

УДК 622.278:662.747 © К.Ю. Алексеев¹, Е.Г. Горлов², В.Г. Пилецкий², А.А. Фролов², С.М. Фролов^{3,4,5}, 2026

UDC 622.278:662.747 © K.Yu. Alekseyev¹, E.G. Gorlov², V.G. Piletsky², A.A. Frolov², S.M. Frolov^{3,4,5}, 2026

¹ Ассоциация предприятий угольной отрасли, 107996, г. Москва, Россия

² ООО «Институт горючих ископаемых – научно-технологический центр» («ИГИ-НТЦ»), 115230, г. Москва, Россия

³ Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (ФИЦ ХФ РАН), 119991, г. Москва, Россия

⁴ Национальный исследовательский университет, 111250, г. Москва, Россия

⁵ Научно-исследовательский институт системных исследований РАН (ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН), 117218, г. Москва, Россия

✉ e-mail: gorloveg@mail.ru

¹ Association of Enterprises of the Coal Industry, Moscow, 107996, Russian Federation

² Institute of Combustible Fossils – Scientific and Technical Center” (ICF-STC LLC), Moscow, 115230, Russian Federation

³ N.N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 119991, Moscow, Russian Federation

⁴ National Research University, 111250, Moscow, Russian Federation

⁵ Scientific Research Institute of System Research of the Russian Academy of Sciences, 117218, Moscow, Russian Federation

✉ e-mail: gorloveg@mail.ru

Социальная угольная энергетика, былое и будущее

Social coal power generation: the past and the future

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-2-103-112>

Распоряжения Правительства РФ № 1152-р от 30.04.2021 и от 31 мая 2020 г. Направлены на решение задач и целей газификации населенных пунктов в угольных регионах Восточной Сибири и Дальнего Востока энергетическим газом от процессов газификации углей и биомассы. В 1950-е годы в СССР работало свыше 2500 газогенераторов и более 200 газовых заводов, производящих ежегодно свыше 35 млрд куб. м газа для отраслей промышленности и сельского хозяйства. Для газификации углей использовали полумеханизированные газогенераторы со слоевой загрузкой топлива.

В середине 1970-х годов была принята Государственная программа Ц.008 по созданию из углей топлива и химической продукции нового поколения газификацией углей. На основании этой Программы в ИГИ профессором М.Я. Шпиртом была создана методика подбора бурых и каменных углей для эффективного осуществления процессов газификации. С 2000 г. проводилось создание принципиально новой модели газификации углей с использованием в качестве сырья мелкодисперсного угля субмикронных частиц водоугольного топлива, прямоточно-вихревого дутья в газогенератор, бескомпрессорного воздушного дутья, молекулярных сит из углей для обогащения воздуха кислородом, систем улавливания смол и возвращения их в качестве компонента водоугольного топлива. Ряд элементов этих подходов и новой техники был испытан на установках газификации угля на Томской ТЭЦ-3 в г. Омске, на Жилевской ОПОФ. Далее, с учетом этого накопленного экспериментального опыта по газификации водоугольной суспензии каменных и бурых углей «ИГИ», ЗАО «Компомаш-ТЭК» и ООО «Новые физические принципы» совместно создали научные и технологические основы процесса безотходной прямоточной высокотемпературной газификации грубодисперсных ВУС угля в среде ультраперегретого пара. В Кузбассе 350 угольных пластов, в них содержатся два главных золообразова-

АЛЕКСЕЕВ К.Ю.

Действительный член Российской академии горных наук, президент Ассоциации предприятий угольной отрасли, 107996, г. Москва, Россия, e-mail: info@cool-union

ГОРЛОВ Е.Г.

Доктор техн. наук, профессор, научный руководитель ООО «ИГИ-НТЦ», 115230, г. Москва, Россия, e-mail: gorloveg@mail.ru

ПИЛЕЦКИЙ В.Г.

Канд. техн. наук, исполнительный директор ООО «ИГИ-НТЦ», 115230, г. Москва, Россия, e-mail: pvg2000@yandex.ru

ФРОЛОВ А.А.

Советник научного руководителя
 ООО «ИГИ-НТЦ»,
 115230, г. Москва, Россия,
 e-mail: a.frolov@maxima.ru

ФРОЛОВ С.М.

Доктор физ.-мат. наук,
 заведующий отделом,
 заведующий лабораторией
 ФИЦ ХФ им. Н.Н. Семенова РАН,
 119991, г. Москва, Россия,
 профессор Национального
 исследовательского университета,
 111250, г. Москва, Россия,
 ведущий научный сотрудник
 ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН,
 117218, г. Москва, Россия,
 e-mail: smfrolov@chph.ras.ru

теля – оксиды алюминия и кремния, но при 75% их содержания в золе углей, десятилетиями уходящих в отвалы. На базе указанных особенностей углей и отходов идет создание комплексной технологии их безотходного передела в синтез-газ и параллельного получения высоколиквидных продуктов – различных марок ферросиликоалюминия и сплавов алюминия из минеральной части угля с ростом стоимости продукта в 40 раз больше цены угля, улучшая рентабельность угледобывающего предприятия. Государственная поддержка реализации проекта послужит интересам угольной отрасли как основы оздоровления угольной отрасли, пополнения бюджета. Решение проблем энергообеспечения коммунально-бытового сектора и создание отечественного малотоннажного производства новых видов жидких топлив из углей указано в ряде правительственных распоряжений, в том числе восстановление Института ИГИ, однако ФГУП ИГИ до сих пор не приступило к их реализации. При этом сорван следующий этап – создание технологии и аппаратного оформления снабжения метанированным газом из угля коммунально-бытовых объектов малых населенных пунктов угольных регионов, так как потребность в природном газе зачастую ограничивается дальними расстояниями.

Ключевые слова: газификация, уголь, биомасса, энергетический газ, метанирование, стоимость, новые процессы, безотходная газификация, минеральный состав угля, ферросиликоалюминий, рентабельность, ФГУП ИГИ, социальная угольная энергетика, будущее.

Для цитирования: Социальная угольная энергетика, былое и будущее / К.Ю. Алексеев, Е.Г. Горлов, В.Г. Пилецкий и др. // Уголь. 2026;(2):103-112. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-2-103-112.

Abstract

Orders of the Government of the Russian Federation No. 1152-r dated 04/30/2021 and dated May 31, 2020 are aimed at solving the tasks and objectives of gasification of settlements in the coal regions of Eastern Siberia and the Far East with energy gas from coal and biomass gasification processes.

In the 1950s, over 2,500 gas generators and more than 200 gas plants were operating in the USSR, producing over 35 billion tons annually. cubic meters of gases for industries and agriculture. Semi-mechanized gas generators with layered fuel loading were used for coal gasification.

In the mid-70s, the Ts.008 State Program was adopted to create new generation fuels and chemical products from coal by coal gasification. Based on this Program at IGI, Professor M.J. Shpirt created a method for selecting brown and hard coals for the effective implementation of gasification processes. The hardware and technological design of these processes required the use of an expensive component in the blast, oxygen, which led to a significant increase in the cost of gas and its inexpediency in these conditions to be used in municipal energy. Therefore, in order to obtain energy gas from coal for the municipal sector, it is clear that it is necessary to develop new approaches to the implementation of this process.

Since 2000, a fundamentally new model of coal gasification has been created using fine coal, submicron particles of water-coal fuel as raw materials, direct-flow vortex blowing into a gas generator, the use of a compressor-free air blast, the creation of molecular sieves from coals to enrich the air with oxygen, resin capture systems and their return as a component of water-coal fuel. A number of elements of these approaches and new technology have been tested at coal gasification plants at Tomsk TPP-3, in Omsk at Zhilevskaya OPOF. (3)

Further, taking into account this accumulated experimental experience in gasification of coal-water suspension of hard and brown coal, IGI, CJSC Kompomash-TEK and ООО Novye Fizicheskie Principy jointly created the scientific and technological foundations of the waste-free high-temperature gasification of coarse coal in an ultra-superheated steam environment.

There are 350 coal seams in Kuzbass, they contain two main ash-forming agents – aluminum and silicon oxides, but with 75% of their content in coal ash, which has been going into landfills for decades. Based on these features of coal and waste, a

comprehensive technology is being created for their waste-free conversion into synthesis gas and the parallel production of highly liquid products – various grades of ferrosilicon aluminum and aluminum alloys from the mineral part of coal, with an increase in the cost of the product by 40 times the price of coal, improving the profitability of the coal mining enterprise.

State support for the project will serve the interests of the coal industry as the basis for improving the coal industry and replenishing the regional budget. The use of the energy gas produced in generation is one of the solutions to the tension that has arisen in fuel supply programs in Kuzbass – a new approach to social and ration energy supply due to the developed energy system of the region – the urban population is 89%, and the share of the population in the structure of electricity consumption is 10%.

The solution to the problems of energy supply to the municipal sector and the creation of domestic low-tonnage production of new types of liquid fuels from coal is indicated in a number of government orders, including the restoration of the Institute of IGI, but the FSUE IGI has not yet begun to implement them.

At the same time, the next stage was disrupted – the creation of technology and hardware for the supply of methanated gas from coal to municipal facilities in small settlements in coal regions, since the need for natural gas is often limited to long distances.

Keywords

Gasification, coal, biomass, power gas, methanation, cost, new processes, waste-free gasification, mineral composition of coal, ferrosilicoaluminum, profitability, Institute of Combustible Fossils, social coal power generation, future.

For citation

Alekseyev K.Yu., Gorlov E.G., Piletsky V.G., Frolov A.A., Frolov S.M. Social coal power generation: the past and the future. *Ugol*. 2026;(2):103-112. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-2-103-112.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка процессов газификации углей и биомассы с целью обеспечения энергетическим газом для решения задач социальной газификации населенных пунктов, расположенных в угольных регионах Восточной Сибири и Дальнего Востока, должна выполняться в свете Распоряжения Правительства РФ № 1152-р от 30.04.2021 и Распоряжения Президента РФ от 31 мая 2020 г.

Целью этих распоряжений руководства страны было создание сети газового снабжения угольных регионов, как и других регионов страны. Однако забылось, что в 1950-е годы в СССР работало свыше 2500 газогенераторов и более 200 газовых заводов, газифицирующих различные марки углей и производящих ежегодно свыше 35 млрд куб. м энергетических и технологических газов для различных отраслей промышленности, на лесозаготовках, в деревообрабатывающей промышленности и в сельском хозяйстве. Более того, Москва снабжалась энергетическим газом, полученным газификацией бурых углей в Тульской области на Щекинском и Сталиногорском (ныне Красногорском) химических комбинатах

В СССР были проведены многочисленные исследования по созданию газогенераторов различной конструкции, работающих на древесине, торфе, бурых и каменных углях.

Применительно к использованию угольного сырья, в зависимости от характера дутья в те годы различали следующие виды генераторных газов: воздушный, водяной, паровоздушный, парокислородный и регенеративный. Как видно, практически ничего нового за эти годы внесено не было в смысле дутья, которое используется сейчас в промышленности. В те годы наибольшее применение имел паровоздушный способ газификации. При использовании этого метода КПД газификации для бурых углей составлял 67-72%, для низкометаморфизованных каменных углей – 76-82%, а для высокометаморфизованных углей – 85-90% [1].

Для газификации углей использовали преимущественно полумеханизированные газогенераторы со

Таблица 1

Газификация бурых углей в СССР в полумеханизированных газогенераторах

Gasification of brown coals in the USSR in semi-mechanized gas generators

Показатели	Бурые угли месторождений			
	Подмосковный	Челябинский	Сулюктинский	Богословский
Wp, %	29,4	19,2	19,0	30,0
Ap, %	23,8	16,2	10,3	15,4
Qсн, Ккал/м ³	1205	1441	1333	1300
Размер частиц, мм	Грохот	Грохот	Грохот	25-75
Выход сухого газа, Нм ³ /кг	1,4	2,14	2,6	1,0
Состав газа, % об.				
– CO ₂	9,0	4,5	5,0	7,4
– CO	19,3	28,0	29,0	24,0
– H ₂	10,4	15,0	14,6	14,0
– N ₂	56,6	49,9	50,3	52,0
– CH ₄	2,8	2,0	0,8	2,0
– H ₂ S	0,9	0,2	–	–

Газификация каменных углей в СССР [1]

Gasification of hard coals in the USSR [1]

Показатели	Донбасс		Кузбасс		
	Г	Д	Прокопьевский Д	Ленинский Г	Киселевский ГД
Wp, %	5,5	12,5	5,5	9,0	13,3
Ap, %	12,4	11,8	9,9	6,9	13,7
Qсн, Ккал/м ³	1357	1413	1305	1428	1300
Размер частиц, мм	Сорт	Сорт	Сорт	Сорт	Сорт
Выход сухого газа, Нм ³ /кг	3,38	2,74	4,07	3,24	2,91
Состав газа, % об.					
- CO ₂	6,0	7,0	4,4	4,0	3,2
- CO	24,0	24,0	26,0	27,0	27,7
- H ₂	13,9	15,3	10,7	13,0	11,6
- N ₂	52,7	50,0	55,9	52,7	55,4
- CH ₄	2,5	2,5	2,7	2,7	1,8
- H ₂ S	0,4	0,7	-	0,1	-

слоевой загрузкой топлива. Было установлено, что, несмотря на предпочтение, бурые угли быстро теряли свою механическую прочность, что затрудняло эксплуатацию газогенераторов на бурых углях. Выход сухого энергетического газа колебался от 1,87 до 2,91 нм³/кг. Однако зольный остаток из-за механического и химического недожога мог содержать остаточный углерод до 25%.

В табл. 1 и табл. 2 приведены показатели, достигнутые в 1950-е годы в промышленных процессах газификации бурых и каменных углей с получением энергетического газа. В эти же годы был проведен ряд экспериментов по газификации антрацита и кокса на паровоздушном дутье. И в этом случае из-за использования слоевого процесса газификации остаточный углерод в золе достигал 12-15%.

К вопросам газификации углей в СССР с целью получения различных газов вернулись в середине 1970-х годов, когда была принята Государственная программа Ц.008 по созданию из углей нового поколения топлив и химической продукции. На основании проведенных исследований в рамках этой Программы в ИГИ профессором М.Я. Шпиртом с сотрудниками была создана методика подбора бурых и каменных углей для эффективного осуществления процесса газификации. Она впервые позволила эффективно подходить к выбору сырья для воздушного и паровоздушного процесса газификации, т.е. получения энергетического газа [2].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В настоящее время в мире наметилась тенденция развивать такие экономически эффективные области применения газификации углей, как:

- газификация высокозольных и сернистых углей с последующим их сжиганием на тепловых электростанциях;
- газификация углей с целью получения заменителя природного газа;
- газификация углей с целью производства синтез-газа и водорода для нужд нефтехимической и химической промышленности.

Аппаратурно-технологическое оформление этих процессов требовало использования дорогого компонента в дутье – кислорода.

В табл. 3 приведен состав газов, получаемых газификацией угля в зарубежных промышленных процессах. Ясно одно, что такой газ очень дорогой, и его нецелесообразно использовать в коммунальной энергетике.

Для создания процесса обеспечения бытовым топливом вполне пригодна наиболее простая схема газификации углей с использованием воздушного или паровоздушного дутья. Этот газ пригоден по своей калорийности к использованию в энергетических котлах. Поэтому ясно, что с целью получения для коммунально-бытового сектора из углей энергетического газа необходимо разрабатывать новые подходы к реализации этого процесса. Из общей стоимости всего комплекса газификации с получением синтетической нефти сам газогенератор с периферией

Таблица 3

Состав сырого газа, получаемого при газификации различных марок угля

Composition of the unrefined gas obtained by gasification of various coal grades

Способ	Сырье	Газифицирующий агент	Содержание, %					
			CO	CO ₂	H ₂	H ₂ O	CH ₄	N ₂
Lurgi	Каменный уголь	Кислород	9,2	14,7	20,1	50,2	4,7	-
Koppers-Totzek	Каменный и бурый уголь	Кислород	50,4	5,6	33,1	9,6	-	1,0
Kellogg	Каменный уголь	Водяной пар и кислород	26,0	10,3	34,8	22,6	5,8	0,3
Consol	Бурый уголь	Водяной пар	14,1	5,5	44,6	17,1	17,3	0,2
Bi-gas	Каменный и бурый уголь	Водяной пар и кислород	22,9	7,3	12,7	48,0	8,1	0,3

составляет 60-65%. Поэтому для повышения рентабельности этого процесса основное внимание следует уделить разработке новых подходов аппаратурному оформлению газификации углей, позволяющих снизить стоимость этого капиталоемкого узла. Современная высокоэффективная экологически чистая угольная генерация в 1,3 раза дешевле ветряной и в 1,9 раза дешевле солнечной генерации.

Место для угля и его газификации в системно развивающейся «чистой энергетике» однозначно найдется, поскольку уже сегодня «чистая» угольная генерация имеет значительные конкурентные преимущества по затратам на производство электроэнергии и тепла перед ВИЭ. Анализируя технико-экономические факторы, ясно, что в отсутствие накопителей электроэнергии и тепла только газовая и угольная генерации способны эффективно выполнять регулирующие функции. Недаром Япония и Южная Корея, не имеющие собственного производства угля, поддерживают за счет импорта его долю в своих топливных балансах на уровне 26-29%.

Этому и были посвящены в последние 29 лет совместные исследования, проведенные сотрудниками ИГИ (в это время институт находился в стадии преднамеренного банкротства), ЗАО «Компомаш-ТЭК», АО Алвиго М и других инжиниринговых компаний.

Была проработана модель принципиально нового подхода к аппаратурному исполнению газификации углей с использованием в качестве сырья мелкодисперсного угля субмикронных размеров в форме водоугольного топлива, прямоточно-вихревого дутья в газогенератор, с использованием бескомпрессорного воздушного дутья, молекулярных сит из углей для обогащения воздуха кислородом, систем улавливания выделяющихся смол и возвращения их в качестве компонента водоугольного топлива, новых подходов к системам газоочистки от механических примесей и т.д. Ряд элементов этих новых подходов и новой техники был испытан на установке газификации угля на Томской ТЭЦ-3, некоторые элементы – в г. Омске и на Жилевской ОПОФ [3].

С учетом накопленного экспериментального опыта по газификации водоугольной суспензии, приготавливаемой из каменных и бурых углей, в лабораторных условиях «ИГИ», ЗАО «Компомаш-ТЭК» и ООО «Новые физические принципы» совместно создали научные и технологические основы нового процесса безотходной прямоточной высокотемпературной газификации грубодисперсных ВУС бурого угля в среде ультраперегретого пара. В Кузбассе около 350 угольных пластов, из них в большинстве (более 230) содержатся два главных зоолообразователя – оксиды алюминия и кремния при 75% их содержания в золе углей, десятилетиями уходящей в отвалы. На базе указанных особенностей углей и отходов идет создание комплексной технологии их безотходного передела в синтез-газ и параллельного получения высоколиквидных продуктов – различных марок ферросиликоалюминия и сплавов алюминия из минеральной части угля стоимостью в 40 раз выше первоначальной стоимости угля.

За счет высокой скорости (>1800 м/с) и повышенной температуры (< 2400°C) детонационно-ударных волн происходит доизмельчение частиц угля с удалением остаточной связанной влаги и испарением всей воды из подаваемой суспензии. Одновременно происходит термообработка частиц угля с выделением большей части летучих веществ, способствующих росту содержания углеродосодержащих структур СН. При скоростном нагреве (имеет место эффект термоудара) частички бурого угля подвергаются деструкции с преимущественным образованием низкомолекулярных кислородсодержащих соединений.

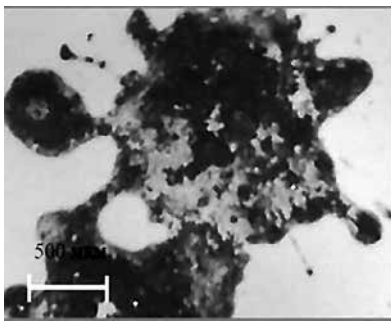
На выходе из экспериментального импульсно-детонационного генератора ударных волн модуля термохимического передела образуется высокорекреационная, высококалорийная горючая смесь, состоящая из: пара испарившейся жидкой фазы суспензии; термообработанных измельченных частиц угля (крупностью до 1 мкм); большей части выделившихся летучих веществ;

продуктов сгорания инициирующегося топлива. На рис. 1 показаны фотографии отпечатков капель ВУС, попадающих на экран при распыле до и после детонационно-ударного воздействия ударной волны. Видно, что получаемая горючая смесь по размерам частиц угля стала более дисперсной.

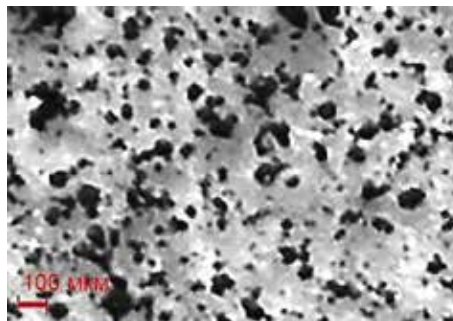
Получаемая горючая смесь поступает в реактор модуля термохимического передела, где проходит прямоточная высокотемпературная газификация (рис. 2).

Температура подаваемого перегретого пара в реактор регулируется с учетом необходимой температуры газификации до 2000°C.

При прямоточной высокотемпературной газификации в среде ультра-



Капля ВУС до детонационно-ударного воздействия.
Диаметр частиц угля до 500 мкм.



Капля ВУС детонационно-ударного воздействия ударной волны.
Диаметр частиц угля до 1 мкм +
+ водяной пар + летучие вещества

Рис. 1. Сравнение отпечатков капель ВУС, попадающих на экран при распыле до и после детонационно-ударного воздействия ударной волны

Fig. 1. A comparison of the imprints of the coal-water slurry droplet hitting the screen during spraying before and after the detonation-shock impact of the shock wave

Характеристики сухого энергетического газа (ЭГ) для стехиометрического состава уголь – высокотемпературный газифицирующий агент (ВГА) при атмосферном давлении

Characteristics of dry power gas (PG) for the stoichiometric composition of coal – VGA high-temperature gasifying agent at the atmospheric pressure

№ опыта	Состав ВГА		m, кг/кг	Состав влажного ЭГ		Состав сухого ЭГ	
	ХСО ₂	ХН ₂ О		ХСО	ХН ₂	ХСО	ХН ₂
1	0,330	0,670	0,735	0,5125	0,4027	0,5600	0,4400
2	0,560	0,440	0,604	0,5997	0,3156	0,6552	0,3448
3	0,712	0,288	0,539	0,6581	0,2572	0,7190	0,2810
4	0,719	0,281	0,536	0,6608	0,2546	0,7219	0,2781

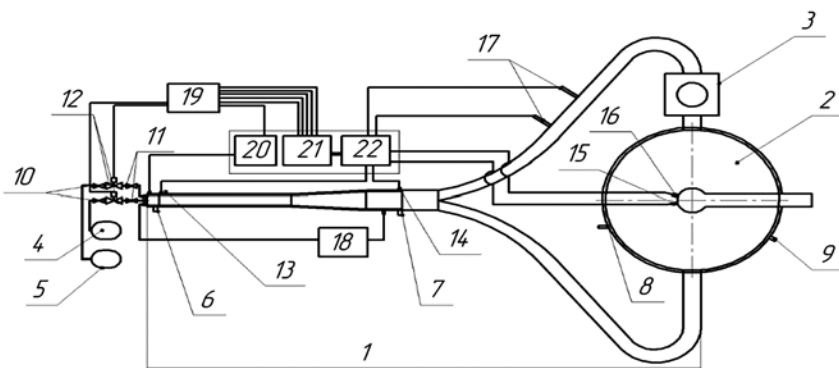


Рис. 2. Схема модуля термохимического предела в составе импульсно-детонационного генератора ударных волн и реактора: 1 – модуль термохимического предела, 2 – реактор, 3 – дозатор, 4 – топливный ресивер системы подачи пускового иницирующего топлива, 5 – кислородный ресивер системы подачи топлива, 6, 7 – патрубки рубашки системы терморегуляции детонационного пароперегревателя, входной и выходной соответственно, 8, 9 – патрубки рубашки системы терморегуляции реактора, входной и выходной соответственно, 10 – обратные клапаны, 11 – огнепреградители, 12 – электромагнитный клапан, 13, 14 – термопары системы терморегуляции, 15 – термopара коллектора отвода продуктов конверсии из реактора, 16 – датчик давления коллектора отвода продуктов конверсии из реактора, 17 – ионизационные зонды, 18 – система подготовки водяного пара и подачи его в детонационный пароперегреватель, 19 – блок управления, 20, 21, 22 – системы и аппаратура лабораторно-измерительного комплекса: система зажигания, АЦП, блок питания ионизационных зондов соответственно

Fig. 2. A diagram of the thermochemical conversion module in the pulse-detonation generator of shock waves and the reactor

Блок-схема получения синтез-газа из первичной суспензии бурого угля с применением процесса безотходной прямоточной высокотемпературной газификации в среде ультраперегретого пара представлена на рис. 3.

Рядовой бурый уголь (см. рис. 3) поступает в приемный бункер 1 и затем в молотковую дробилку 2, где уголь измельчается до крупности 40 мм и подается в параболическую виброимпульсную мельницу 4 одновременно с дозированными добавками реагента 5 и воды 6, обеспечивающими необходимое соотношение твердых частиц угля Т к жидкой фазе Ж. Из мельницы получаемая первичная суспензия с крупностью твердых частиц до 1 мм подается в модуль термохимического предела. Сначала суспензия в модуле поступает в импульсно-детонационный генератор ударных волн, где под воздействием высокой температуры (до 2400°C) и скорости ударных волн более 1800 м/с, образующихся за счет применения энергии импульсно-детонационного горения, происходит термохимическое преобразование

перегретого пара ВУС типового бурого угля с массовой долей углерода 0,61, зольностью 0,31 характеристики сухого энергетического газа (ЭГ) для стехиометрического состава уголь – высокотемпературный газифицирующий агент приведены в табл. 4.

При определении объема подаваемого ультраперегретого пара в зону газификации кроме установленной требуемой температуры до 2000°C также учитывается масса пара, образующегося от испарения жидкой фазы ВУС, входящего в состав газифицируемой горючей смеси.

Проведенные лабораторные исследования и экспериментальные работы по применению энергии импульсно-детонационного горения, образующей воздействие на ВУС, приготовленной из бурых углей, показали возникновение высоких температур (< 2400°C) и ударных волн с большой скоростью (> 1800 м/с) [4, 5].

первичной суспензии в высокорекреационную, высококалорийную горючую смесь, подаваемую несколькими потоками в реактор 9 с ультраперегретым паром и одновременной подачей кислорода. Затем в реакторе 9 происходит прямоточная высокотемпературная газификация поступающей из генератора 8 горючей смеси с одновременной конверсией (диссоциацией пара) и получением на выходе синтез-газа с требуемым соотношением СО:Н₂.

Требуемое соотношение СО:Н₂ = 2 регулируется объемом подачи пара. При этом из реактора 9 извлекается ценный расплав минеральной составляющей – ферросиликоалюминий, который является комплексным раскислителем, катализатором. Получаемый газ может использоваться в таких вариантах как энергетический газ в качестве топлива в радиальных газотурбинных электростанциях или других энергетических генериру-

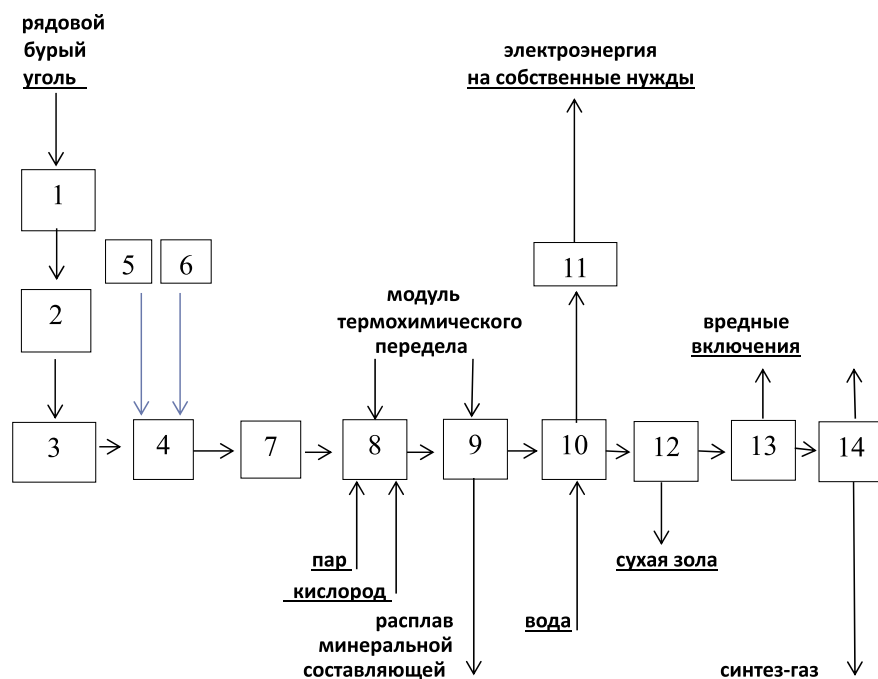


Рис. 3. Блок-схема получения синтез-газа из первичной суспензии угля с применением процесса безотходной прямоточной высокотемпературной газификации в среде ультраперегретого пара

Fig. 3. A block diagram of synthesis gas produced from primary coal suspension using a waste-free direct-flow high-temperature gasification process in an ultra-superheated steam media

ющих установках; в других вариантах – как синтез-газ, который охлаждается до 400°C перед его очисткой и поступает в динамический фильтр 12, где отбираются взвешенные сухие зольные и другие частицы и далее, после сухой очистки, через градиентные сепараторы 13 и 14 для получения готового синтез-газа, последующей подготовки и подачи в модуль Фишера-Тропша на выпуск синтетической нефти или энергогенерирующие установки с поршневыми приводами.

Проведенный сравнительный анализ процессов газификации угля показал, что наибольшими преимуществами обладает процесс безотходной прямоточной высокотемпературной газификации грубодисперсной ВУС в среде ультраперегретого пара со следующими основными преимуществами:

- энергоматериальные затраты при получении энергетического газа, синтез-газа снижаются в 2-3 раза в сравнении с применением газификации в других известных процессах как в России, так и за рубежом;

- технологическая схема получения энергетического газа, синтез-газа более простая и не включает энергозатратных устройств: гидроциклонов, гидроударных кавитаторов, вихревых газогенераторов;

- образующийся расплав минеральной составляющей ВУС является сырьем для получения ценных товарных продуктов (в том числе: ферросиликоалюминия, ценных металлов, редкоземов).

Расход стартового и иницирующего топлива составляет до 5% от объема подаваемого ВУС в импульсно-дето-

национный генератор ударных волн модуля термохимического передела, что соответствует удельным энергозатратам до 0,01 кВт·ч/кг для термохимического передела сырья.

Технико-экономическими расчетами установлено, что новая безотходная технология передела, например в объемах до 5% суточной добычи угля угледобывающего предприятия с использованием дешевой энергии импульсно-детонационного горения, комплексным производством вышеуказанной продукции, улучшит рентабельность и конкурентоспособность производителей продукции (шахт и разрезов) и потребителей (стале-плавильное производство, машиностроение) и увеличит объемы газа для решения вопросов собственного или социального энергопотребления.

Примером послужит решение возникшей напряженности в программах снабжения населения топливом – новая программа социального и пайкового энергообеспечения в Кузбассе. По данным Кемеровостата, состав городского населения – 89%, а в структуре потребления электроэнергии в

регионе доля населения составляет 10%.

Исторически Кузбасс – это территория, где жители получали сортовой уголь значительно дешевле, чем в других регионах страны или бесплатно. При существующей системе энергоснабжения населения региона и только развивающегося газоснабжения при участии РЭК в установлении норм потребления и облэнерго при координации администрацией Кемеровской области будет создана основа оздоровления угольной отрасли и ее участия в программах социального энергообеспечения при снижении нагрузки на бюджет области. Обеспечение бесплатной социальной электроэнергией сформирует новый облик Кузбасса.

Для завершения полного цикла этого процесса планировалось довести этот процесс до рабочего состояния на Жилевской ОПОФ в рамках распоряжений Главы Государства, выпущенных в 2019 г. (Пр-1704 от 30.09.2019, Пр-1707 от 22.08.2019 г.) и в 2020 г. (Пр-32 от 26.01.2020) по восстановлению Института ИГИ и его научно-производственной деятельности, а также реализации утвержденной Председателем Правительства Российской Федерации М.В. Мишустиным дорожной карты № 12-609 от 22.08.2022. Однако институт до сих пор не приступил к их реализации.

На первом этапе выполнения этого поручения в рамках подписанной Министром обороны и утвержденной Правительством дорожной карты создания отечественного малотоннажного производства новых видов топлива из углей предполагалось провести исследования наличия

в РФ других разработанных и работоспособных малых газогенераторов нового поколения, оценку их работоспособности, создать полный технологический цикл и аппаратное оформление снабжения энергетическим газом коммунально-бытовых объектов малых населенных пунктов угольных регионов. Собрать эти газогенераторы для сравнительных испытаний предлагалось на базе ИГИ на Жилевской ОПОФ.

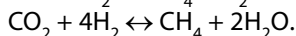
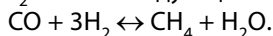
Следующим этапом предлагалось создание технологии и аппаратного оформления снабжения метанированным газом коммунально-бытовых объектов малых населенных пунктов угольных регионов, проведение НИОКР по разработке отечественной технологии по получению из синтез-газа энергетического метана для снабжения компримированным метаном газгольдеров коммунально-бытовых объектов малых населенных пунктов угольных регионов. Процесс рекомендуется проводить при воздушно-кислородном или кислородном дутье. Разработка такой технологии определяется идущей урбанизацией страны. Постоянно растущая потребность в природном газе зачастую ограничивается его запасами и доставкой потребителю на дальние расстояния. Для удовлетворения этой потребности может быть использован синтетический заменитель природного газа (СЗПГ).

СЗПГ – заменитель метана – может быть произведен при газификации различных видов угля посредством ступени каталитического метанирования, представляющего собой гидрирование оксидов углерода до метана в одну или несколько стадий.

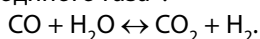
Синтез метана посредством каталитического гидрирования оксида углерода изучается с начала 1900-х годов. Этот процесс был подготовлен для реализации в 1940-х годах немецкой компанией Ruhrchemie. В 1950-1960-е годы работы в этом направлении были продолжены в США [6].

Свойства синтетического газа как топлива изменяются в широких пределах. Повышение теплотворной способности СЗПГ осуществляется прежде всего за счет увеличения в нем доли метана и снижения доли водорода и инертных примесей, а иногда добавлением углеводородов C_2 и выше. Желательно иметь газ, содержащий более 98% CH_4 , менее 1% CO и менее 1% H_2 .

Основные уравнения процесса метанирования CO и CO_2 имеют следующий вид:



Одновременно протекает реакция взаимодействия оксида углерода с образующейся водой – «равновесие водяного газа»:



Если даже весь исходный оксид углерода полностью расходуется по целевой реакции, то все же некоторое количество его остается как продукт протекания обратной реакции водяного газа.

Реакция метанирования CO – каталитический процесс, осуществляемый в присутствии катализаторов на основе переходных металлов, чаще всего, никеля. Для проведения метанирования CO стремятся использовать катали-

заторы с возможно большей удельной поверхностью, термически стабильные и механически прочные.

При разработке способов производства СЗПГ из угля наибольшее внимание уделяется способу газификации, а последующие ступени очистки генераторного газа и метанирования CO принимают по аналогии с уже реализованными процессами.

Можно видеть, что получаемый при газификации генераторный газ, вне зависимости от сырья, содержит значительное количество водорода. Избыток водорода следует свести к минимуму посредством осуществления его взаимодействия с присутствующими в смеси оксидами углерода. Количество первичного метана в генераторных газах обычно небольшое.

Для его повышения после проведения газификации осуществляют метанирование преимущественно в две или более ступеней. При проведении метанирования очень важно уделять большое внимание хорошему отводу тепла и предупреждению дезактивации катализатора вследствие его отравления вредными примесями или из-за отложения углерода. Для этого используют трубчатые реакторы, обеспечивающие хорошие условия тепло- и массопередачи при практически изотермических условиях. Можно также применять более дешевые шахтные реакторы с холодной и горячей циркуляцией газа.

Наиболее старым и самым разработанным способом получения синтетического заменителя природного газа является процесс Lurgi, сочетающий газификацию угля со ступенью метанирования. Этот процесс применяется, например, компанией Sasol в Южной Африке. Усовершенствованный процесс Lurgi с газогенератором, работающим под давлением, использовали в США для получения СЗПГ из вспучивающихся и спекающихся углей.

Способ Hugas, реализованный на многих пилотных установках, близок к способу Lurgi, но с применением рециркуляции холодного газа. Кроме того, вместо одного реактора используют каскад из нескольких адиабатических реакторов. При этом контролируют температуру в реакторах ($300-350^\circ$) и степень превращения CO , смешивая сырой газ и холодный циркуляционный газ с отходящим газом предшествующей ступени. Такой способ осуществления процесса является более гибким, он позволяет учитывать отношение $CO:H_2$ в подаваемом газе.

В способе Synthane также используются реакторы со стационарным слоем катализатора. Сырой генераторный газ, полученный газификацией угля в псевдооживленном слое при 70 атм, после очистки и конверсии проходит через трубчатый реактор метанирования. Внутренние стенки реактора покрыты никелем Ренея, нанесенным посредством газопламенного напыления. Стенки играют роль носителя катализатора и переносчика тепла. Эти аппараты называются TWR (Tube Wall Reactor – реактор с (катализирующей) стенкой трубы). Они характеризуются малой потерей давления при горячей циркуляции газа, а также высокой удельной производительностью и стабильностью. Чтобы повысить степень превращения оксида углерода, последовательно помещают небольшой реактор со стационарным слоем катализатора

и циркуляцией горячего газа. СЗПГ, получаемый в процессе Synthane, по качеству близок к природному газу.

Процесс RM (Reforming Methanation – сочетание реформинга и метанирования) характеризуется отсутствием отдельной стадии конверсии в случае применения газов с высоким содержанием CO, образующихся при неполном окислении нефтеугольных смесей по модифицированному способу Техасо

Метанирование проводят при подаче большого избытка водяного пара в каскад из шести реакторов адиабатического типа со стационарным слоем катализатора. В процессе не используют циркуляции газа, но применяют промежуточные холодильники. Конверсия и метанирование протекают одновременно во всех шести реакторах при последовательном снижении температуры с 550 до 280°C. После удаления CO₂ из сырого газа в дополнительном реакторе со стационарным слоем катализатора проводят метанирование оставшегося оксида углерода.

Синтезу метана из газов с высоким содержанием CO на стационарных катализаторах отдается предпочтение, несмотря на некоторые трудности осуществления этого процесса.

С целью устранения недостатков, присущих реакторам со стационарным слоем, разрабатываются также процессы с движущимся слоем катализатора в газовой или жидкой фазе. В частности, для метанирования смесей CO+H₂, получающихся при газификации бурого угля, разработан реактор с псевдооживленным слоем, работающий при давлении 70-100 атм и температуре 430-550°C. Эта разработка рассматривается как одна из стадий процесса Bi-Gas для производства СЗПГ, соответствующего нормам США (теплота сгорания 33440 кДж/м³, содержание CO <0,1%). К достоинствам реакторов этого типа следует отнести: равномерную температуру вдоль слоя катализатора, более высокую теплопередачу, возможность непрерывной замены отработанного катализатора. Основным недостатком псевдооживленного слоя – невозможность достичь полной конверсии CO (обычно ~80%) вследствие частого проскока больших пузырей реагирующего газа через слой взвешенного катализатора. Поэтому после реактора с псевдооживленным слоем следует подключать реактор со стационарным слоем катализатора и рециркуляцией газа, где при температуре ~290°C достигается практически полное превращение оставшегося газа.

Жидкофазное метанирование было испытано в 1975 г. на большой опытной установке. Газ, подлежащий метанированию, направляли в пустотелый реактор, заполненный смесью углеводородов с суспендированным в них катализатором. Отвод тепла осуществляли, отбирая часть жидкой суспензии и возвращая ее после охлаждения назад в реактор. Технология процесса метанирования в жидкой фазе очень сходна с жидкофазным вариантом синтеза Фишера-Тропша.

Существует еще целый ряд методов получения СЗПГ через метанирование CO, отличающихся особенностями проведения газификации. Например, в способе «CO₂-акцептор» (разработка компании Consol) измельченный и подсушенный уголь предварительно нагревают

в псевдооживленном слое до 300°C, подвергают термическому разложению при 360°C в форгазификаторе, а затем газифицируют в основном газификаторе при 870°C. В процессе участвует обожженный доломит, который используется как акцептор CO₂. Получающийся диоксид углерода образует с доломитом карбонаты кальция и магния. В результате поставляется тепло для газификации и получается газ, свободный от CO₂ и пригодный для метанирования. Доломит обжигают в регенераторе и возвращают в реакцию.

В способе Molten Salt уголь газифицируют кислородом и водяным паром при 925°C и 85 атм в ванне с расплавленным карбонатом натрия. При этом соль действует как теплоноситель и как катализатор. В процессе образуется газ, свободный от смолы и содержащий 55-60% метана. Его можно подавать сразу на стадию метанирования.

При рассмотрении перечня известных зарубежных процессов метанирования синтез-газа становится ясно, что наша страна отстала в разработке такого процесса. Надо привлекать молодых специалистов-машиностроителей и химиков-технологов для создания отечественного аналогичного процесса, используя имеющийся опыт ИГИ, ГИАП, ЦКТИ и ВТИ. Только в этом случае можно будет успешно провести в последующем полную газификацию угольных регионов, используя в качестве сырья в основном уголь.

ВЫВОДЫ

1. Цель правительственных распоряжений – создание сети газового снабжения угольных регионов, других регионов России за счет процессов газификации имеющихся местных ресурсов угля.

2. В настоящее время развиваются экономически эффективные области применения газификации углей:

- газификация высокозольных и сернистых углей с последующим их сжиганием на тепловых электростанциях;
- газификация углей с целью получения заменителя природного газа;
- газификация углей с целью производства синтез-газа и водорода для нужд нефтехимической и химической промышленности.

Аппаратурно-технологическое оформление этих процессов требует использования компонента в дутье – кислорода, что повышает стоимость газа и экономической нецелесообразности в этих условиях использовать его в коммунальной энергетике.

С целью получения для коммунально-бытового сектора из углей энергетического газа необходимо разрабатывать новые подходы к реализации этого процесса.

Содержащиеся в угольных пластах алюмосиликаты десятилетиями при обогащении и сжигании уходят в отвалы.

Идет создание комплексной технологии их безотходного передела в синтез-газ и параллельного получения высоколиквидных продуктов – различных марок ферросиликоалюминия и сплавов алюминия из минеральной части угля с ростом стоимости продукта в 40 раз выше цены угля при улучшении рентабельности угледобывающего предприятия.

Проведенные расчеты термодинамического равновесного состава продуктов на примере газификации типового бурого угля (ТБУ) смесью ультраперегретых водяного пара и диоксида углерода и экспериментальные исследования теплового и динамического воздействия импульсно-детонационного горения – газификации бурых углей на лабораторных и стендовых установках позволяют отработать перспективные конструктивно-технологические решения для опытных комплексов оборудования.

Необходимо создание технологии и аппаратурного оформления снабжения метанированным газом из угля коммунально-бытовых объектов малых населенных пунктов угольных регионов, так как потребность в природном газе зачастую ограничивается дальними расстояниями.

Необходима государственная поддержка реализации проектов, что послужит интересам угольной отрасли, ее оздоровлению, пополнению бюджета. Это будет одним из решений возникшей напряженности в программах энергообеспечения населения в Кузбассе – новым подходом к социальному и пайковому энергообеспечению за счет развитой энергосистемы региона, где 89% городского населения, развитая энергосистема, а потребление электроэнергии населением составляет 10%.

Не выполняются правительственные распоряжения, в том числе, по восстановлению ФГУП ИГИ, кадры которого способны содействовать решению проблем энергообеспечения коммунально-бытового сектора, создания отечественного малотоннажного производства новых видов жидких топлив из углей, но институт до сих пор не может приступить к решению этих задач.

Список литературы • References

- Гинзбург А.Б. Газификация низкосортного топлива. М.: Промстройиздат, 1950. 170 с.
- Володарский И.Х., Игнатова Н.Н., Шпирт М.Я. Критерии оценки угля как сырья для производства синтетических газообразных топлив, концентратов редких элементов и других химических продуктов: В Юбилейном сборнике трудов ИГИ: Состояние и перспективы комплексного использования твердых горючих ископаемых. М.: НТК «ТРЭК», 2011. С. 48-58.
- Горлов Е.Г., Андриенко В.Г., Шпирт М.Я. Газификация ультратонких водоугольных суспензий // ХТТ. 2019. № 6. С. 29-34. Gorlov E.G., Andrienko V.G., Shpirt M.Ya. Gasification of ultrathin coal-water suspensions. *Khimiya tverdogo topliva*. 2019;6:29-34. (In Russ.).
- Условия самозапитки импульсно-детонационных пушек энергетическим газом при газификации бурых углей продуктами детонации / К.А. Авдеев, В.А. Сметанюк, В.Г. Пилецкий и др. // Горение и взрыв. 2024. Т. 17. С. 95-104.
- Avdeev K.A., Smetanyuk V.A., Piletsky V.G., Frolov S.M. Conditions for self-priming pulse detonation guns with energy gas during gasification of brown coals with detonation products. *Gorenje i vzryv*. 2024;(17):95-104. (In Russ.).
- Frolov S.M., Smetanyuk V.A., Shamshin I.O., Sadykov I.A., Koval' A.S., Frolov F.S. Production of highly superheated steam by cyclic detonations of propane and methane-steam mixtures with oxygen for waste gasification. *Appl. Therm. Eng.* 2021;183(1):116195. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116195.
- Фальбе Ю. Химические вещества из угля. М.: Химия, 1980. 614 с.

Authors Information

Alekseyev K.Yu. – Full member of the Russian Academy of Mining Sciences, President, Association of Enterprises of the Coal Industry, Moscow, 107996, Russian Federation, e-mail: info@cool-union

Gorlov E.G. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Scientific Director of the Institute of Combustible Fossils – Scientific and Technical Center" (ICF-STC LLC), Moscow, 115230, Russian Federation, e-mail: gorloveg@mail.ru

Piletsky V.G. – PhD (Engineering), Executive Director of the Institute of Combustible Fossils – Scientific and Technical Center" (ICF-STC LLC), Moscow, 115230, Russian Federation, e-mail: pvg2000@yandex.ru

Frolov A.A. – Advisor to the Scientific Director of the Institute of Combustible Fossils – Scientific and Technical Center" (ICF-STC LLC), Moscow, 115230, Russian Federation, e-mail: a.frolov@maxima.ru

Frolov S.M. – Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Head of the Department, Head of the Laboratory of the N.N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, Professor at the National Research University, Moscow, 111250, Russian Federation, leading Researcher at the Scientific Research Institute of System Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117218, Russian Federation, e-mail: smfrolov@chph.ras.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 26.11.2025

Поступила после рецензирования: 17.01.2026

Принята к публикации: 29.01.2026

Paper info

Received November 26, 2025

Reviewed January 17, 2026

Accepted January 29, 2026