случае нехватки энергии, произведенной за счет водорода, вырабатываемого из шихты, недостающая энергия добавляется от внешних электростанций, где наиболее эффективными будут атомные и работающие на возобновляемых источниках энергии.

### **ВОЗМОЖНОСТИ ПРОЦЕССА ДЛЯ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Использование нового процесса в горно-обогательном производстве позволит устранить энергозатратный процесс обогащения руды, связанный с кислотно-щелочной флотацией, загрязняющей в больших масштабах окружающую среду. Разделение вещества по новой схеме происходит за счет испарения одной его части и восстановления до металлов другой части. Восстановление твердого остатка протекает с различной скоростью для различных соединений, что позволяет эффективно разделять вещество с последующим разделением компонентов по плотности в процессе центробежного конвертирования.

На сегодня, при обогащении из руды извлекается только часть полезных соединений, при этом основная масса руды уходит в отходы, где содержатся, например, драгметаллы и редкоземы. Это связано с тем, что при обогащении увеличивается концентрация мышьяка, серы, фосфора и других ядовитых веществ в отходах, усложняя их дальнейшую переработку. По новой технологии в момент испарения из твердого остатка уходят все летучие примеси, к которым относятся основные ядовитые соединения. Переработка всего объема руды и углеводородов необходима для получения дополнительной энергии за счет охлаждения веществом шихты пара в конденсаторе. Дополнительная энергия позволяет увеличить количество переплавляемого вещества, которым и служит шихта. Поэтому из руды становится возможным извлекать все полезные химические элементы, и в первую очередь драгметаллы, тяжелые металлы и редкоземы, которые имея высокую плотность, скапливаются на внешнем диаметре слитка, откуда извлекаются в первую очередь.

Диаграмма Эллингема показывает температурную зависимость стабильности соединений, где, например, соединения золота, серебра и меди при нагревании восстанавливаются в первую очередь, далее идет восстановление никеля, железа, цинка, хрома, марганца и кремния, а наиболее трудно восстанавливаются соединения титана, алюминия, магния, бериллия и кальция [23]. Согласно электрохимическому ряду напряжений металлов при проведении электролиза в первую очередь так же восстанавливается золото, металлы платиновой группы, серебро, ртуть, медь, отдельные редкоземельные металлы, железо, хром и далее титан, алюминий и магний (<https://infotables.ru/khimiya/272-elektrokhimicheskij-ryad-napryazheniya-metallor-tablitsa>).

Несмотря на то, что при восстановлении и электролизе, в первую очередь, восстанавливается золото, серебро, платина, медь, никель, кобальт и редкоземельные металлы, на практике для производства этих металлов требуются очень высокие энергозатраты, что связано с их малым содержанием в руде. В связи с этим, для извлечения этих металлов из рудных соединений требуется большое количество оборудования и реагентов, а, следовательно, большое количество энергии.

На сегодня полные затраты на добычу и производство из руды железа в среднем составляют 11,14 (кВт · ч)/кг, меди 25,83 (кВт · ч)/кг, алюминия 45 (кВт · ч)/кг, никеля 44 (кВт · ч)/кг, титана 111 (кВт · ч)/кг, серебра 806 (кВт · ч)/кг и золота 1472 (кВт · ч)/кг (<https://okoplanet.su/finances/financesnews/549048-traty-energii-na-proizvodstvo-spravочно.html>).

По схеме ПДЭЦК при производстве железа энергопотребление, возможно, уменьшить примерно в пять раз. Для меди теоретические энергозатраты на диссоциацию оксида, согласно диаграмме Эллингема, не превышают 1 (кВт · ч)/кг, при этом реальные затраты на производство меди составляют 25 (кВт · ч)/кг. Следовательно, энергозатраты при производстве меди могут быть снижены в двадцать пять раз. Более высокий энергетический выигрыш будет достигнут при производстве никеля, кобальта, титана, алюминия и особенно, золота и серебра. Для диссоциации оксида серебра и золота требуются энергозатраты не превышающие 0,5 (кВт · ч)/кг, при этом на практике энергозатраты при производстве серебра составляют 806 (кВт · ч)/кг, а золота 1472 (кВт · ч)/кг. Следовательно, при использовании новой технологии для извлечения и восстановления этих металлов энергозатраты, возможно, уменьшить в полторы и три тысячи раз. Новый способ позволит при синтезе энергоносителей и производстве водорода так же снизить энергозатраты, приближая их к теоретически возможным.

#### ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА РУДОУГЛЕВОДОРОДНОГО ЭНЕРГБЛОКА

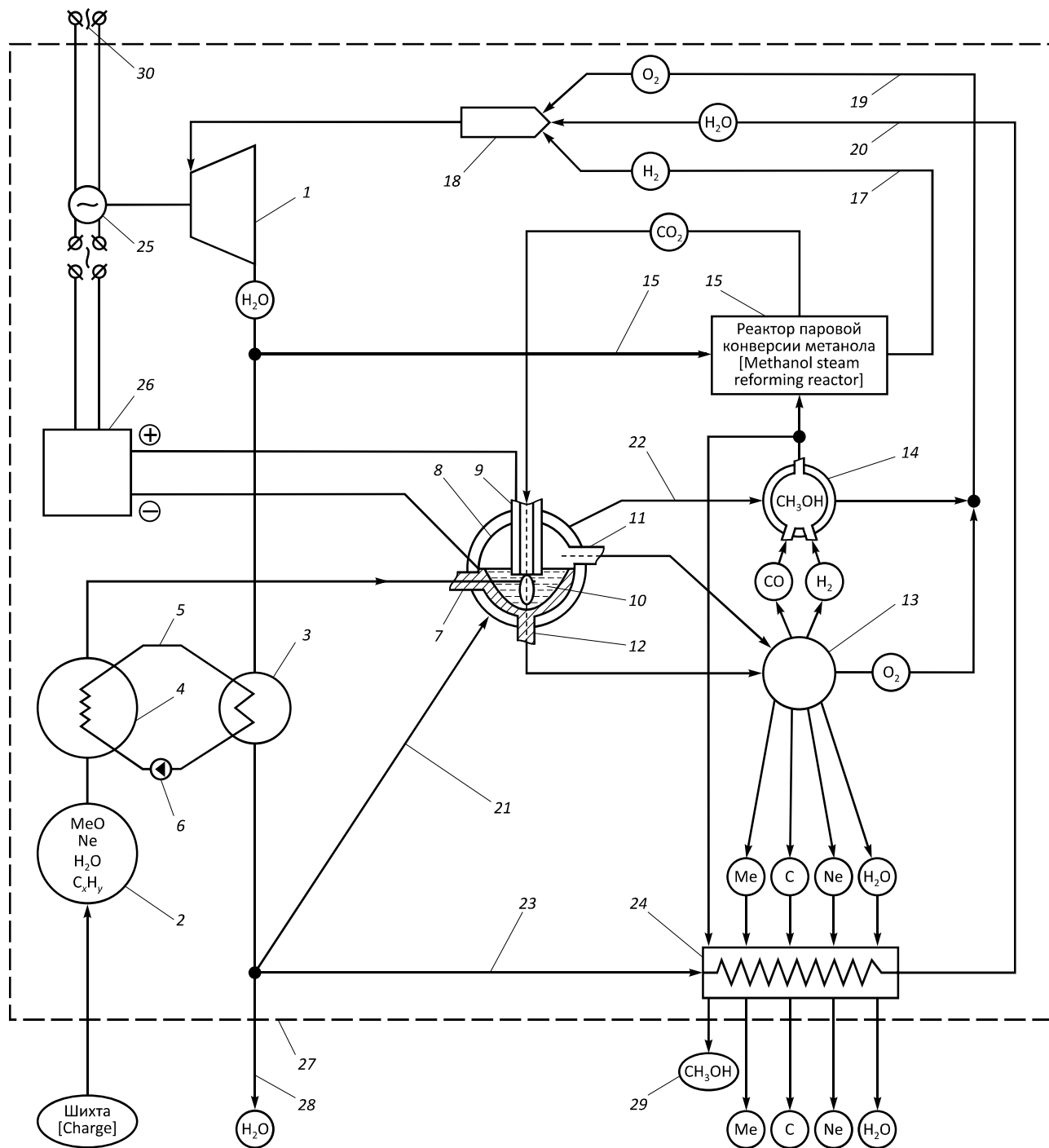
Для понимания работы процесса, возможно, рассмотреть в более простом виде схему преобразования потоков энергии и вещества на оборудовании, объединяющем электростанцию с металлургическо-химическим производством.

На рис. 6 показана простейшая принципиальная схема рудоуглеводородного энергоблока, работающего за счет выделения водорода из шихты, который поступает на сжигание для выработки энергии. В качестве энергоблока на схеме представлена пароводородная турбина 1 без топливных элементов, которые пока не используются для выработки большого количества энергии. Схема показывает, что при использовании шихты 2, в качестве охлаждающего вещества конденсатора турбины 3, через накопительную емкость 4, тепло-

обменник 5 с насосом 6, устраняются тепловые потери энергии в окружающую среду. Подогретая шихта через горизонтальную шахту 7 поступает в плазменный реактор 8, где плазмотрон 9 выступает в качестве анода, а расплав 10 в качестве катода. Продукты реакции, в виде газа через патрубок 11 и в виде расплава через патрубок 12 поступают в сепаратор 13, откуда синтезгаз поступает в аппарат метанола 14. Для извлечения водорода, часть метанола идет в процессор 15 на паровую конверсию, которая протекает под действием части пара, поступающего по трубопроводу 16 с турбины. Извлекаемый водород по трубопроводу 17 идет на сжигание в камеру сгорания 18, куда из сепаратора по трубопроводу 19 поступает кислород, а по трубопроводу 20 оборотный пар, который предварительно подогревается, проходя по трубопроводу 21, охлаждая плазменный реактор и по трубопроводу 22, охлаждая аппарат метанола. По трубопроводу 23 вода охлаждает продукты реакций через теплообменник 24, при этом нагреваясь до требуемой температуры. Обратный пар, подогретый сжиганием водорода в камере сгорания, поступает в турбину, вращая генератор 25 и вырабатывая электроэнергию. Энергия с выпрямителя 26 поступает на плазмотрон, который выступает в качестве анода, а ванна расплава выступает в качестве катода, обеспечивая горение плазмы и электролиз расплава. Оборудование размещается в границах производственного контура 27, за границу которого при температуре окружающей среды по трубопроводу 28 поступает вода, образовавшаяся из водорода, извлеченного из углеводородов и кислорода, извлекаемого из руды. По трубопроводу 29 за контур выходит метанол, а по другим трубопроводам восстановленные металлы, углерод, неметаллы и вода при температуре окружающей среды. Вне за пределы контура, через клеммы 30 поступает электроэнергия до потребителя, не задействованная в переработке вещества. При работе рудоуглеводородного энергоблока часть пара при выходе из турбины без охлаждения поступает на паровую конверсию метанола, позволяя не затрачивать энергию на охлаждение этой части и не затрачивать энергию на конверсию метанола. Оставшийся пар требует меньше затрат на охлаждение конденсируясь за счет нагрева поступающей в реактор шихты. Нагрев воды после конденсации происходит за счет охлаждения плазменного реактора, метанольного аппарата и продуктов реакции, что заменяет нагрев воды за счет сжигания топлива, который происходит на тепловых электростанциях. При размещении по отдельности друг от друга электростанции, металлургического и химического производства, от каждого из них идут потери тепловой энергии в окружающую среду, следовательно, эта энергия не используется на переработку вещества. Для устранения углеродных выбросов, образуемый углекислый газ в ходе конверсии метанола снова поступает на образование плазмы, что так же обеспечивает низкие энергопотери и создает условия

для переработки газа до элементарного углерода и кислорода. Схема извлечения водорода построена через паровую конверсию метанола, позволяя с наименьшими энергозатратами выделять его из этого соединения. Процесс для повышения энергоэффективности

позволяет применять холодильные машины и тепловые насосы, где в качестве хладагентов используются углекислый газ, вода, метанол и другие соединения, вырабатываемые на оборудовании, что так же повышает эффективность его работы.



**Рис. 6.** Простейшая принципиальная схема рудоуглеводородного энергоблока

**Fig. 6.** The simplest schematic diagram of an ore-hydrocarbon power unit

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для сохранения максимального количества энергии и предотвращения ее потерь в окружающую среду процессы производства энергии и переработки веще-

ства объединяются в единый процесс, работающий по схеме рудоуглеводородного энергоблока.

На участке производства электроэнергии различные типы электростанций создают единую систему, работающую на водороде, позволяя вырабатывать

необходимую энергию для поддержания процесса переработки вещества. С целью снижения энергозатрат при разделении вещества на составляющие в переплавляемый объем шихты собирается максимально возможное количество различных химических элементов, где одни элементы для других служат катализаторами.

На сегодня, наибольшие выбросы углекислого газа происходят при производстве энергии путем сжигания ископаемого сырья, которые устраняются в случае использования нового способа, за счет переработки углекислого газа в готовую продукцию.

АЭС, работая в качестве пусковой электростанции для предлагаемого процесса, повышает свою эффективность в 6,5 раз, расходуя полностью всю вырабатываемую энергию на переработку вещества. При отсутствии потребления энергии внешними потребителями, вся вырабатываемая энергия идет на производство метанола, который хранится до момента его использования неограниченное время.

Место размещения рудоуглеводородного энергоблока будет выбираться рядом с месторождениями полезных ископаемых или городами. Города служат источником шихты, которая включает в свой состав бытовые отходы, заменяющие природные углеводороды и техногенные рудные отходы, служащие источником кислорода.

Ускорение процесса деления вещества и снижение энергозатрат производится за счет использования элеткроэнергии, превращенной в плазму, где основным плазмообразующим газом работает углекислый газ.

### Литература

1. Майданика М.Н., Вербовецкий Э.Х., Тугова А.Н. Предварительная оценка возможности перевода котлов тепловых электростанций на сжигание альтернативного угля // Теплоэнергетика. 2021. № 9. С. 33–42.
2. Макушев Ю.П., Полякова Т.А., Быков П.С. Расчетное и экспериментальное определение теплоты сгорания углеводородных топлив // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Омск: Изд-во СибАДИ, 2019. С. 163–168.
3. Рудой В.И. Обзор малоизвестных методов распределения топлива между продуктами ТЭЦ // Молодой ученый. 2021. № 6 (348). С. 33–35.
4. Гамбург Д.Ю. и др. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: справочник / под ред. Д.Ю. Гамбурга, Н.Ф. Дубовкина. М.: Химия, 1989. 671 с.
5. Ола Дж., Губерт А., Пракаш Г. Метанол и энергетика будущего. Когда закончатся нефть и газ / пер. с англ. И.В. Мишин. 3-е изд., электронное. М.: Лаборатория знаний, 2020.
6. Волков А.Е. Патент РФ 2524036. Способ и устройство центробежного литья металла. Заявл. 28.10.2010. Опубл. 27.07.2014.
7. Волков А.А. Патент РФ 2758609. Способ и устройство для плазмотермического центробежного восстановления и разделения химических веществ из руды в гравитационном поле. Заявл. 20.07.2020. Опубл. 01.11.2021.

Под действием плазмы процессы деления ускоряются за счет облучения вещества потоком элементарных частиц в присутствии катализаторов. Дополнительно реакции ускоряются под действием электролиза, высоких температур, вакуума и под действием центробежных сил вращения, разделяющих вещество в поле высокого тяготения.

Передача энергии на большие расстояния производится за счет энергоносителя, которым работает метанол, а электроэнергия и тепло расходуется только на небольших расстояниях в пределах производственного контура и контура потребления.

### ВЫВОДЫ

Для устранения вредных выбросов в атмосферу требуется энергия, которая высвобождается за счет системы объединяющей производство энергии с горно-металлургическим и химическим производством.

Переработка вещества производится под действием энергии, вырабатываемой путем сжигания водорода в кислороде, извлекаемых из рудоуглеводородного сырья.

Вся энергия, которая производится и не расходуется на переработку вещества и внешнее потребление, переводится в метанол, который служит накопителем энергии.

Передача энергии на большие расстояния производится за счет метанола по трубопроводам с возвращением на место переработки вещества углекислого газа.

### References

1. Maidanika M.N., Verbovetskiia E.Kh., Tugov A.N. Preliminary assessment of the possibility to shift thermal power plant boilers for burning alternative coal. *Thermal Engineering*. 2021. No. 9. Pp. 33–42. (In Rus.)
2. Makushev Yu.P., Polyakova T.A., Bykov P.S. Calculation and experimental definition combustion heats of hydrocarbon fuels. In: *Architectural, Construction and Road Transportation Complexes: Problems, Prospects, Innovations*. Omsk: Siberian State Automobile and Highway University, 2019. Pp. 163–168.
3. Rudoi V.I. Review of little-known methods for distributing fuel between thermal power plant products. *Yung Scientist*. 2021. No. 6 (348). Pp. 33–35. (In Rus.)
4. Gamburg D.U. et al. Hydrogen. Properties, production, storage, transportation, application: Reference book. D.U. Gamburg, N.F. Dubovkina (eds.). Moscow: Himiia, 1989. 671 p.
5. Ola J., Gubert A., Pracash G. Methanol and the energy of the future. When oil and gas run out. I.V. Mishin (transl. from English). 3rd ed., electronic. Moscow: Laboratoriya Znaniy, 2020.
6. Volkov A.E. Patent RF 2524036. Method and device for centrifugal metal casting. Application 28.10.2010. Published 27.07.2014.
7. Volkov A.A. Patent RF 2758609. Method and device for plasma-thermal centrifugal reduction and separation of chemicals from ore in a gravitational field. Application 20.07.2020. Published 01.11.2021.

8. Кесель Л.Г., Милошкин В.А., Кесель Б.А. Процесс получения метанола из природного газа под действием лазерного излучения // *Электроника, фотоника и киберфизические системы*. 2022. Т. 2. № 1. С. 85–92.
9. Шейн Я.П., Гудима Н.В. Краткий справочник металлурга по цветным металлам. М.: Металлургия, 1964. 412 с.
10. Карпова К.С., Карпов А.В. Твердофазное восстановление оксидов железа в лабораторных условиях // *Современные материалы, техника и технологии*. 2018. № 1 (16). С. 27–32.
11. Филиппов С., Голодницкий А., Кашин А. Топливные элементы и водородная энергетика // *Общественно-деловой научный журнал «Энергетическая полтика»*. 2020. № 11 (153). С. 28–39.
12. Агапитов Е.Б. Перспективы развития плазменных сталеплавильных печей // *Теория и технология металлургического производства*. 2018. № 1 (24). С. 38–41.
13. Андреев Д.В. Окислительная паровая конверсия метанола в микроканальном реакторе // *Ползуновский вестник*. 2021. № 4. С. 123–128.
14. Sadykov V.A., Krasnov A.V., Fedorova Yu.E. et al. Novel nanocomposite materials for oxygen and hydrogen separation membranes // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45. Issue 25. Pp. 13575–13585.
15. Старцев А.Н. Низкотемпературное каталитическое разложение сероводорода с получением водорода и двухатомной газообразной серы // *Кинетика и катализ*. 2016. Т. 57. № 4. С. 516–528.
16. Аминов Р.З., Байрамов А.Н. Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями. М.: Наука, 2016. 254 с.
17. Шукарев С.А. Лекции по общему курсу химии. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1962. Т. 1.
18. Хазеев А.А., Черепанова М.В. Модернизация стадии синтеза в производстве метанола // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*. 2020. № 3. С. 123–142.
19. Крылов О.В. Углекислотная конверсия метана в синтез-газ // *Российский химический журнал*. 2000. Т. 44. № 1. С. 19–33.
20. Афанасьев С.В., Гартман В.Л. Каталитическая конверсия оксида углерода первой и второй ступени // *Деловой журнал Neftegaz.ru*. 2021. № 7 (115). С. 28–34.
21. Grim R.G., Zhe Huang, Guarnieri M. et al. Transforming the carbon economy: Challenges and opportunities in the convergence of low-cost electricity and reductive CO<sub>2</sub> utilization // *Energy & Environmental Science*. 2020. No. 13 (2). Pp. 472–494.
22. Седов И.В., Макарян И.А., Фокин И.Г. et al. Современные разработки в области прямого получения метанола из природного газа // *Научный журнал российского газового общества*. 2021. № 2 (30). С. 44–53.
23. Халифа А.А., Бажин В.Ю., Шалаби М.Э.-М.Х. и др. Повышение эффективности карботермического восстановления красного шлама при обработке микроволнами // *Вестник иркутского государственного технического университета*. 2021. № 2 (157). С. 264–279.
8. Kesel L.G., Milochkin V.A., Kesel B.A. Process for producing methanol from natural gas under the influence of laser radiation. *Electronics, Photonics and Cyberphysical Systems*. 2022. Vol. 2. No. 1. Pp. 85–92. (In Rus.)
9. Shein A.P., Gudima N.V. A metallurgist's brief guide to non-ferrous metals. Moscow: Metallurgiya, 1964. 412 p.
10. Karpova K.S., Karpov A.V. Solid-phase recovery of iron oxides under laboratory conditions. *Modern Materials, Equipment and Technologies*. 2018. No. 1 (16). Pp. 27–32. (In Rus.)
11. Filippov S., Golodnitsky A., Kashin A. Fuel cells and hydrogen energy. *Public Business Science Magazine "Energy Policy"*. 2020. No. 11 (153). Pp. 28–39. (In Rus.)
12. Agapitov E.B. Perspectives of the development of plasma steel-fuel ovens. *The Theory and Process Engineering of Metallurgical Production*. 2018. No. 1 (24). Pp. 38–41. (In Rus.)
13. Andreev D.V. Oxidative methanol steam reforming in microchannel reactor. *Polzunovskiy vestnik*. 2021. No. 4. Pp. 123–128. (In Rus.)
14. Sadykov V.A., Krasnov A.V., Fedorova Yu.E. et al. Novel nanocomposite materials for oxygen and hydrogen separation membranes. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020. Vol. 45. Issue 25. Pp. 13575–13585. (In Rus.)
15. Startsev A.N. Low-temperature catalytic decomposition of hydrogen sulfide into hydrogen and diatomic gaseous sulfur. *Kinetics and Catalysis*. 2016. Vol. 57. No. 4. Pp. 516–528. (In Rus.)
16. Aminov R.Z., Bairomov A.N. Combining hydrogen energy cycles with nuclear power plants. Moscow: Nauka, 2016. 254 p.
17. Shchukarev S.A. Lectures on the general course of chemistry. Leningrad: Leningrad University Publishing House, 1962. Vol. 1.
18. Khazeev A.A., Cherepanova M.V. Modernization of the synthesis stage in the production of methanol. *PNRPU Bulletin. Chemical Technology and Biotechnology*. 2020. No. 3. Pp. 123–142. (In Rus.)
19. Krilov O.V. Carbon dioxide conversion of methane into synthesis gas. *Russian Chemistry Journal*. 2000. Vol. 44. No. 1. Pp. 19–33. (In Rus.)
20. Afanasev S.V., Gartman V.L. Catalytic conversion of carbon monoxide of the first and second stages. *Business magazine "Neftegaz.RU"*. 2021. No. 7 (115). Pp. 28–34. (In Rus.)
21. Grim R.G., Zhe Huang, Guarnieri M. et al. Transforming the carbon economy: Challenges and opportunities in the convergence of low-cost electricity and reductive CO<sub>2</sub> utilization. *Energy & Environmental Science*. 2020. No. 13 (2). Pp. 472–494.
22. Sedov I.V., Makaryan I.A., Fokin I.G. et al. Current developments in the field of direct production of methanol from natural gas. *Scientific Journal of Russian Gas Society*. 2021. No. 2 (30). Pp. 44–53. (In Rus.)
23. Khalifa A.A., Bazhin V.YU., Shalabi M.E.M.K. et al. Improving the efficiency of the carbothermal reduction of red mud by microwave treatment. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2021. No. 2 (157). Pp. 264–279.

Статья проверена программой Антиплагиат

Статья поступила в редакцию 14.11.2023, принята к публикации 11.12.2023

The article was received on 14.11.2023, accepted for publication 11.12.2023



## РЕЦЕНЗИЯ

на статью Волкова А.Е. и Волкова А.А.

**«Производство металлов, неметаллов, энергии и энергоносителей методом плазменно-дугового электролитического центробежного конвертирования»**

В представленной на рассмотрение редакции статье авторами Волковым А.Е. и Волоковым А.А. предлагается новая интегрированная энергоэффективная технология комплексной переработки рудного и углеводородного сырья с получением ценных материалов и энергоносителей.

Поставленная цель разработки ресурсо- и энергосберегающей технологии является актуальной. Предлагаемый подход объединения различных процессов (металлургических, химических, энергетических) в единую технологическую цепочку выглядит обоснованным и представляет научный интерес.

Авторами подробно рассмотрены принципы работы предлагаемого метода, проведены оценки энерго-

затрат и показателей эффективности. Описание этапов технологии и расчетных примеров свидетельствует о серьезной проработке материала.

Хотя конкретная реализация концепции пока полностью не продемонстрирована, ее достоинства в плане сохранения энергии и ресурсов заслуживают внимания. Разработка может стать основой для дальнейшей практической отработки и совершенствования предложенного подхода.

В целом статья написана четко, логично структурирована и может представлять интерес для читателей журнала. Рекомендую к опубликованию после устранения незначительных неточностей.

Р е ц е н з е н т: *Рахимов Р.Х.*, доктор технических наук; Институт материаловедения Научно-производственного объединения «Физика-Солнце» Академии наук Республики Узбекистан (г. Ташкент, Республика Узбекистан)

## РЕЦЕНЗИЯ

на статью Волкова А.Е. и Волкова А.А.

**«Производство металлов, неметаллов, энергии и энергоносителей методом плазменно-дугового электролитического центробежного конвертирования»**

Статья посвящена актуальной комплексной проблеме современной энергетики, горно-обогатительной промышленности, металлургии и нефтехимии. Рассматривается технология плазменно-дугового электролитического центробежного конвертирования. В статье большое внимание уделяется проблемам энергосбережения и устранению выбросов. Поэтому ее актуальность не вызывает сомнений.

В статье представлено описание научных подходов и технологии, в которой основанная идея связана с комплексной переработкой руды и углеводородов, при этом за счет переработки создается энергоноситель, обеспечивающий энергией процесс переработки. Для сохранения максимального количества энергии и предотвращения ее потерь в окружающую среду процессы производства энергии и переработки вещества объединяются в единый процесс, работающий по схеме рудоуглеводородного энергоблока. Дается полный

и развернутый анализ проблем и рассматриваются подходы для ее решения.

Материал статьи имеет ярко выраженную авторскую позицию, так как авторы не просто анализируют научные положения разных авторов, но и высказывают свою точку зрения.

Стиль изложения научный, используется терминология, характерная для данной предметной области. Логичность и последовательность изложения материала присутствует. Проведение анализа по заявленной проблематике выполнено. Применение методов научного познания – да, цитируемость научных источников – да. Рукопись статьи оформлена в соответствии с требованиями журнала.

Статья может быть полезна специалистам, занимающимся вопросами энергосбережения, экологии и комплексной переработки руды.

Р е ц е н з е н т: *Шаркеев Ю.П.*, доктор физико-математических наук, профессор; главный научный сотрудник; Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук

### РЕЦЕНЗИЯ

на статью Волкова А.Е. и Волкова А.А.

**«Производство металлов, неметаллов, энергии и энергоносителей  
методом плазменно-дугового электролитического центробежного  
конвертирования»**

Представленная статья раскрывает проблемы и предлагает решения в области энергетики, переработки вещества. В статье поставленная задача решается путём объединения металлургического, химического и энергетического производства в единый производственный комплекс. В статье используются практические примеры на отдельных участках реализации технологии, позволяющие определить реализуемость заявленной схемы производства энергии и переработки вещества.

В статье представлены необходимые расчеты осуществления технологии по ее составляющим, которые сгруппированы на основе системного подхода.

Положительной стороной является наличие технологических схем, раскрывающих суть проблемы и ее решение. Можно отметить, что статья раскрывает теоретическую схему реализации новой технологии, которую возможно применить на практике.

Статья рекомендуется к печати.

Рецензент: Казаков А.С., кандидат химических наук, доцент; директор; ООО «НПО «Металлы Урала»



### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Волков Анатолий Евгеньевич**, кандидат технических наук; директор; ООО «АдиРУТ»; г. Москва, Российская Федерация

**Волков Александр Анатольевич**, аспирант; Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина; г. Екатеринбург, Российская Федерация. ORCID: 0000-0003-3720-7622; E-mail: aa.volkov@urfu.ru

### ABOUT THE AUTHORS

**Anatolii E. Volkov**, Cand. Sci. (Eng.); Director; AdiRUT LLC; Moscow, Russian Federation

**Alexander A. Volkov**, postgraduate student; Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; Yekaterinburg, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-3720-7622; E-mail: aa.volkov@urfu.ru