

<https://doi.org/10.51301/ejsu.2022.i3.01>

## New opportunities for the development of the coal industry: technology of waste gas purification from SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>

N.K. Dosmukhamedov\*, E.E. Zholdasbay, M.G. Egizekov

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

\*Corresponding author: [nurdos@bk.ru](mailto:nurdos@bk.ru)

**Abstract.** Based on a brief overview and analysis of global trends and the development of the coal industry, the article examines the causes and factors constraining the provision of conditions for the sustainable development of the industry. It is shown that despite the negative consequences resulting from the burning of coal, it remains the main cheap and widespread source of energy. The current state of the global coal industry is analyzed and ways of solving its further effective development are shown. One of the key solutions for the development of the coal industry is to reduce the environmental burden of harmful gases (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>). A significant reserve for the development of the coal industry could be the involvement of high-calorie low-ash cheap coals. However, this requires the development and implementation of highly efficient, innovative technologies for deep purification of waste gases of TTP from SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>. One of such solutions is a new technology of complex deep purification of waste gases of the TTP, providing a high level of utilization of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> with the production of commercial products.

**Keywords:** coal, waste gases, purification, sulfur dioxide, nitrogen oxide, chemical absorption, chemical regeneration.

### 1. Введение

Проблема загрязнения воздуха и связанных с ней негативных последствий для здоровья населения набирает все большие темпы вследствие роста энергопотребления промышленностью и урбанизированными территориями. Научные данные свидетельствуют о том, что загрязнители воздуха, которые переносятся в атмосфере на большие расстояния, приводят к серьезным экологическим последствиям: к кислотным дождям, коррозии металлов, гибели флоры и фауны, заболеваниям людей, подкисление почвы, эвтрофикация водных объектов, обуславливая деградацию экосистем и соответственно снижения их продуктивности и качества жизни.

Одним из основных источников загрязнений атмосферы являются теплоэлектростанции, работающие на сжигании угля, мировые запасы которого огромны. По сравнению сравнительно высоких цен на нефть и природный газ, изобилие запасов угля предопределяет его использование в качестве надежного и экономически эффективного вида топлива в странах Евразии, включая Казахстан. Уголь может обеспечивать энергетические потребности планеты на протяжении ближайших столетий и является наиболее распространенным в мире энергоносителем.

### 2. Мировые тренды. Направления развития угольной отрасли

В мире ежегодно добывается примерно 5 млрд.т. каменного угля. В Китае добывается более 1 млрд.т. угля, в США – около 1 млрд.т. Около 70% мировых разведан-

ных месторождений угля находится на территории США, Китая и стран СНГ, включая Россию и Казахстан. По запасам углей Казахстан входит в десятку стран-лидеров, уступая лишь Китаю, США, России, Австралии, Индии, ЮАР, Украине. Государственным балансом республики учтены запасы по 49 месторождениям, которые составляют 33.6 млрд.т, в том числе каменных – 21.5 млрд.т, бурых углей – 12.1 млрд.т. [1].

По данным Международного энергетического агентства (МЭА), в 2007 году в странах Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) 81% угля потреблялось в производстве электроэнергии и 10% - в промышленности (включая 3% на производство стали). В настоящее время на уголь приходится 47% в структуре топливного баланса электроэнергетики, и ожидается, что в будущем уголь останется ключевым видом топлива в структуре топливного баланса электроэнергетики [2, 3].

По величине запасов уголь превосходит все остальные виды ископаемого топлива. По данным BP Statistics [4], коэффициент кратности запасов R/P (отношение оставшихся запасов к годовой добыче) для угля в настоящее время составляет 122 года. Для сравнения: коэффициент кратности запасов нефти равен 42 годам, природного газа - 60 годам.

Запасы угля более равномерно распределены между Азиатско-Тихоокеанским регионом, Северной Америкой, Европой и Евразией (рисунок 1). Поэтому, по утверждению Мировой энергетической ассоциации (МЭА), риск значительных перебоев поставок не так велик, как в случае нефти [4].

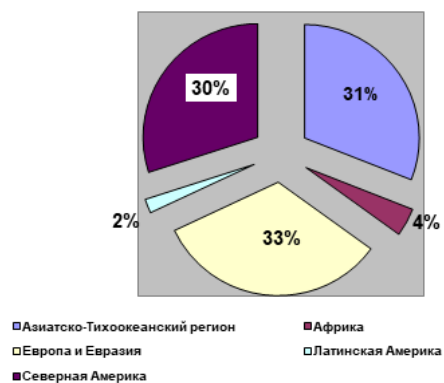


Рисунок 1. Доказанные запасы угля по данным BP Statistics [4]

В структуре мирового баланса первичной энергии уголь является вторым после нефти крупнейшим источником энергии, затем следует природный газ. На уголь приходится 27% мирового объема предложения энергии (рисунок 2).

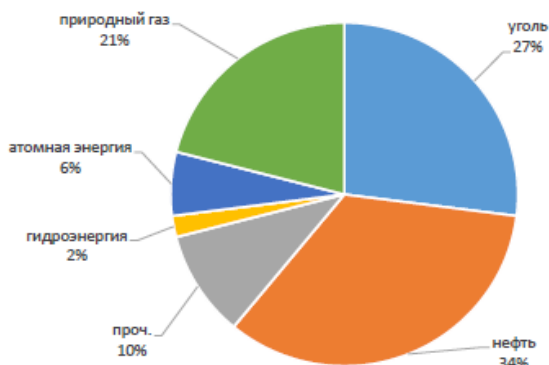


Рисунок 2. Мировое предложение первичной энергии

По данным МЭА, в 2007 году в странах Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) 81% угля потреблялось в производстве электроэнергии и 10% - в промышленности (включая 3% на производство стали). В то же время, на уголь приходится 47% в структуре топливного баланса электроэнергетики (рисунок 3).



Рисунок 3. Топливный баланс мировой электроэнергетики

По утверждению МЭА ожидается, что в будущем уголь останется ключевым видом энергии в структуре топливного баланса электроэнергетики.

Спрос на уголь растет небывалыми темпами, причем большая часть потребления приходится на развивающиеся страны.

На развитие энергетики оказывают влияние ограниченность и неравномерность распределения ресурсов ископаемого топлива при росте потребления энергетических ресурсов, стремление стран к обеспечению энергетической безопасности, экологические ограничения по выбросам парниковых газов. Данные факторы приводят к необходимости увеличения доли возобновляемых источников энергии в энергетическом балансе.

Как показывают исследования международных энергетических агентств и институтов, доля возобновляемых источников энергии в мировом энергетическом балансе 2050 г. может составить порядка 18%, или даже выше, для удовлетворения возрастающего спроса на энергию и стабилизации содержания парниковых газов в атмосфере. Развитыми странами принимаются Программы по развитию возобновляемых источников энергии. Так, Европейским Союзом принято решение об увеличении доли производства электроэнергии от возобновляемых источников энергии до 20% к 2020 г. (без учета крупных гидроэлектростанций). В Казахстане доля электроэнергии, выработанной, на крупных гидроэлектростанциях, составляет порядка 12%.

### 3. Анализ текущей ситуации угольной отрасли Казахстана

Минерально-сырьевая база угольной промышленности Казахстана достаточно прочная. Несмотря на большие объемы добычи углей, их запасы в недрах остаются значительными. Сегодня технические возможности казахстанских угледобывающих предприятий позволяют полностью обеспечить спрос на внутреннем рынке. Вместе с тем увеличение экспортного объема казахстанского угля маловероятно. Наша конкурентоспособность падает вследствие сравнительно низкого качества углей и высоких транспортных издержек.

Развитие угольной отрасли в Казахстане с решением основных ключевых его задач – минимизации эмиссий в окружающую среду диоксида серы и парниковых газов, внедрения новых безотходных технологий по утилизации отходов сжигания угля позволит повысить технологическую и инновационную сложность экономики. В рамках новых технологических трендов, таких как Индустрия 4.0, вся промышленность, в том числе и угольная отрасль должна быть направлена на увеличение эффективности и производительности существующих технологий за счет принятия высокотехнологичных решений по переработке продуктов сжигания угля путем автоматизации, роботизации и цифровизации производства.

Сегодня угольная отрасль республики обеспечивает выработку в Казахстане 78% электроэнергии, практически стопроцентную загрузку коксохимического производства. Ресурсы энергетического угля в полной мере обеспечивают потребности тепловых электростанций.

Для удовлетворения спроса коммунального сектора быстро растущих урбанизированных территорий и соответственно численности их населения планируется увеличение добычи малозольного угля на Шубаркульском и Майкубенском месторождениях. Балансовые запасы угля позволяют полностью обеспечить внутренние потребности и экспортировать значительные объемы угольной продукции.

В Казахстане преобладают низкокачественные угли с высоким содержанием серы, которые покрывают более чем на 40% спрос на первичные энергоресурсы. Используемые в энергетике и промышленности угольные ресурсы характеризуются низким уровнем обогащения. Несотвествующий международным стандартам экспортный уголь реализуется на внешнем рынке по сравнительно невысоким ценам.

Выработка электроэнергии в республике производится на традиционных источниках – тепло- и гидроэлектростанциях (соответственно 88% и 12%). По состоянию на 2010 г., установленная электрическая мощность тепловых и гидроэлектростанций в республике составила соответственно 17 252 и 2 273 тыс.кВт. В региональном разрезе наибольший объем мощностей тепловых электростанций (46.4%) приходится на Павлодарскую область, гидроэлектростанций (75.8%) на Восточно-Казахстанскую область.

Основную электроэнергию в Казахстане вырабатывают 37 тепловых электростанций, работающих на углях Экибастузского, Майкубинского, Тургайского и Карагандинского бассейнов. Крупнейшие из них – Экибастузские ГРЭС-1, ГРЭС-2 и Аксусская (Ермаковская) ГРЭС, которая вырабатывает до 14% всей электроэнергии.

Тепловые электростанции Казахстана, работающие на углях, имеют КПД 33-35%. Объекты электроэнергетики, построенные в 50-е и 70-е годы XX века, практически выработали производственный ресурс. При этом коэффициент износа основного электрооборудования, по предварительным расчетам на 2010 г., составляет 82%.

#### 4. Очистка отходящих газов ТЭЦ от SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> и CO<sub>2</sub>

Одной из ключевых проблем угольной отрасли является высокое содержание сернистого ангидрида и парниковых газов (CO<sub>2</sub>) в отходящих газах ТЭЦ.

Угли содержат от 0.2 до десятков процентов серы в основном в виде пирита, сульфата, закисного железа и гипса. Для уменьшения концентрации серы в продуктах сгорания угля возможны два пути: уменьшение содержания серы в топливе до его сжигания и очистка дымовых газов от окислов серы. Имеющиеся способы улавливания серы при сжигании угля далеко не всегда используются из-за сложности и дороговизны. Поэтому значительное количество ее поступает и, по-видимому, будет поступать в ближайшей перспективе в окружающую среду.

Сжигание на тепловых электростанциях, преимущественно низкокалорийного бурого угля с высоким содержанием золы и серы, не отвечающего стандартам котельного оборудования, повлекло за собой следующие негативные последствия:

- выбросы в воздушный бассейн загрязняющих веществ в концентрациях, превышающих предельно допу-

стимые нормы, включая значительные объемы «парниковых газов», влияющих на изменение климата;

- захламление территорий золоотвалами и терриконами отработанной породы, с которых на десятки километров разносятся пыль, зола и шлаки;

- формирование губительных кислотных дождей.

Доля основных подкатегорий в общих выбросах промышленных групп (рисунок 4) показывает, что удельный вес выбросов от источников энергетического комплекса Казахстана с его высокой зависимостью от угля как основного источника энергии, составляет 61% от эмиссий загрязняющих веществ в атмосферный воздух в республике.

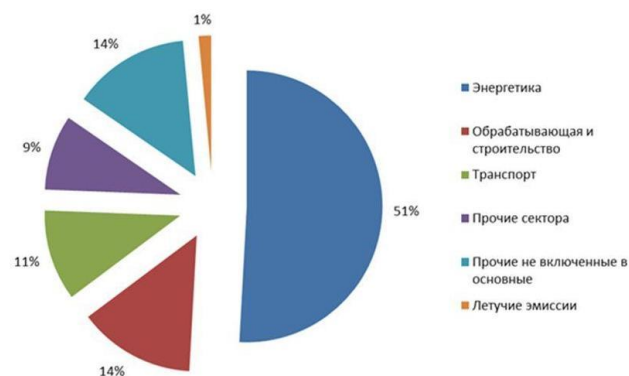


Рисунок 4. Доля основных подкатегорий в общих выбросах промышленных групп

Выбросы тепловых электростанций составляют до 70% от общего объема эмиссий энергетического комплекса (Северная зона – 92%, в том числе Карагандинская область – до 42%, Павлодарская область – 39%). Наиболее крупными источниками выбросов Центральной зоны являются ОАО «Испат-Кармет» (36%), ОАО «ЕЭК» (15.5%).

Выбросы промышленных предприятий Казахстана в атмосферу составляют более трех миллионов тонн в год, из которых 85% приходится на 43 крупных предприятия. За период 1990-2008 гг. объем выбросов от стационарных источников снизился почти в три раза за счет усиления контроля, увеличения доли природного газа в топливно-энергетическом балансе страны, а также по причине спада производства в ряде отраслей промышленности.

В эмиссиях от различных источников Единой энергетической системы доминируют твердые частицы - 35%, диоксид серы - 31%, окись углерода- 19%, окислы азота - 14%.

Уровень существующих систем очистки газов значительно уступает современным требованиям. Отсутствие надежной системы очистки дымовых газов и использование старых методов улавливания SO<sub>2</sub> и других вредных загрязнителей атмосферы привели к возрастанию их концентраций в выбросах выше предельно допустимых норм. По данным статистики, из всего количества источников выбросов загрязняющих веществ, имеющихся в республике, очистными сооружениями оборудовано ~ 10% источников.

На действующих ТЭЦ очистку отходящих газов от SO<sub>2</sub> проводят пропусканием потока отходящего газа через известняк - CaCO<sub>3</sub> или гашеную известь - Ca(OH)<sub>2</sub>

[5-8]. Эти методы не достаточно эффективны и обладают рядом недостатков: высокое остаточное содержание серы в газах (в лучшем случае 90%  $\text{SO}_2$  удаляется из отходящих газов при его исходном содержании около 2%); процессы довольно дорогие (при их применении стоимость электричества может увеличиться на несколько десятков процентов); большой выход не используемых твердых отходов (в основном, загрязненного примесями от сгорания угля, гипса -  $\text{CaSO}_4$ ), количество которых составляет несколько процентов от веса сжигаемого угля. К примеру, тепловая станция мощностью 1ГВт, сжигающая уголь с содержанием 3% серы, производит в сутки более 1000т гипса, загрязненного алюминием, железом, кремнием, фосфором и др. элементами, присутствующими в золе.

Мониторинг состояния атмосферы загрязнения урбанизированных территорий показал, что города Алматы, Зыряновск, Усть-Каменогорск, Темиртау, Тараз относятся к зонам с высокой степенью экологического риска для здоровья населения.

Государственное регулирование и контроль выбросов осуществляется в соответствии с Техническим регламентом [9]. В настоящее время в Технический регламент предлагается внести дополнения по дифференциации требований по выбросам для котельных установок, не подлежащих реконструкции, требующих реконструкции, а также вводимых на действующих тепловых электрических станциях и на новых теплоэлектростанциях. Настоящие предложения позволят обеспечить поэтапный переход электростанций на более высокий уровень энергоэффективности и экологической безопасности сжигаемого угля.

Снижение эмиссий на фоне увеличения потребностей в энергоносителях, в основном, зависит от обеспечения тепловых электрических станций высококачественным углем и применением инновационных технологий сжигания и очистки отходящих газов от  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}_2$ .

Слабым звеном угольной отрасли, наряду с перечисленными выше, является использование углей с низкой калорийностью и высокой зольностью. Низкая комплексность переработки угля и продуктов его сжигания, практическое отсутствие производств товарной продукции с высокой добавленной стоимостью указывает на сырьевую направленность отрасли и ставит страну в полную зависимость от спроса мировых рынков на уголь.

Переход угольной отрасли от сырьевой направленности возможен при создании условий для разработки и внедрения наукоемких и высокотехнологичных производств.

В развитых странах за использование угля с высоким содержанием серы взимаются значительные штрафы. К примеру, в США налоги за использование высокосернистых углей составляют до 0.202\$ за 1 MBtu угля с высоким содержанием серы и 0.036\$ за 1 MBtu угля с низким содержанием серы [10, 11].

Использование высококалорийных углей с высоким содержанием серы в настоящее время сдерживается из-за отсутствия высокоэффективной технологии очистки отходящих газов от сернистого ангидрида. В этой связи большой интерес представляет интегрирование инновационной технологии глубокой очистки отходящих газов от  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}_2$  [12] в действующие технологические

линии ТЭЦ. Это позволит вовлечь в производство угли с высоким содержанием серы. При этом достигается значительный экономический и социальный эффект за счет снижения стоимости угля и отпускной цены выработанного тепла и/или электроэнергии для населения.

Научно-технический уровень разработанной технологии включает использование двух инновационных технологий:

1. Глубокой очистки отходящих газов от  $\text{SO}_2$  путем *химической абсорбции*  $\text{SO}_2$  расплавом карбонатов щелочных металлов и *регенерацию* карбонатно-сульфатных расплавов восстановлением монооксидом углерода и/или природным газом с получением товарных продуктов.

2. Технологии полной утилизации  $\text{CO}_2$  путем *электролиза* карбонатно-оксидных расплавов щелочных металлов с получением товарного чистого монооксида углерода и кислорода.

#### **Важнейшие целевые индикаторы технологии:**

– комплексная глубокая очистка отходящих газов от  $\text{SO}_2$  и  $\text{CO}_2$  с получением товарных продуктов;

– полная утилизация  $\text{CO}_2$  путем электролиза расплавленных карбонатно-оксидных солей щелочных металлов с получением чистого товарного монооксида углерода и кислорода.

#### **Основные показатели эффективности технологии:**

– обеспечение значительного сокращения выбросов серы в атмосферу (остаточное содержание серы в выбрасываемых в атмосферу газах после очистки будет составлять 0.001%) и полной утилизации  $\text{CO}_2$  до  $\text{CO}$ ;

– исключение использования дорогостоящих материалов и реагентов;

– исключение образования дополнительных твердых и/или жидких отходов;

– повышение энергоэффективности за счет вовлечения в переработку высококалорийных углей с высоким содержанием серы;

– снижение издержек ТЭЦ и металлургических предприятий за счет сокращения существующих энерго- и материально затратных, расходуемых для операций очистки отходящих газов;

– снижение объема отходов производства за счет получения дополнительных товарных продуктов – элементной серы или серной кислоты и монооксида углерода;

– обеспечение стабильных условий комплексной очистки отходящих газов от  $\text{SO}_2$  и  $\text{CO}_2$  за счет использования новых технических решений («*ноу-хау*»).

#### **Финансирование**

Исследования проводились в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2020-2022 годы по приоритетному направлению «Рациональное использование природных ресурсов, в том числе водных ресурсов, геологии, переработки, новых материалов и технологий, безопасных изделий и конструкций» проекта № AP08856384 ««Разработка новой высокотехнологичной технологии утилизации  $\text{SO}_2$  и  $\text{CO}_2$  из отходящих газов ТЭЦ и металлургических предприятий с получением товарных продуктов»».



## Литература / References

- [1] Programma po narahivaniyu potenciala dlya regionalnogo sotrudnichestva po prioritetu Regionalnogo plana deistvii po ohrane okrujayuschei sredi «Kachestvo vozduha» v ramkah proekta KAPAKT. (2012). *Tashkent*
- [2] Programma po razvitiyu elektroenergetiki Respubliki Kazahstan na 2010-2014 godi §302. (2010). *Postanovlenie Pravitelstva Respubliki Kazahstan*
- [3] Cena energii Formirovanie mejdunarodnih cen na ugol. (2010). *Otchet Sekretariata Energeticheskoi Hartii. Bryussel*
- [4] Kaplan, V., Dosmukhamedov, N.K. & Lubomirsky, I. (2017). Electrochemical Method of Carbonate Melts Regeneration for Efficient Capture of SO<sub>2</sub> from Coal Combustion. *231st ECS Meeting in New Orleans, LA, USA, FO 1070, 103*
- [5] Gupta, S., Singh Pahwa & M., Gupta, A. (2013). Innovative Price Adjustments Technique for Thermal Coal: A Study of operation Function under Changing Techno Environment. *Global Journal of Management and Business Research Finance, 13(4), 8-15*
- [6] Putilov, V.Ya. (2003). *Ekologiya energetiki, M.: MEI*
- [7] Abramov, A.I. & Elizarov, D.P. (2002). *Povishenie ekologicheskoi bezopasnosti TES. M.: MEI*
- [8] Rijkin, V.Ya. (1976). *Teplovie elektricheskie stancii. M. Energiya*
- [9] Tehnicheskii reglament «Trebovaniya k emissiyam v okrujayuschuyu sredu pri sjigani razlichnih vidov topliva v kotlah teplovih elektricheskikh stancii» §1232. (2007). *Postanovlenie Pravitelstva Respubliki Kazahstan*
- [10] The price of various types of coal were estimated according to <http://www.eia.gov/coal/news/markets/>. (2016)
- [11] Hutzler, M., Doman, L. & Anderson, A.T. (2020). *International Energy outlook 98: With Projections thru 2020*
- [12] Dosmukhamedov, N., Kaplan, V. (2021) Flue gas purification from SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> using molten mixture of alkali metal carbonates. *International journal of coal preparation and utilization, 3004-3015. <https://doi.org/10.1080/19392699.2021.1931147>*

## Көмір саласын дамытудың жаңа мүмкіндіктері: шығатын газдарды SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> тазарту технологиясы

Н.Қ. Досмұхамедов\*, Е.Е. Жолдасбай, М.Г. Егизеков

Satbayev University, Алматы, Қазақстан

\*Корреспонденция үшін автор: [nurdos@bk.ru](mailto:nurdos@bk.ru)

**Аңдатпа.** Мақалада көмір саласының дамуына қысқаша шолу негізінде және әлемдік трендтерді талдау мен саланың тұрақты даму жағдайларын қамтамасыз етуді тежейтін себептер мен факторлар қарастырылған. Көмірді жағу нәтижесінде пайда болатын теріс әсерлерге қарамастан, ол негізгі арзан және кең таралған энергия көзі болып қала береді. Әлемдік көмір саласының қазіргі жай-күйіне талдау жасалды және оны одан әрі тиімді дамытудың шешу жолдары көрсетілді. Көмір саласын дамытудың негізгі шешімдерінің бірі қоршаған ортаға зиянды газдардың (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>) жүктемесін азайту болып табылады. Көмір саласын дамытудың елеулі резерві жоғары калориялы күлі аз арзан көмірді пайдалану болуы мүмкін. Алайда, бұл ЖЭО-ның шығатын газын SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>-ден терең тазартудың жоғары тиімді, инновациялық технологияларын әзірлеуді және енгізуді талап етеді. Осындай шешімдердің бірі тауар өнімдерін алу отырып SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> кәдеге жаратудың жоғары деңгейін қамтамасыз ететін ЖЭО шығатын газдарды кешенді терең тазартудың жаңа технологиясы болып табылады.

**Негізгі сөздер:** көмір, шығатын газдар, тазарту, күкіртті ангидрит, азот оксиді, химиялық абсорбция, химиялық регенерация.

## Новые возможности развития угольной отрасли: технология очистки отходящих газов от SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>

Н.К. Досмұхамедов\*, Е.Е. Жолдасбай, М.Г. Егизеков

Satbayev University, Алматы, Казахстан

\*Автор для корреспонденции: [nurdos@bk.ru](mailto:nurdos@bk.ru)

**Аннотация.** В статье на основании краткого обзора и анализа мировых трендов и развития угольной отрасли рассмотрены причины и факторы, сдерживающие обеспечение условий устойчивого развития отрасли. Показано, что несмотря на негативные последствия, возникающие в результате сжигания угля, он остается основным дешевым и распространенным источником энергии. Проанализировано современное состояние мировой угольной отрасли и показаны пути решения ее дальнейшего эффективного развития. Одним из ключевых решений развития угольной отрасли является снижение нагрузки на окружающую среду вредных газов (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>). Значительным резервом развития угольной отрасли могло бы стать вовлечение высококалорийных малозольных дешевых углей. Однако это требует

разработки и внедрения высокоэффективных, инновационных технологий глубокой очистки отходящих газов ТЭЦ от SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>. Одним из таких решений является новая технология комплексной глубокой очистки отходящих газов ТЭЦ, обеспечивающей высокий уровень утилизации SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> с получением товарных продуктов.

**Ключевые слова:** *уголь, отходящие газы, очистка, сернистый ангидрид, оксид азота, химическая абсорбция, химическая регенерация.*